

*к.т.н. Куберский С.В.,  
д.т.н. Луценко В.А.,  
к.т.н. Боровик П.В.  
(ДонГТУ, Алчевск, Украина)*

## **ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОСНОВНЫХ ПРИМЕСЕЙ И ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ НА РАЗВИТИЕ ЛИКВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И КАЧЕСТВО МЕТАЛЛА**

*Досліджено вплив різноманітних факторів на розвиток ліквідації домішок у безперервно литому металі, властивості і якість заготовок, та визначені вихідні дані для створення математичної моделі напружено-деформованого стану слябів МБЛЗ.*

***Ключові слова:** безперервне розливання, сляб, домішки, ліквіація, вміст елементів, математична модель, напружено-деформований стан.*

*Исследовано влияние различных факторов на развитие ликвации примесей в непрерывно литом металле, свойства и качество заготовок, а также определены исходные данные для создания математической модели напряженно-деформированного состояния слябов МНЛЗ.*

***Ключевые слова:** непрерывная разливка, сляб, примеси, ликвация, содержание элементов, математическая модель, напряженно-деформированное состояние.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Развитие современного металлургического комплекса Украины характеризуется внедрением новых высокоэффективных технологических схем и оборудования для производства качественной металлопродукции способной конкурировать с лучшими образцами передовых мировых производителей.

Одним их основных технологических решений способствующих снижению издержек отечественного производства и повышающих его эффективность является непрерывная разливка стали.

Сегодня большая часть крупнейших металлургических предприятий Украины имеет в своем составе современные сталеплавильные комплексы включающие выплавку стали в кислородных конвертерах, внепечную обработку на агрегатах типа ковш-печь и непрерывную разливку в сортовые либо слябовые заготовки.

Основным направлением улучшения технико-экономических показателей получения металлопродукции в современных условиях является снижение ресурсо- и энергозатрат, а также повышение ее эксплуатационных и качественных показателей. В тоже время эффективность процесса непрерывной разливки существенно зависит от технологических параметров жидкого металла обеспечиваемых внепечной подготовкой к разливке, а также организации и строгого соблюдения заданных параметров и условий поведения металла в промежуточном ковше, кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения.

Высокое качество непрерывно литого металла в значительной степени зависит от возможности прогнозирования и управления его внутренней структурой на основании сведений о параметрах разливки и химическом составе стали.

Поэтому, создание эффективных систем прогнозирования механических характеристик стали в любой точке технологической оси МНЛЗ, а также способных обеспечивать управление процессами кристаллизации и структурообразования является весьма актуальной научной задачей. Кроме того, необходимо создание систем учитывающих влияние на процессы формирования непрерывно литой заготовки высокоэффективных методов электромагнитного перемешивания и мягкого обжатия применяемых на большинстве современных МНЛЗ.

#### **Анализ исследований и публикаций.**

Среди многообразия математических моделей процесса непрерывной разливки [1-3] отсутствуют модели, которые позволяют определить параметры напряженно-деформированного состояния в различных точках заготовки и тем самым оценить вероятность образования дефектов с учетом двух и трехмерного течения металла.

Авторами работы для прогнозирования напряженно-деформированного состояния непрерывно литых заготовок предложено использовать метод конечных элементов в его программной интерпретации Abaqus, который в полной мере позволяет учесть двух и трехмерный характер течения металла при оценке его механических характеристик и склонности к образованию грубых дефектов поверхности и внутренней структуры [4].

Для создания математической модели напряженно-деформированного состояния непрерывно литого металла при обработке давлением важное значение имеет целый ряд технологических параметров, таких как температурно-скоростной режим разливки, организация вторичного охлаждения и настройка элементов ЗВО, толщина слитка, химический состав разливаемого металла, а также его изменение по сечению в процессе формирования непрерывно литых заготовок.

### Постановка задачи.

Целью данной работы является определение исходных данных по распределению примесей и уровню их ликвации, которые необходимы для создания математической модели напряженно-деформированного состояния металла при обработке давлением, а также исследованию влияния различных элементов на качество непрерывного слитка.

### Изложение материала и результаты.

Химический состав разливаемого непрерывным способом металла в значительной степени определяет характер кристаллизации слитка, образование химической неоднородности по его сечению, склонность к дефектообразованию и в дальнейшем эксплуатационные характеристики.

Почти все элементы в той или иной степени растворимы в жидком железе. В твердом железе растворимость многих элементов ограничена. Различная растворимость элементов в жидкой и твердой фазах обуславливает химическую неоднородность слитка.

В процессе роста твердой фазы на фронте кристаллизации происходит накопление ликвирующих примесей. Это связано с тем, что скорость диффузионного перемещения примесей, выделившихся в результате ограниченной растворимости в твердой фазе, на два-три порядка меньше скорости продвижения фронта кристаллизации.

На рисунке 1 представлено наиболее характерное распределение примесей по сечению непрерывно литого металла, которое может быть использовано при разработке математической модели напряженно-деформированного состояния [5].

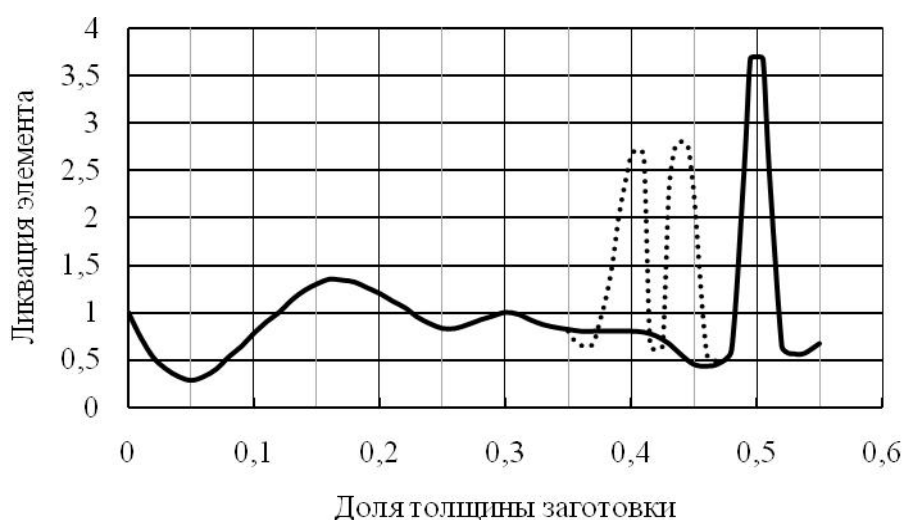


Рисунок 1 – Типичное распределение примесей по сечению непрерывнолитой заготовки

Концентрация растворенного элемента, как следует из рисунка 1, вначале постепенно снижается от поверхности заготовки, и минимальное значение ее соответствует участку, расположенному на расстоянии, составляющем 0,03 – 0,07 толщины заготовки от ее поверхности. Этот участок заготовки кристаллизуется в условиях приближенных к мгновенному затвердеванию и слабо развитой зоны двухфазного состояния, что и предопределяет получение обедненной ликватами структуры из-за различной их растворимости в твердом и жидком железе. После этого концентрация увеличивается, причем за отрицательной ликвацией отмечается положительная на участке шириной 0,07 – 0,18 толщины заготовки. Затем происходит плавное снижение концентрации до исходной и далее она имеет примерно постоянное значение по направлению к оси заготовки.

В узкой осевой зоне, как правило, наблюдается более или менее ярко выраженная положительная ликвация (индекс ликвации от 1,3 до 4,5), непосредственно перед которой расположена зона, обедненная примесями.

Аналогичные результаты были получены при исследовании темплетов вырезанных из непрерывнолитого сляба сечением 220\*1260 мм стали С091ТМ разлитой на двухручьева слябовой МНЛЗ ОАО «Алчевский металлургический комбинат» (ОАО «АМК»). Ширина осевой ликвации составила 1-2% от толщины сляба.

Внецентренная область, примыкающая к осевой зоне, может быть поражена полосчатой неоднородностью – чередованием полос толщиной 0,02 – 0,03 толщины заготовки с повышенным и пониженным содержанием элементов.

При определенных условиях в слитках непрерывной разливки прямоугольного сечения с большим соотношением сторон химическая неоднородность может иметь значительное развитие (осевая и внецентренная ликвация) и содержание ликвирующих примесей в осевой зоне превышает марочный показатель в 1,3 – 1,7 раза, а содержание серы и фосфора может быть значительно выше этого показателя. Чем сильнее осевая ликвация, тем больше «штриховатость» по оси листов. Грубая осевая ликвация приводит к расслоению. Механические испытания стандартных образцов, вырезанных из осевой зоны листов вдоль направления прокатки, показали, что усиление дефекта «штриховатости» приводит к снижению предела прочности до 16,7 %, предела текучести до 28 %, ударной вязкости до 13,8 %.

Анализ ликвации в центре слитка и на периферии показывает, что осевая часть имеет значительно больший индекс ликвации (рисунок 2).

Так содержание серы в центральной зоне слитка толщиной 150 мм из ст.3 более чем в 3 раза превышает марочное значение, тогда как лик-

вазия серы по толщине в образцах, отобранных на расстоянии 20 мм от узкой грани не превышала индекса 1,4. Повышение концентрации серы в металле способствует увеличению индекса ликвации.

Повышение температуры металла вызывает усиление ликвации на 40 – 45% по фосфору и сере и на 30 % по углероду.

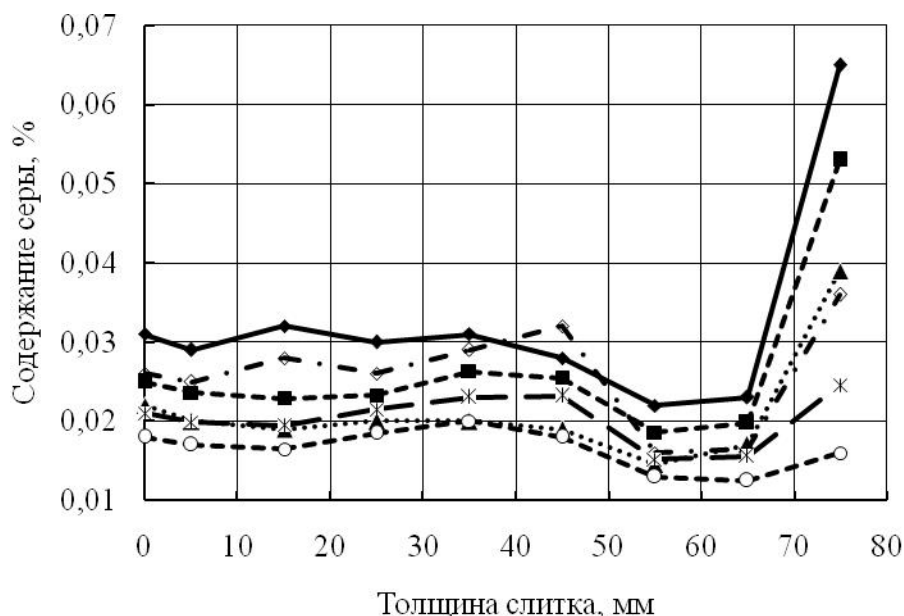


Рисунок 2 – Изменение содержания серы по толщине непрерывнолитой заготовки в зависимости от ее начальной концентрации

Значительное влияние на индекс ликвации примесей оказывает углерод, способствующий его повышению относительно практически всех основных примесных элементов (рисунок 3). Увеличение содержания углерода в диапазоне 0,05–0,10% практически не влияет на ликвацию основных примесей кроме фосфора. В интервале содержания углерода 0,10–0,70% индекс ликвации углерода, меди, ниобия и марганца возрастает до 1,5–2. В этом же интервале изменения концентрации углерода наблюдается резкое возрастание ликвации серы, которая достигает 3,8 и более. Высокий индекс ликвации с повышением содержания углерода характерен также фосфору. Наиболее опасным интервалом концентраций углерода в этом случае является 0,05–0,10%, в котором ликвация фосфора резко возрастает с 2 до 3,1, а при повышении содержания углерода с 0,10% до 0,70% индекс ликвации фосфора возрастает до 3,7.

С повышением скорости разливки в интервале 0,3 – 0,55 м/мин осевая ликвация возрастает на 30 % (по балльной оценке с 1,5 до 3,5) для всех марок стали [6]. При разливке углеродистой стали с повышением скорости осевая ликвация снижается, а при разливке стали марок

20X, 40X – возрастает [7]. Увеличение толщины слитка в диапазоне от 150 мм до 200 мм ведет к усилению осевой ликвации на 0,4 – 1,5 балла.

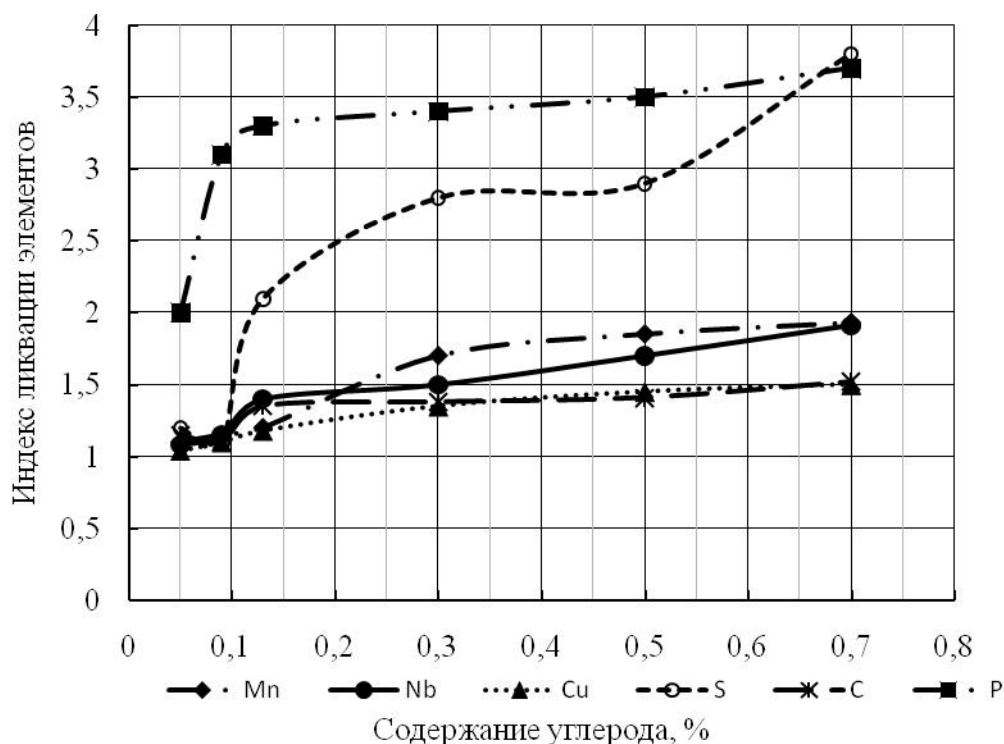


Рисунок 3 – Влияние содержания углерода на ликвацию основных примесей стали

Ликвация, главным образом, зависит от перегрева стали выше температуры ликвидуса. При повышении перегрева с 5 до 20 °С степень ликвации по сере увеличивается с 16 до 60 %.

Кроме того, можно отметить, что увеличение интенсивности охлаждения и некоторое обжатие заготовки в вытягивающей машине способствует снижению степени ликвации, а неравномерное вторичное охлаждение вызывает образование ликвационных полос.

В заготовках из малоуглеродистой стали присутствуют две зоны ликвации по сечению – поверхностная (до 15 – 20% от толщины слитка) и центральная (2 – 3% от толщины слитка) [8]. Максимальные отклонения (по отношению фактической концентрации к средней) составили: в поверхностной зоне – 0,85 (углерод и сера), а в центральной – 2,2 по углероду и до 5 по сере. Отрицательная ликвация у поверхности сляба больше развита у узкой грани, что предположительно связывается с действием потока струи из стакана. Развитие центральной ликвации объясняется характером структуры (развитием зоны равноосных кри-

сталлов) и степенью отраженного потока от механического воздействия на сляб.

При разливке открытой струей область отрицательной ликвации в поверхностном слое более ярко выражена в средней части широкой грани заготовки – коэффициент ликвации серы 0,55 при протяженности до 10% от толщины слитка, чем на периферии (0,85 и 12% соответственно). При разливке через погружной стакан область отрицательной ликвации более ярко выражена ближе к узким граням – коэффициент ликвации 0,78 при протяженности до 17% от толщины заготовки, чем в середине заготовки (0,85 и 23% соответственно).

Кроме того, в условиях кислородно-конвертерного цеха ОАО «АМК» были проведены исследования влияния концентраций водорода, азота и алюминия на ход технологического процесса непрерывной разливки и качество слябов.

Наличие высокого содержания растворенного водорода в стали является причиной ряда дефектов, таких как наружные звездообразные трещины и газовые пузыри, что способствует увеличению отбраковки металлопродукции. Эти дефекты являются следствием внутреннего давления возникающего когда атомы водорода спариваются для образования стабильных молекул  $H_2$  большего объема. Негативным проявлением водорода в стали также являются флокены, они появляются при температуре менее  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  и приводят к трещинам в стальных конструкциях.

Различные источники подтверждают наличие связи между содержанием водорода в стали и прорывами на МНЛЗ. Эти прорывы имеют вид залипания и объясняются адсорбцией водорода в смазку кристаллизатора. Пузыри газа вызывают кристаллизацию смазки и увеличивают ее вязкость. Риск прорывов становится критичным, когда уровень водорода превышает 9 ppm или  $9,7\text{ см}^3/100\text{ г}$ .

Для исследования влияния водорода на технологию непрерывной разливки и возникновения аварийных ситуаций была проведена статистическая обработка 171 плавки стали марки 1006 по данным разливочных журналов. Установлено, что содержание водорода в металле оказывает немаловажное влияние на ход технологического процесса. Подвижение слитка в кристаллизаторе и вероятность возникновения аварийных ситуаций возрастает с ростом содержания растворенного в стали водорода. При содержании водорода до 4,9 ppm количество аварийных плавок не превышает 10%, а дальнейшее повышение его концентрации приводит к увеличению этого числа до 82%.

Установлено, что содержание водорода в металле существенно повышается с увеличением расходов извести и алюмосодержащих материалов.

Высокие содержания азота ( $6-8 \times 10^{-3} \%$  или 60-80 ppm и более) не допустимы в стали для металлоконструкций, служащих при минусовых температурах, в листовом металле, предназначенном для глубокой вытяжки, а также в изделиях, служащих при высоких температурах. Вредное влияние азота особенно отчетливо сказывается на свойствах низкоуглеродистых безкремнистых сталей, от которых требуются высокие пластические свойства. Такие марки сталей (1006, 1008, 1010 и другие) занимают значительную долю в сортаменте предприятия, поэтому процессы сорбции между азотом воздуха и металлом в технологических условиях нового кислородно-конвертерного цеха требуют скорейшего и всестороннего изучения.

Было установлено, что химический состав низкоуглеродистых сталей сортамента ОАО «АМК» (низкое содержание углерода, серы и кислорода, легирование марганцем) в значительной степени способствует процессам сорбции азота между металлом и газовой фазой.

По данным исследования показателей 65 конвертерных и 68 мартеновских плавов была изучена динамика изменения содержания азота в стали по ходу технологического процесса. В обоих случаях содержание азота в кристаллизаторе МНЛЗ превышало допустимые значения, причем прирост содержания азота происходит, в том числе, и после обработки стали на вакууматоре, то есть при разливке стали на МНЛЗ, и составляет в среднем около 15 ppm. Установлено, что удаление азота из металла вследствие медленного протекания процесса десорбции – задача весьма сложная. Вакуумирование или продувка инертным газом, как показал опыт, в отношении азота являются операциями малоэффективными, особенно если металл низкоуглеродистый, безкремнистый и содержит нитридообразующие элементы.

При подготовке к непрерывной разливке в условиях ОАО «АМК» безкремнистых низкоуглеродистых сталей (SAE 1006÷1020, HSLA, 1M23, 1P12 и др.) на установке ковш-печь применяется раскисление стали алюминием.

Раскисление алюминием является одним из самых сложных вопросов производства стали для холоднокатаного листа. Это связано с тем, что один из самых применяемых раскислителей спокойной стали кремний ухудшает пластические свойства металла, вызывая образование дефектов при холодной обработке давлением. Поэтому предназначенную для производства тонкого автолиста сталь ряда марок раскисляют только алюминием, доводя его содержание в металле до 0,02-0,07%.

При наличии в стали такого большого количества алюминия наблюдается ряд негативных явлений: восстановление ухудшающего свойства стали кремния из ( $\text{SiO}_2$ ), образование большого количества неметаллических включений на основе ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), которые являются при-



чиной дефектов в листе (расслоение и т. п.) и значительно затрудняют условия разливки из-за затягивания разливочного канала, стаканов-дозаторов и погружных стаканов МНЛЗ.

Угар алюминия при непрерывной разливке сравним с угаром при внепечной обработке на У КП. Исходя из опыта работы отделения непрерывной разливки ОАО «АМК», при раскислении стали алюминием очень сложно получить необходимую чистоту непрерывнолитой заготовки по неметаллическим включениям без применения вакуумирования на этапе подготовки стали к разливке. Было установлено, что количество алюминия, введенного для раскисления металла, прямо пропорционально влияет на отсортировку готового листа по неметаллическим включениям.

### **Выводы и направления дальнейших исследований.**

Проведенные исследования позволили оценить характер распределения основных элементов (углерода, марганца, кремния, серы, фосфора) по толщине непрерывно литого слитка, параметры оказывающие наибольшее влияние на развитие осевой ликвации и качество заготовки, что позволяет разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния металла при обработке давлением различных марок сталей. Кроме того, произведена оценка влияния содержания отдельных элементов на ход технологического процесса непрерывной разливки и качество стали.

Дальнейшие исследования будут посвящены изучению влияния температурно-скоростных параметров непрерывного литья на качество металла, разработке эффективной технологии раскисления и легирования стали алюмосодержащими материалами и созданию математической модели напряженно деформированного состояния непрерывно литого слитка в зоне вторичного охлаждения.

### **Библиографический список**

1. *Логунова О.С. Исследование качественных зависимостей образования внутренних дефектов и теплового состояния непрерывно литых заготовок / О.С. Логунова // Сталь. 2008. –№10. –С.60-63.*
2. *Юрковский Н.А. Расчетный анализ влияния параметров непрерывной разливки на порообразование слитка / Н.А. Юрковский, Л.В. Буланов // Сталь. 2005. –№9. –С.14-16.*
3. *Паршин В.М. Интеллектуальные системы управления качеством непрерывнолитой заготовки / В.М. Паршин, А.Д. Чертов // Сталь. 2005. –№20. –С.37-43.*
4. *Lutsenko V.A. Development of mathematical modeling for hot rolling of continuous-casted slabs / V.A. Lutsenco, P.V. Borovik, N.N.*

*Zablodskiy, S.V. Kuberskiy, J. Csizmadia, Zs. Csepeli, V. Gonda // Сбор. науч. трудов. Вып. №29 – Алчевск: ДонГТУ. 2009. – С.119–124.*

5. Дюдкин Д.А. Производство стали. Том 4. Непрерывная разливка металла / Д.А.Дюдкин, В.В.Кисиленко, А.Н.Смирнов // – М.: «Теплотехник», 2009. – С. 130.

6. Мурасов Ф.М. Влияние технологии непрерывной разливки на развитие осевой ликвации в широких слябах / Ф. М. Мурасов, В. Е. Гирский, В. А. Есюнина и др. // Проблемы стального слитка. – М., 1974. – С. 673 – 677.

7. Бутаков Д.К. Влияние скорости разливки стали на качество , непрерывных слитков / Д. К. Бутаков, С. М. Олерская, С. В. Гальперина и др. // Проблемы стального слитка. – М., 1976. – С. 388 – 390.

8. Chashi T. Study on Solidification, Segregation and Fluid Flow of Molten Steel in Continuously Cast Slabs. I. N. E. // Trails. Iron and Steel Insf. Jараа. 1975. – № 1. – P. 571, 579.

**Рекомендовано к печати д.т.н., проф. С.Н. Петрушовым**