

В.М.Полещук¹⁾, В.Л.Бровкин²⁾

ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА С ЖИДКОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ НА КРИВОЛИНЕЙНЫХ МНЛЗ

¹⁾ Ассоциация научных организаций горно-металлургического комплекса Украины

²⁾ Национальная металлургическая академия Украины

Разработана схема физической модели очагов деформации на криволинейных участках технологической линии МНЛЗ. Показана необходимость учета деформированного состояния слитка с жидкой сердцевиной при его перемещении на участках с переменной кривизной траектории. Предложен аналитический аппарат для расчета показателей деформированного состояния непрерывного слитка с жидкой сердцевиной на критически важных участках технологической линии МНЛЗ.

Ключевые слова: криволинейная МНЛЗ, слиток с жидкой сердцевиной, деформированное состояние, расчет

Современное состояние вопроса. Уровень совершенства технологии непрерывной разливки и оптимальность параметров конструктивных элементов МНЛЗ во многом определяются выбранной физической моделью процесса разливки. В свою очередь качество физической модели зависит от того, насколько точно используемый аналитический аппарат отражает основные физические свойства реального технологического процесса. В фундаментальном труде коллектива проектантов и исследователей «Уралмаш-ПО» [1] отмечено, что известные к настоящему времени физические модели процесса разливки далеки от совершенства и позволяют только лишь оценить закономерности изменения деформированного состояния непрерывнолитого слитка в технологической линии МНЛЗ. О главном показателе технологии – качестве готовой продукции, можно судить только по результатам эксплуатации.

Прямым подтверждением такого вывода может служить тот факт, что большинство ключевых параметров процесса разливки и конструктивных решений МНЛЗ получают из эмпирических зависимостей, а не из аналитического описания физической модели [1]. В связи с этим совершенствование существующих и разработка новых физических моделей процесса деформации непрерывного слитка является актуальной темой для теории и практики непрерывной разливки.

При разработке новой физической модели исследуемого процесса или выборе из существующих моделей прежде всего необходимо определиться с параметрами, значимо влияющими на область существования исследуемой технологии. Применительно к процессу разливки на криволинейных МНЛЗ одним из значимых показателей технологии является качество готовой продукции. Появление признаков нарушения сплошности на поверхности или внутри слитка свидетельствует о выходе исследуемого варианта технологии за допустимые пределы области его существования.

Главной особенностью технологии разливки на криволинейных МНЛЗ является деформирование слитка с жидкой сердцевиной. В этих условиях важно определиться с критериями, характеризующими область существования такой технологии. В соответствии с аксиомой Сен-Венана деформируемость или способность сплошной среды не разрушаться в процессе выполнения технологической операции прямо зависит от величины относительного удлинения (укорочения) ε . Такая зависимость однозначна для простейших схем деформированного состояния – растяжения, сжатия и изгиба [2]. Было установлено, что разрушение (нарушение сплошности) не наступает до тех пор, пока относительное удлинение, определяемое из опытов на растяжение, не достигает критического значения, характерного для данного материала в заданных условиях.

По многочисленным публикациям известны результаты прямых и опосредованных экспериментов по определению критических значений относительной деформации, превышение которых приводит к возникновению дефектов на поверхности или в закристаллизовавшейся части непрерывнолитого слитка [3]. Из основ механики сплошной среды известно несколько вариантов количественной оценки величины относительной деформации. Чаще всего исследователи используют показатель Коши:

$$\varepsilon = \frac{\ell_k - \ell_0}{\ell_0}, \quad (1)$$

где ℓ_0 , ℓ_k – начальный и конечный размер деформируемого тела.

Показатель Коши не обладает свойством аддитивности [2], что вносит определенные ограничения по его применению. Главным ограничением является нелегитимность представления деформированного состояния сплошной среды в виде дискретных схем (частная относительная деформация, деформация в точках загиба (разгиба), деформация в пределах шага роликов рольганга и др.).

Постановка задачи. Применительно к задаче аналитического описания области существования технологии загиба и разгиба непрерывнолитого слитка сказанное выше означает, что для оценки уровня использования пластических свойств деформируемого тела необходимо и достаточно определить величину относительной деформации, накопленной (аккумулированной) телом за весь период деформации. Для случая неоднородной деформации величину относительной деформации исследуемой материальной частицы оценивают как накопленную на всей траектории ее перемещения в поле очага деформации. Здесь и далее под очагом деформации будем понимать закристаллизовавшуюся часть непрерывнолитого слитка, где изменяются взаимные расстояния между материальными частицами сплошного тела, но при этом сплошность самого тела не нарушается [2].

Изложение основных материалов исследования. На рис. 1 показана предлагаемая схема очага деформации в зоне разгиба. Основными компо-

нентами очага деформации являются поверхность максимальной кривизны, линия сопряжения радиального и криволинейного участков на входе в очаг деформации, а также сопряжения криволинейного и прямолинейного участков на выходе из него. Нижнюю границу очага деформации образует фронт кристаллизации A_0E_0 . Фронт кристаллизации - граница между металлом в твердожидком и твердом состоянии, причем металл в твердом состоянии соответствует критериям феноменологического подхода и может быть назван «сплошной средой» [2].

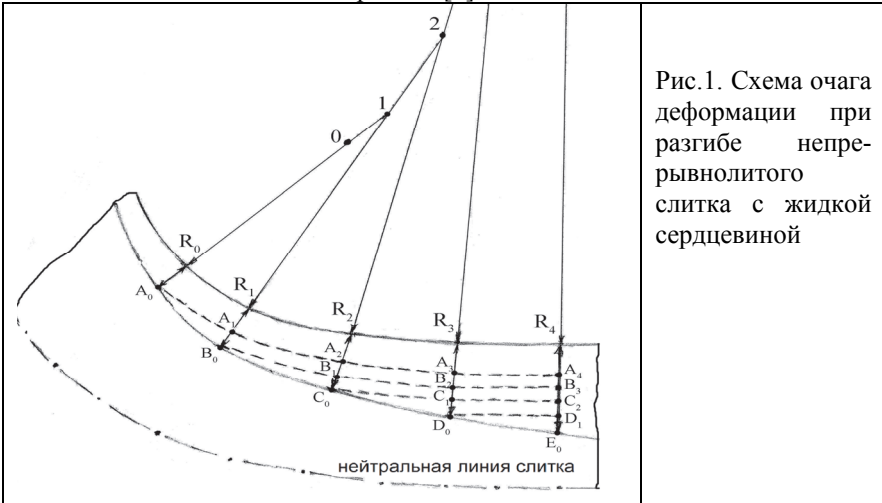


Рис.1. Схема очага деформации при разгибе непрерывного слитка с жидкой сердцевиной

Таким образом, фронт кристаллизации – это место возникновения материальных частиц, образующих закристаллизовавшуюся часть тела непрерывного слитка. Здесь начало траекторий их перемещения (пунктирные линии $A_0 - A_4$, $B_0 - B_3$ и т.д.). Фронт кристаллизации в очаге деформации расположен под углом к поверхности слитка, величина которого зависит от скорости разливки и скорости охлаждения внутренних слоев слитка. Отметим важное свойство фронта кристаллизации – каждая последующая материальная частица имеет траекторию отличную от траектории предыдущей частицы, а также иные исходные параметры. Указанное свойство фронта кристаллизации в совокупности с несовпадением его вектора с траекториями материальных частиц в очаге деформации ставит под вопрос легитимность приема суммирования относительной деформации вдоль фронта кристаллизации [4].

Обратимся к упрощенной схеме очага деформации показанной на рис. 2. Несомненно, что в момент образования любой материальной частицы на линии фронта кристаллизации показатель уровня ее деформации равен нулю: $\varepsilon_{\phi.к.} = 0$. Следовательно суммарная величина относитель-

ной деформации всех материальных частиц образующих фронт кристаллизации также равна нулю.



Рис.2. Эпюры текущей и итоговой относительной деформации в очаге деформации при разгибе слитка

Еще одним формальным доказательством неправомерности суммирования показателя деформации " ε " вдоль фронта кристаллизации является формула расчета относительной деформации k -го слоя, расположенного на расстоянии y_k от поверхности разгибаемого слитка [5]:

$$\varepsilon = \frac{h - y_k}{R_0 + y_k} - \frac{h - y_k}{R_i + y_k}, \quad (2)$$

где $h = \frac{H}{2}$ – полутолщина слитка (H – толщина слитка);

y_k – расстояние от поверхности слитка до k -го слоя;

R_0 – радиус кривизны исследуемого слоя в начале процесса разгиба ($\tau_0 = 0$);

R_i – радиус кривизны исследуемого слоя в i -й (τ_i) момент времени.

Из формулы (2) следует: если исследуемый слой не находится на поверхности слитка ($y_k \neq 0$), то для всех стадий разгиба этого слоя в расчете участвует только один параметр, характеризующий положение слоя в очаге деформации – y_k .

Кроме того, формула (2) однозначно свидетельствует о важной характеристике деформированного состояния слитка – неоднородности дефор-

мации как по высоте, так и по длине очага деформации. Известно, что неоднородность деформации выражается в том, что тензор и положение ее главных осей являются функциями координат деформируемого тела [2]. Функциональная связь относительной деформации " ε " в поле очага деформации с параметрами, изменяющимися как вдоль очага деформации (R_i), так и по его высоте (y_k), подтверждает сказанное выше:

$$\varepsilon = f(R_i, y_k). \quad (3)$$

Указанное свойство неоднородности деформированного состояния очага деформации графически подтверждается характером изменения эпюр величины относительной деформации по высоте слитка при его перемещении во времени от входа в очаг деформации и до выхода из него (рис. 2), где

$$\tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_i < \tau_{\max}. \quad (4)$$

Учитывая сложность деформированного состояния в очаге деформации, введем условное его структурирование:

– зона I – участок очага деформации, где, к моменту входа в него, металл полностью закристаллизовался и соответствует характеристикам сплошной среды;

– зона II – участок очага деформации, где по завершению процесса кристаллизации и образованию сплошной среды, она подвергается пластической деформации.

В соответствии с предложенным структурированием последовательно рассмотрим особенности деформированного состояния в каждой из зон.

При аналитическом описании процесса деформации слитка с жидкой сердцевинной принимаем, что процесс разливки – стационарный процесс. Кроме того, для обеспечения стыковки процессов, происходящих в очаге деформации, и визуализации их последовательности вводим систему координат $\varepsilon = f(\tau, y)$, где « τ » – продолжительность исследуемого процесса, а « y » – расстояние от поверхности слитка до траектории перемещения исследуемой материальной частицы в очаге деформации. Начало координат ($\tau = 0, y = 0$) находится на пересечении линии поверхности слитка и линии входа в очаг деформации.

Дополнительно отметим некоторые существенные особенности выделенных зон очага деформации.

Прежде всего о параметрах, связанных с временем. В зоне I деформация всех слоев начинается и завершается одновременно, т.е. продолжительность процесса деформации одинакова и не зависит от положения слоя относительно поверхности слитка. В зоне II с увеличением расстояния между поверхностью слитка и траекторией перемещения исследуемой материальной частицы продолжительность деформации сокращается от

$\tau_{\Sigma}^{II} = \tau_{\Sigma}^I = \max$ на линии сопряжения I и II зон до $\tau_{\Sigma}^{II} = 0$ в точке E_0 (см. рис. 2). Если деформация всех материальных частиц, образующих фронт кристаллизации начинается в разное время, то завершается она одновременно на линии сопряжения криволинейного и прямолинейного участков технологической линии МНЛЗ. Учитывая указанные выше различия I и II зон стыковку их будем выполнять по одному для этих зон параметру – времени начала и текущей продолжительности исследуемых процессов.

Зона I:

Считаем целесообразным выделить в зоне I поверхностный слой, поскольку на входе в очаг деформации он имеет максимальную кривизну и, соответственно, в процессе разгиба испытывает максимальную деформацию. По этой причине в некоторых физических моделях главным объектом исследований принят поверхностный слой.

При разгибе поверхностный слой слитка ($y = 0$) изменяет свою кривизну от $\frac{1}{R_0} = \max$ до 0. Соответственно величина относительной де-

формации поверхностного слоя изменяется от $\varepsilon_0^n = 0$ на входе в очаг деформации до $\varepsilon_{\Sigma}^n = \max$ на выходе из очага деформации.

Если проследить за любой материальной частицей на поверхности слитка от входа до выхода из очага деформации, то при непрерывном процессе деформации показатель относительной деформации в каждый последующий момент времени будет больше, чем в предыдущий. Этот эффект накопления деформации в сплошной среде предопределен аксиомой механики сплошной среды об использовании ресурса пластичности деформируемого материала [2].

С учетом вышеприведенного запишем формулу для расчета текущей величины относительной деформации поверхностного слоя

$$\varepsilon_k^n = \frac{h}{R_0} - \frac{h}{R_i}, \quad (5)$$

где R_0 – базовый радиус технологической линии МНЛЗ; R_i – текущее значение радиуса кривизны поверхности слитка в очаге деформации в момент времени $\tau_i > \tau_0$; h – расстояние от нейтральной линии слитка до его поверхности.

Итоговая величина относительной деформации поверхностного слоя равна

$$\varepsilon_k^n = \frac{h}{R_0}. \quad (6)$$

При переходе к подповерхностным слоям ($y_k \neq 0$) текущая и суммарная величина относительной деформации уменьшается (см. формулу (2)). Так же как и в поверхностном слое в подповерхностных слоях на входе в очаг деформации $\varepsilon_{0,k}^I = 0$, а на выходе накопленная относительная деформация максимальна: $\varepsilon_{\Sigma,k}^I = \max$.

Основываясь на (2) запишем формулу для вычисления текущего значения относительной деформации k -го слоя зоны I на участке разгиба:

$$\varepsilon_{\tau_i,k}^I = \frac{h - y_k}{R_0 + y_k} - \frac{h - y_k}{R_i + y_k}. \quad (7)$$

Итоговая величина деформации k -го слоя:

$$\varepsilon_{\Sigma,k}^I = \frac{h - y_k}{R_0 + y_k}, \quad (8)$$

Зона II:

Объем зоны II очага деформации сверху ограничен линией сопряжения зоны I и зоны II A_0A_4 (см. рис. 2). Нижнюю границу образует фронт кристаллизации A_0E_0 . В целом зона II имеет вид треугольника, где третью сторону образует линия сопряжения очага деформации с прямолинейным участком технологической оси МНЛЗ.

Основные особенности зоны II таковы: участок фронта кристаллизации в пределах очага деформации формируется из материальных частиц на протяжении всего времени прохождения слитком очага деформации. Угол между линией фронта кристаллизации и траекториями материальных частиц, образующихся на фронте кристаллизации, определяется соотношением скорости разливки $v_{разл}$ и скорости охлаждения (кристаллизации) металла слитка

$$\gamma = \arctg \left(\frac{v_{охл.}}{v_{разл.}} \right). \quad (9)$$

Такой механизм кристаллизации приводит к тому, что каждая последующая материальная частица, образующаяся на фронте кристаллизации, имеет свою индивидуальную траекторию перемещения в очаге деформации. Это также означает, что каждый слой зоны II имеет свое индивидуальное

альное время начала деформации $\tau_{0,k}^{II}$, свою индивидуальную продолжительность деформации $\tau_{деф,k}^{II}$ и свой индивидуальный исходный радиус кривизны траектории $R_{0,k}^{II}$.

Отмеченные особенности зоны II позволяют предложить в качестве механизма стыковки процессов деформации зон I и II следующее соотношение

$$\tau_i = \tau_{0,k}^{II}, \quad (10)$$

где τ_i – текущее значение времени пребывания материальной частицы в очаге деформации; $\tau_{0,k}^{II}$ – начало отсчета времени деформации материальной частицы k -го слоя зоны II.

Такой подход позволяет рассчитать для каждого момента времени τ_i исходные координаты материальной частицы k -го слоя на фронте кристаллизации

$$x_i^{\phi,k} = v_{разл} \cdot \tau_i; \quad (11)$$

$$y_k^{\phi,k} = v_{охл} \cdot \tau_i + y^I, \quad (12)$$

где y^I – толщина закристаллизовавшейся корочки зоны I.

Таким образом, для вычисления текущего значения относительной деформации k -го слоя зоны II на участке разгиба можно предложить следующую формулу

$$\varepsilon_{\tau_i,k}^{II} = \frac{h - y_k^{\phi,k}}{R_i + y_k^{\phi,k}} - \frac{h - y_k^{\phi,k}}{R_{i+1} + y_k^{\phi,k}}. \quad (13)$$

Итоговое значение относительной деформации k -го слоя зоны II равно:

$$\varepsilon_{\Sigma,k}^{II} = \frac{h - y_k^{\phi,k}}{R_i + y_k^{\phi,k}}. \quad (14)$$

Остается открытым вопрос о функции $R = f(\tau)$ или при постоянной скорости разлива $R = f(x)$. Принципиально возможны 2 варианта его разрешения. Первый – использовать стандартную кривую, отвечающую условиям легитимной стыковки ее с радиальным и прямолинейным участком технологической оси МНЛЗ. Второй, более сложный – разработать индивидуальную кривую, отвечающую требованиям бездефектной технологии в сочетании с минимизацией габаритов оборудования.

Первый вариант был реализован «Уралмашем» на слябовой МНЛЗ НТМК в виде кривой «клотоида». Второй вариант был также реализован «Уралмашем» на последующих МНЛЗ, для чего была использована кривая с фирменным названием «уралмашоида» [1].

Выводы

1. Разработана схема анализа деформированного состояния непрерывнолитого слитка с жидкой сердцевиной на участках с переменной кривизной технологической линии МНЛЗ. В основу схемы положены ключевые аксиомы и понятия механики сплошной среды.

2. Предложен аналитический аппарат расчета деформированного состояния слитка с жидкой сердцевиной на критически важных участках технологической линии МНЛЗ.

3. В процессе анализа более детализованной схемы очага деформации установлено два принципиально важных факта:

- деформированное состояние в очаге деформации (имеет все признаки) неоднородное, а потому с позиций механики сплошной среды поиск режима равномерной деформации при разгибе (загибе) слитка неравномерен;

- фронт кристаллизации не может быть использован в физической модели очага деформации, как объект, характеризующий деформированное состояние слитка с жидкой сердцевиной при его перемещении на участках с переменной кривизной траектории.

1. *Машины* непрерывного литья заготовок. / Л.В.Буланов, Л.Г.Корзунин, Е.П. Парфенов и др. – Казань: Марат, 2003. – 319 с.
2. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. – Харьков: Вища школа. – 1981. – 248 с.
3. *Полещук В.М., Бровкин В.Л., Мушенок Ю.А.* Анализ физических моделей процесса разгиба слитка в криволинейных МНЛЗ. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2014. – № 1. – С.45–51.
4. *А.С. № 349238.* Установка непрерывной разливки металла / Е.Ю.Гельфенбейн, С.Е.Карлинский, В.М.Нисковских и др. // *Опубл. 05.05.74.* – Бюл. № 17.
5. *Энергосиловые* параметры установок непрерывной разливки стали. / М.Я.Бровман, Е.В.Сурин, В.Г.Грузин и др. – М.: *Металлургия*, 1969. – 280 с.

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук Л.Г.Тубольцевым*

В.М.Полещук, В.Л.Бровкін

Деформований стан безперервного злитку з рідкою серцевиною на криволінійних МБЛЗ

Розроблено схему фізичної моделі осередку деформації на криволінійних ділянках технологічної лінії МБЛЗ. Показано необхідність обліку деформованого стану злитка з рідкою серцевиною під час його переміщення на ділянках зі змінною кривизною траєкторії. Запропоновано аналітичний апарат для розрахунку показників деформованого стану безперервного злитка з рідкою серцевиною на критично важливих ділянках технологічної лінії МБЛЗ.

Ключові слова: криволінійна МБЛЗ, злиток з рідкою серцевиною, деформований стан, розрахунок

V.M.Poleschuk, V.L.Brovkin

Strain state continuous ingot liquid core in the curved continuous casting machine

Scheme of a physical model of the deformation zone on the curved portion of the line caster developed. Made keeping deformed state with the liquid core of the ingot as it moves on path sections with variable curvature. Showed analytical apparatus for calculating the indices of the deformed states of the continuous billet with a liquid core in the critical areas of the process line casters.

Keywords: curved caster, ingot with liquid core, deformation, settlement