

В. М. Полещук¹⁾, В. Л. Бровкин²⁾

СХЕМА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕПРЕРЫВНО-ЛИТОГО СЛЯБА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ МНЛЗ

1) Ассоциация научных организаций горно-металлургического комплекса Украины

2) Национальная металлургическая академия Украины

Целью работы является разработка модели деформационно-напряженного состояния непрерывнолитой заготовки с учетом ее поведения в линии машины непрерывной разливки. Предложена новая физическая модель процесса выпучивания корки слитка в межроликовом промежутке. В основе модели использованы закономерности изменения деформированного состояния поверхности корки под действием ферростатического давления. Установлено, что корка испытывает циклическую знакопеременную деформацию в процессе перемещения ее по межроликовому промежутку. Показано, что поверхность корки вступает в контакт с поверхностью ролика до подхода к границе межроликового промежутка. Это обуславливает появление аномального участка с постоянной кривизной корки на завершающем этапе ее выпучивания. Вторым аномальным участком деформации корки слитка является зона стыка корки предыдущего и последующего межроликового промежутка, где корка мгновенно изменяет свою кривизну. В сочетании с плоской схемой напряженно-деформированного состояния представлена физическая модель, которая позволяет выявить в каждом из межроликовых промежутков зону максимальных величин показателя деформации растяжения. Выявление зоны максимальных величин показателя деформации растяжения и сравнение ее с предельно-допустимой позволяет определить и скорректировать длину межроликовых промежутков машины непрерывной разливки заготовок.

Ключевые слова: машина непрерывной разливки заготовки, непрерывнолитая заготовка, кривизна заготовки, деформированное состояние, физическая модель

Состояние вопроса. Параметры оборудования и технологии на современных машинах непрерывной разливки (МНЛЗ) во многом определяются требованиями, связанными с качеством готовой продукции. Приоритетными проблемами технологии в этом случае являются принятая конфигурация технологического канала МНЛЗ и используемые технологические режимы разливки. При этом в основу физической модели процесса закладывается напряженно-деформированное состояние слитка (НДС). Основная масса публикаций по НДС посвящена обоснованию выбора того или иного варианта физической модели и адаптации ее к конкретным условиям принятой технологии. При формировании физической модели в качестве базового инструментария

используются постулаты механики сплошной среды, базовые положения металловедения и аналитический аппарат теплотехники.

Традиционно при исследовании оптимальных режимов технологии непрерывной разливки, с позиций качества готовой продукции, основным объектом является напряженно-деформированное состояние слитка. При этом различают 2 вида деформированного состояния - выпучивание и правка, которые реализуются на МНЛЗ разных типов в разных сочетаниях. Наиболее распространенным вариантом МНЛЗ является МНЛЗ с криволинейной конфигурацией технологического канала, где кристаллизатор может быть двух видов – прямолинейный или криволинейный. Поскольку указанные виды деформации (правка и выпучивание) в практике построения физической модели принимаются как независимые, то каждый из указанных видов анализируется индивидуально, а результат их действия суммируется [1].

Анализ плоской схемы деформированного состояния корки непрерывно-литого слитка при правке представлен в публикации [2].

Целью работы является разработка модели деформационно-напряженного состояния непрерывнолитой заготовки с учетом ее поведения в линии машины непрерывной разливки. Конечной целью нашего исследования является определение положения в теле корки слитка зоны с максимальной величиной показателя интенсивности деформации растяжения при выпучивании и разработка методики вычисления его величины.

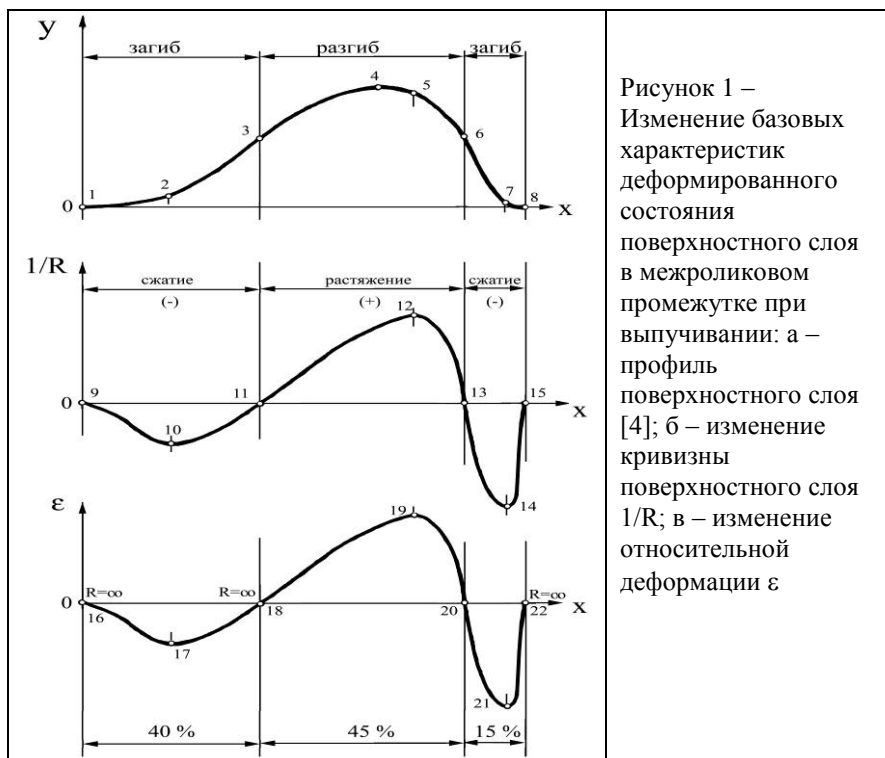
Изложение основных результатов исследования. Выпучивание является результатом действия ферростатического давления жидкого металла на закристаллизовавшуюся корку непрерывнолитого слитка в межроликовом промежутке. В непосредственной близости от кристаллизатора попарно расположенные ролики рольганга образуют технологический канал. Конфигурация канала, а также протяженность межроликового промежутка определяют амплитуду колебаний показателей напряженно-деформированного состояния металла от выпучивания в корке слитка.

Механизм образования внутренних трещин в корке непрерывно-литого слитка сложен и окончательно не установлен. Однако одним из наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на трещинообразование, является напряженно-деформированное состояние непрерывнолитых слитков [3].

В основе теоретических построений деформации корки при правке и выпучивании лежат результаты исследований процесса изгиба. Важным элементом физической модели деформированного состояния корки является, принятая в исследовании, схема деформации. В механике сплошной среды различают 3 схемы деформированного состояния – линейную, плоскую и объемную. Поскольку с переходом от линейной

схемы к плоской и объемной схемам сложность аналитического аппарата кратно возрастает, то в данном исследовании считаем целесообразным ограничиться плоской схемой, которая адекватно отражает особенности разливки слывов на криволинейных МНЛЗ.

В качестве исходной информации воспользуемся результатами исследования деформации выпучивания, выполненного в промышленных условиях и опубликованного в [4]. На рис. 1 приведен график изменения прогиба поверхности корки слитка в межроликовом промежутке при расстоянии между роликами $L = 860$ мм, ферростатическом давлении $p = 0,28$ МПа (2,8 ати), толщине корки $h = 83$ мм, температуре поверхности корки $t = 1030^{\circ}\text{C}$ и скорости разливки 0,85 м/мин.



Для упрощения описания введем цифровое обозначение характерных точек на линии поверхностного слоя корки. В точке 1 (рис. 1,а) деформация равна исходной (начальной) величине $\varepsilon_1 = 0$. В точке 2 наблюдается максимальная интенсивность приращения деформации. В промежутке точек 2-3 интенсивность деформации закономерно уменьшается и в точке 3 исходная деформация достигает минимума. В

целом на участке точек 1-3 радиус кривизны поверхностного слоя изменяется от $R_1 = \infty$ в точке 1, до $R_2 = \min$ в точке 2, с последующим увеличением до $R_3 = \min$ в точке 3. Кроме того, не требует доказательств факт, что на участке точек 1-3 поверхностные слои вплоть до нейтральной линии подвергаются деформации сжатия (со знаком «-»). При этом деформация поверхностного слоя максимальна, а во всех последующих слоях закономерно уменьшается и на нейтральной линии $\varepsilon_{н.л.} = 0$.

В точке 3 деформация загиба сменяется деформацией разгиба, который будет продолжаться до точки 6. Радиус кривизны в зоне разгиба от точки 3 до точки 5 будет уменьшаться до $R_5 = \min$, а на участке точек 5-6 вновь увеличиваться до $R_6 = \min$ в точке 6.

Схема разгиба на участке точек 3-6 предполагает, что продольная деформация сжатия (со знаком «-») на участке 1-3 в точке 3 будет заменена на деформацию растяжения (со знаком «+»).

На третьем участке траектории точек 6-8 реализуется деформация сжатия, которая на участке точек 6-7 нарастает, а на участке точек 7-8 уменьшается от максимального значения $R_7 = \min$ до $\varepsilon_8 = 0$.

На рис. 1,б представлен график изменения кривизны траектории материальных частиц, образующих поверхность слитка и перемещающихся в межроликовом промежутке. Основанием для построения такого графика является известная взаимосвязь траектории частицы

$$y = f(x) \quad (1)$$

и показателя ее кривизны [5]

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2 y}{dx^2}. \quad (2)$$

На следующем этапе (рис. 1,в) осуществляется переход от показателя кривизны к показателю относительной деформации ε

$$\varepsilon = \frac{h}{R}, \quad (3)$$

где h – расстояние от нейтральной линии NN изогнутой корки до исследуемого слоя.

В итоге все три кривые рис. 1 исчерпывающе характеризуют закономерности изменения деформированного состояния материальных частиц поверхностного слоя корки при выпучивании.

На рис. 2,а приведена конфигурация корки слитка в межроликовом промежутке, где поверхностный слой повторяет конфигурацию линии поверхности на рис. 1,а. Известные аксиомы механики сплошного тела позволяют построить плоскую схему деформированного состояния корки при выпучивании. Важной характеристикой плоской схемы

деформированного состояния корки является положение нейтральной линии NN в ее теле.

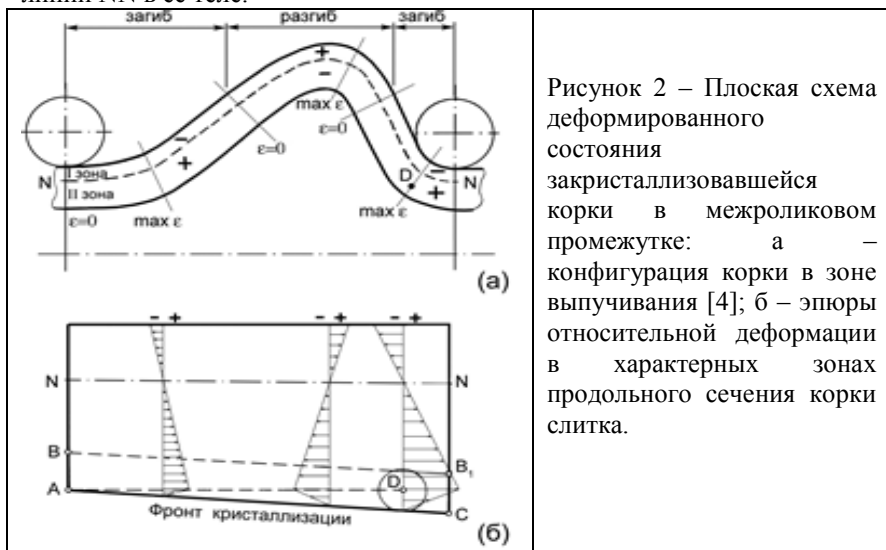


Рисунок 2 – Плоская схема деформированного состояния закристаллизовавшейся корки в межроликовом промежутке: а – конфигурация корки в зоне выпучивания [4]; б – эпюры относительной деформации в характерных зонах продольного сечения корки слитка.

Из схемы следует, что при выпучивании по высоте корки образуются две зоны, разделенные нейтральной линией, в каждой из которых материальные частицы в процессе перемещения по межроликовому промежутку подвергаются циклическому нагружению в такой последовательности:

I – сжатие (-); растяжение (+); сжатие (-),

II – растяжение (+); сжатие (-); растяжение (+).

Общепринято, что в рассматриваемом варианте нейтральная линия сдвинута к поверхности корки и ее расстояние от поверхности может быть представлено так:

$$S_{NN} = (0,25 \div 0,3) \cdot H, \quad (4)$$

где H – толщина корки.

Зона I расположена между нейтральной линией NN и линией поверхности, а зона II – между нейтральной линией NN и линией фронта кристаллизации.

Отметим важную особенность физической модели выпучивания. В пределах указанных зон, на каждом последующем участке уровень максимальной деформации выше, чем на предыдущем. Кроме того, максимальные значения относительной деформации в сопряженных участках во II зоне выше, чем в I зоне:

$$\left| \varepsilon_I^{\max} \right| < \left| \varepsilon_{II}^{\max} \right|. \quad (5)$$

Возвращаясь к условию Сен-Венана рассмотрим вторую его составляющую $[\varepsilon]$ – предельно допустимую относительную деформацию, превышение которой приводит к нарушению сплошности деформируемого тела (второе предельное состояние).

Из металловедения известно, что стали имеют несколько температурных интервалов, где пластичность их резко снижается. В нашем случае особое значение имеет высокотемпературный интервал хрупкости (обычно 1450-1370⁰С). На рис. 2,б зона высокотемпературного интервала хрупкости непосредственно примыкает к фронту кристаллизации и обозначена точками АВВ₁С. Из схемы рис. 2,б следует, что металл в точке D не только подвержен максимальной деформации, но и находится в зоне высокотемпературного интервала хрупкости. Таким образом для случая выпучивания условие Сен-Венана необходимо и достаточно проверить в объеме вокруг точки D:

$$\varepsilon_D \leq [\varepsilon_{ABV_1C}]. \quad (6)$$

Условие (6) может быть применено в расчетной части проектирования только при условии конкретизации методики определения компонентов, входящих в формулу. Если $[\varepsilon_{ABV_1C}]$ [] можно получить только в эксперименте (металловедение), то ε_D (механика сплошной среды) требует детального анализа схемы деформированного состояния корки на завершающем этапе выпучивания.

На рис. 3 показана схема взаимодействия корки с роликом рольганга на завершающем этапе выпучивания (3 зона). Главная информация рис. 3 состоит в том, что поверхность корки вступает в контакт с роликом рольганга до линии, соединяющей центры верхнего и нижнего роликов. Это означает, что на завершающем этапе выпучивания поверхность корки повторяет кривизну ролика рольганга

$$R_{\text{корка}} = R_{\text{рол}} , \quad (7)$$

где $R_{\text{корка}}$ – радиус кривизны поверхности корки слитка; $R_{\text{рол}}$ – радиус ролика рольганга.

Тогда в каждом межроликовом промежутке

$$\varepsilon_{i,\max} = \frac{h_i}{R_i} , \quad (8)$$

где h_i – расстояние от нейтральной линии до траектории «i» материальной частицы, образовавшейся на фронте кристаллизации на границе 2 и 3 зоны;

$R_i = R_{\text{рол}} + h_i$ – радиус кривизны траектории «i» материальной частицы в зоне контакта поверхности корки с роликом рольганга.

Значительно более сложным является процесс стыковки схемы деформированного состояния корки в конце предыдущего промежутка и начале следующего, где кривизна на поверхности корки изменяется, практически мгновенно, от $1/R_{\text{рол}}$ до $1/R = 0$.

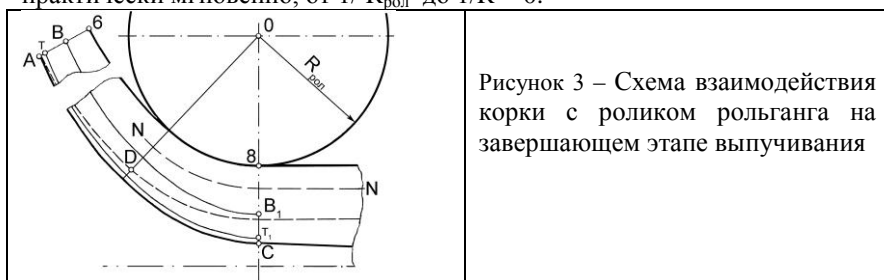


Рисунок 3 – Схема взаимодействия корки с роликом рольганга на завершающем этапе выпучивания

В теоретических разработках процесса выпучивания одним из дискуссионных вопросов является вопрос о величине и знаке продольной деформации в межроликовом промежутке. В качестве примера на рис. 4 приведен результат анализа деформированного состояния корки слитка в проекте фирмы Mannesmann-Demag для металлургического комбината в г. Караганда (Казахстан) [1]. На рис. 4,б приведены результаты расчетов отдельно для деформации от выпучивания и правки, а на рис. 4,а – суммарные деформации. В механике сплошной среды разрешается суммировать или вычитать показатели идентичных типов деформации, поэтому можно предположить, что авторы в данном случае оперировали с показателями продольной деформации.

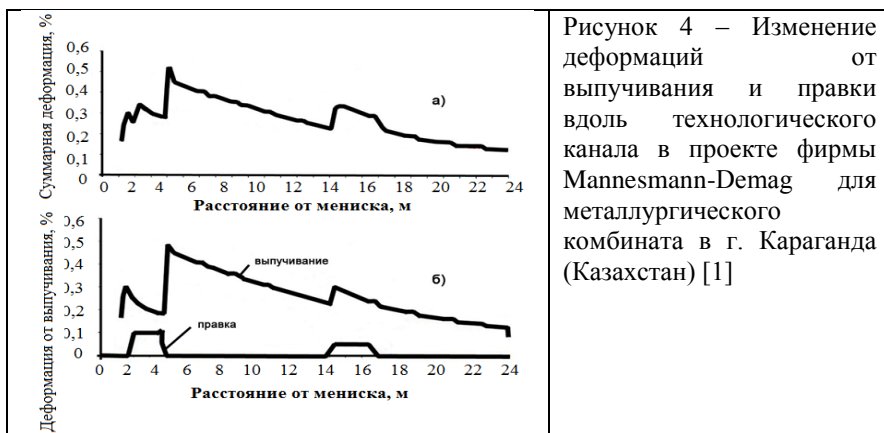


Рисунок 4 – Изменение деформаций от выпучивания и правки вдоль технологического канала в проекте фирмы Mannesmann-Demag для металлургического комбината в г. Караганда (Казахстан) [1]

Ранее (рис. 1 и 2) было показано, что при выпучивании деформация в пределах межроликового промежутка носит циклический характер. Причем деформация сжатия (растяжения) сменяется растяжением

(сжатием) и возвращается затем к сжатию (растяжению). Естественно возникает вопрос имеет ли место баланс величины продольной деформации в пределах межроликового промежутка при указанной цикличности видов деформации. Поскольку в пространстве положение корки на входе в очаг деформации выпучивания аналогичен ее положению в конце его, то можно предположить, что в каждом межроликовом промежутке деформации сжатия и растяжения сбалансированы и на выходе из межроликового промежутка показатель продольной деформации всех слоев корки равен нулю: $\sum \epsilon_{\text{прод}} = 0$.

Подобное представление деформированного состояния корки слитка при прохождении им технологического канала МНЛЗ надо признать ошибочным, что основано на вышеприведенном обосновании.

Выводы

1. Предложена новая физическая модель процесса выпучивания корки слитка в межроликовом промежутке. В основе модели использованы закономерности изменения деформированного состояния поверхности корки под действием ферростатического давления, зафиксированные в известных экспериментах на промышленной МНЛЗ.

2. Используемая в работе плоская схема деформирования позволили выявить особенности процесса выпучивания, влияющие на итоговые оценки показателей деформированного состояния корки слитка. Установлено, что корка испытывает циклическую знакопеременную деформацию в процессе перемещения ее по межроликовому промежутку. При этом величина показателя деформации и ее знак чередуется таким образом, что в конце промежутка они уравниваются.

3. Сконструированная физическая модель в сочетании с плоской схемой напряженно-деформированного состояния позволяют выявить в каждом из межроликовых промежутков зону максимальных величин показателя деформации растяжения и сравнить ее с предельно-допустимой. В случае необходимости следует скорректировать длину межроликового промежутка.

4. Анализ динамики изменения кривизны корки на завершающем этапе выпучивания позволил выявить значимые особенности этих изменений. Установлено, что поверхность корки вступает в контакт с поверхностью ролика до подхода к границе межроликового промежутка. Это обуславливает появление аномального участка с постоянной кривизной корки на завершающем этапе ее выпучивания.

5. Вторым аномальным участком деформации корки слитка является зона стыка корки предыдущего и последующего межроликового промежутка, где корка мгновенно изменяет свою кривизну с $1/R = \text{const}$ до $1/R = 0$, а следовательно $\epsilon = \text{max}$ «мгновенно» трансформируется в $\epsilon = 0$.

Бібліографічний список

1. Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П. Машины непрерывного литья заготовок. – Казань: Марат, – 2003. – 319 с.
2. Полецук В.М., Бровкин В.Л. Деформированное состояние непрерывнолитого слитка с жидкой сердцевинной на криволинейных МНЛЗ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. ИЧМ им. З.И. Некрасова НАН Украины, выпуск 30. – 2015. – С. 216-225.
3. Нисковский В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слывовых заготовок. – М.: Металлургия. – 1991. – 272 с.
4. Wunnenberg K., Dubendorf J. Strangausbauchung zwischen Stützrollen beim Stranggießen von Brammen // Stahl und Eisen. – 1978. – Vol. 98. – P. 254-259.
5. Пальмерс А., Этьен А., Миньон Ж. Расчет механических и термических напряжений в непрерывнолитой заготовке // Черные металлы. – 1979. – № 19. – С. 3-11.

Reference

1. Bulanov L.V., Korzunin L.G., Parfenov Ye.P. Mashiny nepreryvnogo lit'ya zagotovok. – Kazan': Marat, – 2003. – 319 s.
2. Poleshchuk V.M., Brovkin V.L. Deformirovannoye sostoyaniye nepreryvno-litogo slitka s zhidkoy serdtsevinoy na krivolineynykh MNLZ. Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. ICHM im. Z.I. Nekrasova NAN Ukrainy, vypusk 30. – 2015. – S. 216-225.
3. Niskovskiy V.M., Karlinskiy S.Ye., Berenov A.D. Mashiny nepreryvnogo lit'ya slyabovykh zagotovok. – M.: Metallurgiya. – 1991. – 272 s.
4. Wunnenberg K., Dubendorf J. Strangausbauchung zwischen Stützrollen beim Stranggießen von Brammen // Stahl und Eisen. – 1978. – Vol. 98. – P. 254-259.
5. Pal'mers A., Et'yen A., Min'on ZH. Raschet mekhanicheskikh i termicheskikh napryazheniy v nepreryvnolitoй zagotovke // Chernyye metally. – 1979. – № 19. – S. 3-11.

В. М. Полецук, В. Л. Бровкін

Схема напружено-деформованого стану безупинно-литого сляба в технологічній лінії МБЛЗ

Метою роботи є розробка моделі деформаційно-напруженого стану безперервнолітої заготовки з урахуванням її поведінки в лінії машини безперервного розливання. Запропоновано нову фізичну модель процесу випинання кірки злитка в межроліковом проміжку. В основі моделі використано закономірності зміни деформованого стану поверхні кірки під дією ферростатического тиску. Встановлено, що кірка відчуває циклічні знакозмінні деформації в процесі переміщення її по межроліковому проміжку. Показано, що поверхня кірки вступає в контакт з поверхнею ролика до підходу до кордону міжролікового проміжку. Це зумовлює появу аномальної ділянки з постійною кривизною кірки на завершальному етапі її випинання. Другою аномальною ділянкою

деформації кірки злитка є зона стику кірки попереднього і наступного межролікового проміжку, де кірка миттєво змінює свою кривизну. У поєднанні з плоскою схемою напружено-деформованого стану представлено фізичну модель, що дозволяє виявити в кожному з межролікових проміжків зону максимальних величин показника деформації розтягування. Виявлення зони максимальних величин деформації розтягування і порівняння її з гранично допустимими дозволяє визначити і скорегувати довжину межролікових проміжків машини безперервного розливання заготовок.

Ключові слова: машина безперервного розливання заготовки, безперервнолита заготовка, кривизна заготовки, деформований стан, фізична модель

V. M. Poleshchuk, V. L. Brovkin

Scheme of stressed-deformed condition of continuous-casted slab in technological casting lines

The aim of the work is to develop a model of the deformation-stressed state of a continuous-cast billet, taking into account its behavior in the continuous casting machine line. A new physical model of the ingot crust bending process in the inter-roller gap has been proposed. The model is based on the regularities of the change in the deformed state of the surface of the crust under the action of ferrostatic pressure. It is established that the crust undergoes a cyclic alternating deformation in the process of moving it across the inter-roller gap. It is shown that the surface of the crust comes into contact with the surface of the roller before approaching the inter-roller gap. This causes the appearance of an anomalous area with a constant curvature of the crust at the final stage of its buckling. The second anomalous deformation zone of the ingot crust is the junction zone of the previous crust and the subsequent inter-roller gap, where the crust instantly changes its curvature. In combination with the flat scheme of the stress-strain state, a physical model is presented, which makes it possible to identify in each of the inter-roller gaps the zone of maximum values of the tensile strain rate. Identifying the zone of maximum values of the tensile strain indicator and comparing it with the maximum allowable one allows determining and correcting the length of the inter-roller gaps of the continuous casting machine.

Key words: billet continuous casting machine, continuously cast billet, billet curvature, deformed state, physical model

*Статья поступила в редакцию сборника 01.11.2018 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)
Рецензенты: к.т.н. А.В.Ашкелянец, д.т.н. С.А.Воробей, к.т.н. К.В.Баюл*