

УДК 621.82:669-147

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-11>

**Полещук Валентин Михайлович**, кандидат технічних наук, виконавчий директор, Асоціація наукових і проектно-конструкторських організацій гірничо-металургійного комплексу України, Дніпро. ORCID: 0000-0002-5906-6042

**Бровкін Володимир Леонідович**, кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, Дніпро. ORCID: 0000-0002-2925-7091

**Радченко Юрій Миколайович**, кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, Дніпро. ORCID: 0000-0002-5055-6707

**Воробьова Лілія Олександрівна**, кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, Дніпро. ORCID: 0000-0003-3729-5140

### ДВОВИМІРНА ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРАВЛЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОГО СЛЯБА КРИВОЛІНІЙНОЇ МБЛЗ

Виконано аналіз схем деформованого стану безперервнолитого зливка під час його переміщення технологічним каналом криволінійних машин безперервного литва заготовок (МБЛЗ). Запропоновано плоску схему деформованого стану кірочки достатньо широкого сляба за наявності рідкої серцевини. Проаналізовано два випадки: з прямолінійним кристалізатором і з радіальним кристалізатором. Наведено формули для розрахунків критичної деформації для зазначених випадків. Результати роботи можна використовувати для створення інженерної методики теплового та механічного розрахунку технологічного каналу криволінійної МБЛЗ.

Ключові слова: безперервне розливання, технологічний канал, фізична модель, деформація правлення, плоска схема, інтервал крихкості, фронт кристалізації, загин, розгин, порушення суцільності

*Вступ.* Під час проектування МБЛЗ і розробки технологічних режимів основою для ухвалення вирішення є вибрана конструкторами та технологами фізична модель деформованого стану безперервнолитого сляба за проходженням ним технологічного каналу. Основну масу публікацій присвячено різним аспектам теорії та практики безперервного розливання у плані забезпечення необхідної якості готової продукції. В той же час, складність об'єкту дослідження та зумовлені цим, спрощення фізичної моделі деформованого стану неперервнолитого зливка призводять до зниження якості одержаних результатів, а у деяких випадках до спотворення фізичної моделі процесу [1-4].

Так, у публікації ПО «Уралмаш» [2] відзначається, що « результати розрахунків . показують широкий розкид значень прогину кірки (відмінність в 50...100 разів) для одних і тих же початкових даних». Іншим свідченням низького рівня фізичних моделей деформованого стану, що традиційно використовують, є значна кількість емпіричних формул для оцінювання впливу на якість готової продукції різних чинників, зумовлених конструктивними рішеннями або технологічними параметрами [3].

Узагальнюючи значну частину накопиченого дослідниками досвіду побудови фізичної моделі деформованого стану безперервнолитого зливка, що частково закристалізовувався, за проходженням ним криволінійній частині технологічного каналу МБЛЗ можна припустити, що головною причиною низького рівня відповідності результатів моделювання практичним результатам є невідповідність вибраної моделі реальному процесу [1].

Для механіки суцільного середовища розрізняють три схеми фізичної моделі деформованого стану об'єкту, що досліджують: лінійну, плоску та об'ємну [5]. За переважної більшості фізична модель процесу деформування безперервнолитого зливка в технологічному каналі МБЛЗ побудовано за лінійною схемою. При цьому як домінуючу лінію дослідники призначають лінію поверхні кірки або, найчастіше, лінію фронту кристалізації

[2,3,6,7]. Слід відмітити, що ні в одній з публікацій немає обґрунтування легітимності вибирання лінійної схеми деформованого стану під час аналізу варіантів конструкторських вирішень технологічного каналу МБЛЗ.

*Мета роботи.* Кінцевою метою даної роботи є виявлення в суцільному тілі безперервнолитого зливка критичних зон, де інтенсивність деформації є близькою або перевищує характеристики його другого граничного стану (умова Сен-Венана):

$$\varepsilon \leq [\varepsilon], \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – значення відносної деформації матеріальної частки, що досліджують;  $[\varepsilon]$  – показник граничної пластичності матеріалу, що деформується.

*Методика виконання досліджень деформованого стану зливка.* Для опису й аналізу деформованого стану зливка за його переміщенням технологічним каналом криволінійної МБЛЗ використовуємо аналітичний апарат механіки суцільного середовища, де базовими є [5]:

- феноменологічний підхід, який припускає, що всяке суцільне тіло складається з матеріальних часток, що зберігають його основні властивості;
- опис деформації суцільного середовища у переміщеннях матеріальних часток, не удаючись до припущення про їх мализну;
- використання понять про перший і другий граничний стан під час оцінювання інтенсивності деформованого стану та здатності дослідженого матеріалу деформуватися без порушення суцільності;
- використання як показник величини деформації «показника Коши», що не має властивості адитивності.

Для виявлення оптимального варіанту схеми деформованого стану для фізичної моделі правлення достатньо звернутися до умови Сен-Венана. Дійсно, положення шуканої зони деформації, де висока інтенсивність деформації поєднується з низькою здатністю металу пластично деформуватися без руйнування, співпадає з положенням подовжньої площини, що є перпендикулярною до поверхні великої грані сляба. Логічне обґрунтування цьому положенню наведено у багатьох публікаціях [2,3].

Таким чином, під час побудови фізичної моделі правлення виходитимемо із змінювання конфігурації траєкторій матеріальних часток, що утворилися на фронті кристалізації та переміщуються індивідуальними траєкторіями в площині, яка є перпендикулярною до великої грані сляба у середині її ширини. Фронт кристалізації є умовною лінією, що проходить на межі між рідкою та твердою субстанціями сталі на початковий період переміщення сляба траєкторією технологічного каналу. Збільшення товщини кірки за часом відбувається під час охолодження кірки. Показник значення відносної деформації кожної  $i$ -ої матеріальної частки на момент її фіксації на лінії фронту кристалізації дорівнює нулю  $\varepsilon = 0$ . Окрім того, кожна матеріальна частка відповідно до феноменологічного підходу має свою індивідуальну траєкторію переміщення у вибраній системі координат, що є характерною для кожної схеми деформації.

Підсумовуючи все наведене вище можна укласти, що деформація матеріальних часток, що утворюють кірку сляба, відбувається поза лінією фронту кристалізації, а використання моделі осередка деформації з лінією фронту кристалізації, як основного об'єкту дослідження, є неправомірним.

Іншою, суперечливою, з точки зору основ механіки суцільного середовища, фізичною моделлю процесу правлення є модель, де єдиний процес вигину кірок подано у вигляді окремих, незалежних процесів, межі між якими проходять лінією зіткнення поверхні сляба з роликками рольгангов [2,3,6].

Нелегітимність подібної фізичної моделі є очевидною у зв'язку з особливими властивостями формули Коши:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}, \quad (2)$$

де  $L$  – поточне значення розміру елемента, що деформується;  $L_0$  – початкова величина розміру елемента, якого деформують.

Відомо, що показник інтенсивності деформованого стану Коши не має властивості адитивності, а тому розбиття єдиного процесу деформації на декілька етапів з наступним підсумовуванням часткових результатів не може бути визнано легітимним [5].

Відповідно до наведеної вище мети данного дослідження та критичних зауважень щодо формування фізичної моделі деформованого стану зливка під час розливання, перейдемо до опису плоскої схеми деформованого стану затверділого металу під час правлення, а надалі, і під час випинання. Правлення зумовлено змінюванням кривизни технологічного каналу, а випинання – дією ферростатического тиску рідкої сталі на внутрішню поверхню кірок сляба.

За класифікацією прийнятою у механіці суцільного середовища як правлення, так і випинання відносять до одного виду деформації, а саме – до вигину. Правлення реалізують у вигляді двох, наступних один за одним, видів вигину (загину та розгину) за прямолінійним кристалізатором і деформації розгину – за радіальним кристалізатором. Структура випинання є складнішою та вміщує три цикли вигину від моменту входу до мікроликового проміжку до моменту виходу з нього.

Суттєвою відмінністю процесу вигину під час правлення та випинання є положення нейтральної лінії у тілі зливка. За правленням нейтральна лінія розташована в середині товщини зливка, а за випинанням на відстані  $\sim 25...30\%$  від поверхні кірки.

Значущим елементом фізичної моделі деформації під час правлення та випинання є знак деформації, який за лінійної схеми не може бути представленим. Знак «+» присвоєно для деформації розтягування, а знак «-» – для деформації стискування. Небезпечними, з точки зору створення тріщин є деформації розтягування (знак «+»).

*Методика дослідження деформації правлення.* Послідовно розглянемо особливості розвитку деформованого стану кірок безперервнолитого зливка під час правлення у процесі проходження технологічного каналу криволінійної МБЛЗ. Схему розташування осередків деформації правлення за довжиною технологічного каналу криволінійної МБЛЗ подано на рис. 1.

Наведена фізична модель процесу правлення є плоскою схемою деформованого стану кірок досить широкого сляба у подовжньо-вертикальній площині, що проходить на середині його ширини. Фізична модель складається з двох кірок, які закристалізувалися, розділених рідкою серцевиною, деформація яких визначається конфігурацією технологічного каналу МБЛЗ. На початку та в кінці криволінійної частини технологічного каналу сляб має прямолінійну форму (ділянки I і V). У криволінійній частині обидві кірки піддаються пластичній деформації загибу та розгину (ділянки II і IV). У проміжку між криволінійними ділянками розташовується ділянка III, де кривизна кірок залишається незмінною а, відповідно, відносна деформація кожної  $i$ -ої матеріальної частки, що осіла на лінії фронту кристалізації до входу кірки в ділянку III є постійною

$$\varepsilon_i = \text{const} . \quad (3)$$

Сеттевою характеристикою деформованого стану кірок на ділянці технологічного каналу II є знак деформації вигину. Так, кірка з поверхнею більшої кривизни  $ABA_1B_1$  є схильною до деформації стискування (знак «-»), а кірка, що є протилежною до неї, з поверхнею меншої кривизни  $CDC_1D_1$  – деформації розтягування (знак «+»). Нейтральна лінія правки  $N_nN_n$  розташована на середині товщини сляба  $h_n = 0,5H$ , незалежно від відстані до кристалізатора.

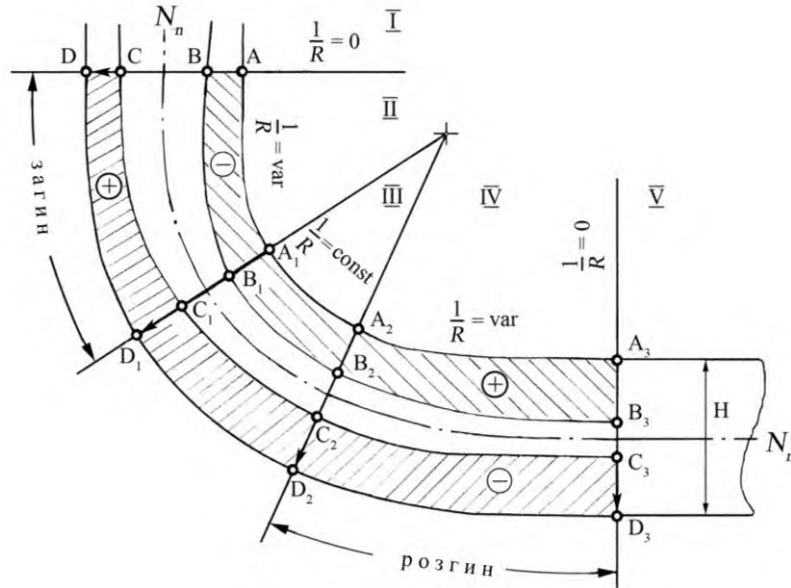
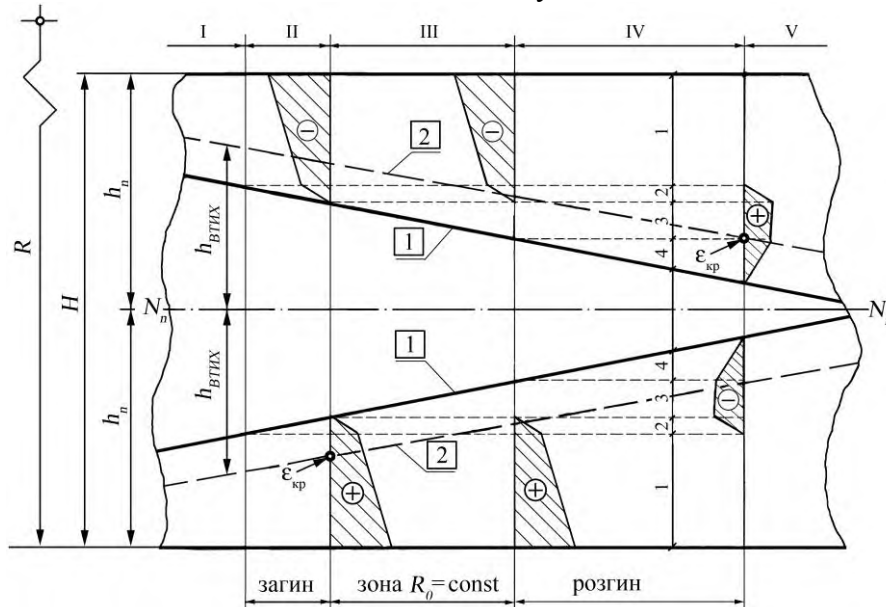


Рисунок 1 – Схема розташування осередків деформації правлення технологічним каналом криволінійної МБЛЗ з прямолінійним кристалізатором

По суті деформаційних процесів, що відбуваються на ділянці II, він є осередком деформації загибу. Аналогічно ділянка IV є осередком деформації розгину. У осередку деформації розгину знак деформації відповідної кірки зворотний тому, який був у осередку деформації загибу. Це означає що кірка більшої кривизни (тобто кірка з боку меншого радіусу), яка у осередку деформації загибу піддавалася стискуванню, в осередку деформації розгину піддається розтягуванню. Відповідно в кірці меншої кривизни деформація розтягування у осередку деформації загибу (II ділянка) змінюється в осередку деформації розгину стискуванням (IV ділянка). Наведений опис трансформації деформованого стану кірок є неповним, оскільки не враховує змінювання товщини кірок під час проходження ними криволінійної частини технологічного каналу.

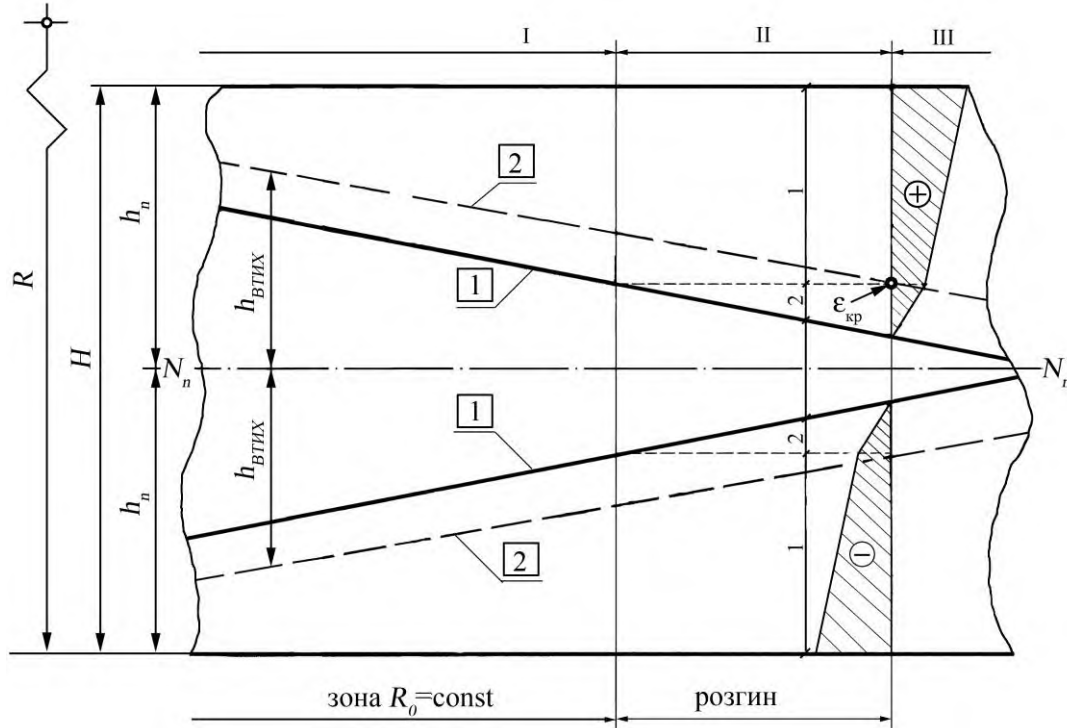


1 - межа фронту кристалізації; 2 - межа ВТИХ (низькотемпературна межа високотемпературного інтервалу крихкості)

Рисунок 2 – Фізична модель деформованого стану кірок сляба під час переміщення технологічним каналом МБЛЗ з прямолінійним кристалізатором

На рис. 2 і 3 наведено динаміку змінювання епюр величини відносної деформації матеріальних часток, що утворюють кірки, з урахуванням збільшення товщини кірки на ділянках II, III, IV з прямолінійним і радіальним кристалізаторами.

Вважаємо, що потрібно особливу увагу приділити аналізу обчислення підсумкового значення показника деформації матеріальних часток обох кірок на лінії сполучення криволінійної та прямолінійної частини технологічного каналу (ділянки IV - V на рис. 2 і ділянки II - III на рис. 3).



1 - межа фронту кристалізації; 2 - межа ВТИХ (низькотемпературна межа високотемпературного інтервалу крихкості)

Рисунок 3 – Фізична модель деформованого стану кірок сляба під час переміщення технологічним каналом МБЛЗ з радіальним кристалізатором:

З рис. 2 витікає, що за висотою кірки можна виділити чотири рівні матеріальні частки (1-4), які відрізняються за часом виникнення їх на лінії фронту кристалізації, а отже і за історією їх деформації. Так матеріальні частки рівня 1 осіли на фронті кристалізації до лінії входу до осередка деформації загину. Підсумкове значення їх деформації на лінії виходу з осередка деформації загину закономірно зменшується у міру збільшення відстані від траєкторії  $i$ -х матеріальних часток до поверхні кірки:

$$\varepsilon_i = \frac{h_i}{R_i}, \quad (4)$$

де  $h_i$  – відстань від нейтральної лінії  $N_n N_n$  до траєкторії  $i$ -ої матеріальної частки;  $R_i$  – радіус траєкторії  $i$ -ої матеріальної частки на виході з осередка деформації загину.

Знак деформації у кірки більшої кривизни («-» стискування), у кірки меншої кривизни («+» розтягування) на виході з осередку деформації загину:

$$\varepsilon_i = \frac{\pm h_i}{(R_0 - h_n) \pm h_i}, \quad (5)$$

де  $R_0$  – базовий радіус МБЛЗ, в цій роботі віднесений до зовнішньої поверхні сляба (радіус меншої кривизни);  $h_n$  – половина товщини сляба;  $h_i$  – відстань від нейтральної лінії  $N_nN_n$  до траєкторії  $i$ -ої матеріальної частки.

З рис. 2 витікає, що матеріальні частки рівня 2 з'явилися у складі кірки під час проходження кірки осередком деформації загину і мають різну тривалість деформації. Абсолютна величина деформації часток рівня 2 зменшується від мінімального значення рівня 1 до нуля у матеріальній частки, що утворилася на перетині кордону ділянки II і лінії фронту кристалізації.

На всьому протязі ділянки III значення деформації всіх матеріальних часток 1 і 2 рівнів залишається незмінним, а матеріальних часток, що утворилися на рівні 3 – дорівнює нулю.

На завершуючому етапі проходження криволінійної частини технологчного каналу (ділянка IV) кірки зливка піддаються складній деформації, зумовленої збільшенням товщини кірок і поєднанням в єдиному процесі деформацій різних знаків «+» і «-».

Як результат, на рівні 1 у кінці ділянки IV у кірці більшої кривизни деформація розтягування повністю компенсує деформацію стискування, зафіксовану у кінці ділянки II. Максимальне значення величини підсумкової деформації розтягування, – на стику криволінійної і прямолінійної частини технологічного каналу, – фіксується на межі 2 і 3 рівнів.

Динаміка змінювання інтенсивності деформації у кірці меншої кривизни є аналогічною динаміці в кірці більшої кривизни. Проте на всіх етапах деформації кірки меншої кривизни знак деформації є зворотним знаку деформації кірки більшої кривизни.

Аналіз плоскої схеми деформованого стану під час правлення на МБЛЗ з прямолінійним кристалізатором дозволяє виділити дві критичні зони дії деформації розтягування, де ймовірність порушення суцільності кірок є максимальною. У кірці більшої кривизни критична ситуація є можливою у кінці IV ділянки в районі межі рівнів 3 і 4, якщо траєкторії матеріальних часток проходять у зоні високотемпературного інтервалу крихкості (ВТИХ). Аналогічна ситуація складається і в кірці меншої кривизни, але у кінці II ділянки на рівнях 1 і 2, де траєкторії матеріальних часток проходять у зоні ВТИХ (рис. 2).

Під час аналізу деформованого стану кірок зливка в технологічному каналі з радіальним кристалізатором слід враховувати змінювання у формі криволінійної частини технологічного каналу, де відсутньою є ділянка загину (рис. 3). В цьому разі критична ситуація, зумовлена деформацією розтягування, можлива тільки на виході з осередку деформації розгину в точці перетину лінії виходу з осередку деформації з лінією низькотемпературної межі ВТИХ.

Значення показника відносної деформації у критичних зонах можна визначити, наслідуючи принципи механіки суцільного середовища та схеми на рис. 2 і 3.

Для технологічного каналу з прямолінійним кристалізатором (рис. 2) показник відносної деформації розтягування (+) у критичних зонах ВТИХ на межі II і III ділянок (з боку затверділої кірки більшого радіусу) можна обчислити за формулою (4):

$$\varepsilon_{кр,1}^{прямой} = \frac{h_{ВТИХ}}{(R_0 - h_n) + h_{ВТИХ}}, \quad (6)$$

де  $h_{ВТИХ}$  – відстань від нейтральної лінії  $N_nN_n$  до низькотемпературної межі ВТИХ в кірці на межі II і III ділянок;  $h_n$  – половина товщини сляба.

Аналогічно визначається відносна деформація розтягування (+) в критичній зоні ВТИХ на межі IV і V ділянок (з боку затверділої кірки меншого радіусу)

$$\varepsilon_{кр,1}^{прямой} = \frac{h_{ВТИХ}}{(R_0 - h_n) - h_{ВТИХ}}, \quad (7)$$

де  $h_{ВТИХ}$  – відстань від нейтральної лінії  $N_n N_n$  до низькотемпературної межі ВТИХ у кірці більшої кривизни на межі IV і V ділянок.

Керуючись тими ж принципами для технологічного каналу з радіальним кристалізатором (рис. 3) показник відносної деформації в критичній зоні ВТИХ осередку деформації розгину на межі II і III ділянок (з боку затверділої кірки меншого радіусу) можна вчислити за тією же формулою (7)

$$\varepsilon_{кр.1}^{радиал} = \frac{h_{ВТИХ}}{(R_0 - h_n) - h_{ВТИХ}}, \quad (8)$$

де  $h_{ВТИХ}$  – відстань від нейтральної лінії  $N_n N_n$  до низькотемпературної межі ВТИХ в кірці більшої кривизни на межі II і III ділянок (рис. 3).

Найбільш висока ймовірність порушення суцільності тіла кірок спостерігається на тих критичних ділянках, де значення деформації розтягування в межах високотемпературного інтервалу крихкості (ВТИХ) перевищує гранично допустиму величину.

#### Висновки.

1. Запропоновано двовимірну схему моделі деформованого стану частин (кірок) сляба, які закристалізувалися, що переміщується криволінійним технологічним каналом МНЛЗ, де розглядають деформація правлення у двох варіантах: з прямолінійним і радіальним кристалізаторами.

2. Деформація правлення в кінці криволінійної ділянки технологічного каналу з прямолінійним кристалізатором є урівноваженою тільки в тій частині кірки, яка утворилася до входу в криволінійну ділянку технологічного каналу. Подовжня деформація часток, що утворилися в процесі переміщення зливка щодо криволінійної частини технологічного каналу, не урівноважена частково або повністю та залишається в тілі зливка.

3. Деформація правлення у технологічному каналі з радіальним кристалізатором зумовлена розгином зливка під час переходу його до прямолінійної зони. У такому варіанті деформації розтягування піддається тільки кірка більшої кривизни, а місце можливого порушення суцільності кірки знаходиться на перетині ліній виходу з осередку деформації розгину та межі високотемпературного інтервалу крихкості (ВТИХ).

#### Библиографический список

1. Полещук В. М., Бровкин В. Л., Мушенков Ю. А. Анализ физических моделей процесса разгиба слитка в криволинейных МНЛЗ *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 1. С. 45–51.
2. Карлинский С. Е., Денисов Ю. В. Определение деформации корки непрерывнолитых слябов в роликковой зоне МНЛЗ *Сталь*. 1986. № 8. С. 21-24.
3. Буланов Л. В., Корзунин Л. Г., Парфенов Е. П. Машины непрерывного литья заготовок. Казань : Марат, 2003. 319 с.
4. Нисковских В. М., Карлинский С. Е., Беренов А. Д. Машины непрерывного литья слябовых заготовок. Москва : Metallurgiya, 1991. 271 с.
5. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением. Харьков : Вища школа, 1981. 248 с.
6. Смирнов А. Н., Гридин С. В., Белобров Ю. Н. Расчет параметров загиба и разгиба непрерывнолитой заготовки для МНЛЗ различной конструкции. *Металл и литье Украины*. 2002. № 12. С. 7-10.
7. Бровман М. Я., Суринов Е. В., Грузин В. Г. Энергосиловые параметры установок непрерывной разливки металлов /. Москва : Metallurgiya, 1969. 280 с.

#### References

1. Polyeshchuk V. M., Brovkin V. L., Mushenkov Yu. A. Analiz fizicheskikh modeley protsessa razgiba slitka v krivolineynykh MNLZ *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2014. no. 1.

pp. 45-51.

2. Karlinskiy S. E., Denisov Yu. V. Opredelenie deformatsii korki nepreryvnolytykh slyabov v rolikovoy zone MNLZ. *Stal'*. 1986. no. 8. pp. 21-24.
3. Bulanov L. V., Korzunin L. G., Parfenov E. P. Mashiny nepreryvnogo lit'ta zagotovok / Kazan' : Marat, 2003. 319 p.
4. Niskovskikh V. M., Karlinskiy S. E., Berenov A. D. Masiny nepreryvnogo lit'ya slyabovykh zagotovok. Moskva : Metallurgiya, 1991. 271 p.
5. Evstratov V. A. Teoriya obrabotki metallov davlniem. Khar'kov : Vyshcha shkola, 1981. 248 p.
6. Smirnov A. N., Gridin S. V., Belobrov Yu. N. Raschet parametrov zagiba i izgiba nepreryvnolitoi zagonovki dlya MNLZ razlichnoy konstruktsii *Mtall i lit'ye Ukrainy*. 2002. no. 12. pp. 7-10.
7. Brovman M. Ya., Surin E. V., Gruzin V. G. Enegosilovye parametry ustanovok nepreryvnoy razlivki metallov, Moskva : Metallurgiya, 1969. 280 p.

**Polyeshchuk Valentin**, executive director, candidate of technical sciences, association of scientific and design organizations of the mining and metallurgical complex of Ukraine, Dnipro.

**Brovkin Vladimir**, associate professor, candidate of technical sciences, National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro.

**Radchenko Yuriy**, associate professor, candidate of technical sciences, national metallurgical academy of Ukraine, Dnipro.

**Vorobiova Liliia**, associate professor, candidate of technical sciences, national metallurgical academy of Ukraine, Dnipro.

## TWO-DIMENSIONAL PHYSICAL MODEL OF CURVED CCM CONTINUOUSLY CAST SLAB FLATTENING

Linear configurations of the deformed state of a continuously cast ingot at its movement along a process channel of curved continuous-casting machines (CCMs) were analyzed. The illegitimacy of the majority of assumptions applied in the development of the physical model of deformation for a solidified crust of an ingot was demonstrated. The peculiarities of deformed state development in the solid ingot crust in all sections of the curved part of the process channel were reviewed. A two-dimensional configuration of deformed ingot crust state at flattening is proposed. The configuration is based on basic positions of continuous medium mechanics. It is shown that the two-dimensional configuration adequately shows the peculiarities of the deformed ingot crust state in the sections of maximum deformation at flattening. The physical model considers two surface crusts of a sufficiently wide slab that are separated by a liquid core. The deformation of the crusts is determined by the configuration of the CCM process channel. Two cases are analyzed in the paper: with a straight mould and with a curved mould. Formulas for calculating the ultimate deformation are given for these two cases. The locations of the sections of maximum tensile deformation caused by flattening at slab movement along the process channel of curved CCMs have been determined. Two critical sections of possible ingot fracture have been identified in a CCM with a straight mould. One critical section has been identified in a CCM with a curved mould. The results of work can be applied to develop the engineering practice of thermal and mechanical design of the process channel of a curved CCM.

Стаття надійшла: 17.09.2020 р.