

УДК 621.7

Андросенко М.В., Кенарь Е.В., Тютеряков Н.Ш., Усатая Т.В., Дерябина Л.В.

## АЛГОРИТМ РАСЧЁТА И СОСТОЯНИЯ ФОРМИРУЕМОЙ ЗАГОТОВКИ НА МАШИНЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

**Аннотация.** В работе представлена методика расчета усилий, действующих на стенки кристаллизатора и ролики подвешенного роликового блока зоны вторичного охлаждения сортовой машины непрерывного литья заготовки, на основе анализа взаимодействия формируемой заготовки, кристаллизатора и элементов подвесной роликовой проводки.

**Ключевые слова:** МНЛЗ, непрерывная разливка, заготовка, корочка заготовки, кристаллизатор, роликовая проводка, ЗВО.

### Введение

Современная технология непрерывной разливки предусматривает разливку без прекращения процесса вытягивания заготовки, при этом производится замена разливаемого сталковша с расплавом на наполненный сталковш.

Это возможно при применении подъемно-поворотного стенда для сталковша и тележки для промковша с механизмом подъема и передвижения. Принципиальные схемы непрерывной разливки отличаются положением продольной технологической оси кристаллизующегося слитка, однако основы технологии разливки являются общими для всех типов машин. Схема установки непрерывного литья представлена на рис. 1.

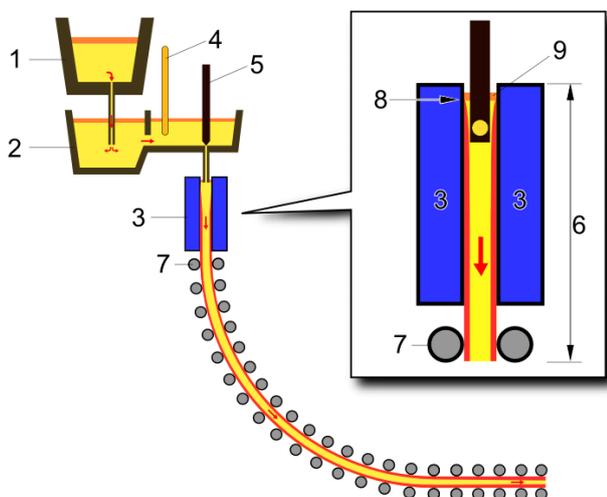


Рис. 1. Схема установки непрерывного литья:

- 1 – ковш подачи жидкого металла;
- 2 – промежуточный ковш; 3 – кристаллизатор;
- 4 – заслонка; 5 – стопор; 6 – зона кристаллизации;
- 7 – ролики ЗВО; 8 – зона начала кристаллизации;
- 9 – подача охлаждающей воды

Длина кристаллизатора зависит от сечения разливаемых слитков и в общем случае может изменять-

ся от 300 до 1500 мм. Для заготовок мелких сечений иногда применяются кристаллизаторы длиной до 100 мм, при отливке заготовок крупных сечений применяются кристаллизаторы длиной от 500 до 1100–1200 мм.

Технологическая линия принимает в кристаллизатор жидкую сталь с температурой  $t = 1560\text{--}1580^\circ\text{C}$ . При этом у жидкой стали отбирается большое количество теплоты, которая через воду и воздух в конечном счете рассеивается в окружающую среду. При плотном контакте в верхней части кристаллизатора температура поверхности корочки падает до  $600\text{--}900^\circ\text{C}$ , а затем после образования зазора повышается, и на выходе из кристаллизатора, примерно за 20 мин, температура поверхности корочки составляет величину  $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$  при средней температуре корочки  $1300\text{--}1350^\circ\text{C}$ . Максимальная температура медных стенок кристаллизатора на стороне жидкого металла может достигать  $200\text{--}240^\circ\text{C}$ .

Прочность такой корочки достаточна, чтобы противостоять силам трения и действию ферростатического давления жидкого металла.

В конце зоны вторичного охлаждения температура поверхности слитка снижается до уровня  $800\text{--}900^\circ\text{C}$ . Если принять температуру кристаллизации  $t_{кр}$  для большинства сталей  $\sim 1500^\circ\text{C}$ , то в промежуточный ковш сталь должна поступать с небольшим перегревом. Обычно температура стали в промковше поддерживается на уровне  $1540\text{--}1560^\circ\text{C}$ , что обеспечивает удовлетворительное качество поверхности слитков и стабильность процесса разливки. Однако с повышением температуры металла более  $1570^\circ\text{C}$  возрастает пораженность слитков наружными продольными и поперечными трещинами.

Для обеспечения стабильности процесса разливки температура металла в кристаллизаторе должна быть на  $15\text{--}20^\circ\text{C}$  выше температуры затвердевания, а по условиям качества слитка перегрев  $dt$  должен быть не более  $30^\circ\text{C}$ .

Повышение интенсивности охлаждения слитка способствует увеличению скорости разливки, но ограничивается возможностью появления трещин вследствие возрастания термических напряжений. С увеличением скорости разливки увеличивается глу-

бина жидкой лунки  $L_{ж}$  и, как следствие, возрастает ферростатическое давление на оболочку слитка, что представляет даже большую опасность, чем термические напряжения.

Скорость вытягивания слитка, затвердевания и глубина жидкой фазы являются важнейшими технологическими параметрами процесса непрерывной разливки стали. Одна из главных задач для технологов – установление взаимосвязи длины жидкой фазы (или глубины жидкой лунки)  $L_{ж}$  от скорости разливки  $v$ , интенсивности охлаждения и марки стали (ее физических свойств). Величина  $L_{ж}$  при заданной скорости разливки определяет протяженность зоны вторичного охлаждения и всю высоту или технологическую длину установки.

Конструкция головной части кристаллизатора и ЗВО сортовой МНЛЗ ЭСПЦ ПАО «ММК» показана на рис. 2.

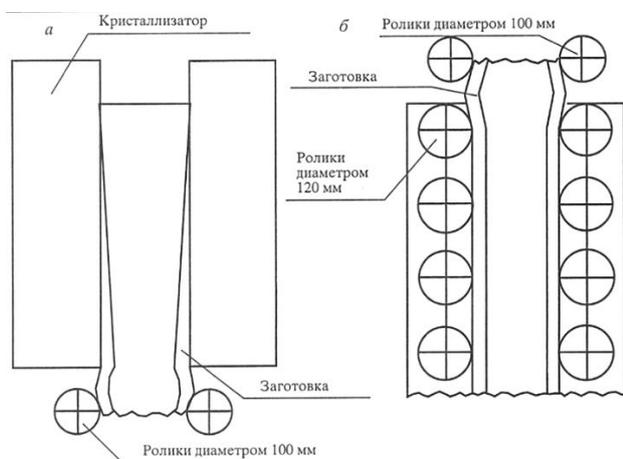


Рис. 2. Конструкция головной части кристаллизатора и ЗВО сортовой МНЛЗ ЭСПЦ ПАО «ММК»

Скорость непрерывной разливки лимитируется рядом ограничений:

- напряжениями вдоль непрерывного слитка, обусловленными силами трения в кристаллизаторе;
- напряжениями, возникающими вследствие ферростатического давления;
- термическими напряжениями, которые возрастают с ростом интенсивности охлаждения слитка.

Скорость вытягивания заготовки, количество подаваемой воды на первичное и вторичное охлаждение, ход и частота качания кристаллизатора являются регулируемыми параметрами, что позволяет разливать широкий сортамент сталей: от мало- до высокоуглеродистых и легированных марок сталей.

От прочности образовавшейся корочки и заготовки, находящейся в двухфазном состоянии (твёрдое–жидкое) под кристаллизатором, зависит скорость разливки (вытягивания). Для слэбов больших сечений реально достигнуты скорости разливки в пределах 1,5–2,0 м/мин. Для заготовки сечением 100 × 100 мм оказалась удовлетворительной скорость 6 м/мин, а

для заготовки сечением 150 × 150 мм в зависимости от состава стали достигнуты скорости разливки в пределах 3,0–3,5 м/мин.

Для обеспечения высокой производительности применяют многоручьевые машины с независимым управлением каждого ручья и объединённые единым промковшом.

Мощность и размеры машины определяются емкостью стальной ванны, которая на практике имеет значение от 12 до 350 т.

Технологический радиус на основании теоретических исследований и практических данных определяется из соотношения

$$R = 40b, \quad (1)$$

где  $b$  – толщина заготовки.

На МНЛЗ происходит превращение металла из жидкой фазы в металл твёрдой фазы.

Пока заготовка полностью не затвердеет, непрерывнолитой слиток находится в двухфазном состоянии. Тело, сформированное в этом слитке жидкой фазой, называют лункой.

Длина жидкой лунки (фазы)  $L_{ж}$ , м, определяется по следующим формулам:

а) для сортовой разливаемой заготовки

$$L_{ж} = Kb^2 V_p, \quad (2)$$

где  $K$  – эмпирический коэффициент (коэффициент затвердевания), мм/мин<sup>0.5</sup>;  $b$  – толщина заготовки, мм;  $V_p$  – скорость разливки (вытягивания заготовки), м/мин.

- $K = 24,0$  мм/мин<sup>0.5</sup> – для сортовой заготовки;
- $K = 27,4$  мм/мин<sup>0.5</sup> – для низкоуглеродистой стали;
- $K = 26,5$  мм/мин<sup>0.5</sup> – для высокоуглеродистой стали;
- $K = 29,12$  мм/мин<sup>0.5</sup> – для блюма из среднеуглеродистой стали;

б) для слэбовой разливки

$$L_{ж} = V_p \cdot t_{затв}, \quad (3)$$

где  $t_{затв}$  – время полного затвердевания, мин.

$$t_{затв} = \{(b/2) \cdot (L/K)\}^2.$$

Толщина корочки в процессе непрерывной разливки изменяется от 0 до  $b/2$ , а длина жидкой фазы  $L_{ж}$  увеличивается с увеличением скорости разливки.

Чтобы центрировать грани слитка относительно оси машины и предохранить их от выпучивания под действием ферростатического давления, в МНЛЗ устанавливается поддерживающая система различной конструкции. На МНЛЗ ПАО «ММК» используется роликовая поддерживающая система.

Зона вторичного охлаждения (ЗВО) располагается на технологической линии от кристаллизатора до тянущих валков и занимает от 30 до 100 % длины этой линии. ЗВО обычно примыкает вплотную к кристаллизатору. В редких случаях допускается продолжение ЗВО за тянущими валками. За зоной вторично-

го охлаждения располагается зона охлаждения слитка на воздухе.

Наиболее уязвимым местом по прочности является место выхода слитка из кристаллизатора, это связано с тем, что на выходе пропадает опора от стенок кристаллизатора, воспринимающих давление жидкого металла внутри слитка, через закристаллизовавшуюся корочку. Минимально допустимая толщина корочки на выходе из кристаллизатора в зависимости от сечения заготовки составляет 10–25 мм.

Корочка слитка освобождается от поддержки стенок кристаллизатора и полностью воспринимает ферростатическое давление жидкой фазы  $P$  и усилие  $Q$  вытягивания слитка из кристаллизатора, равное усилию трения корочки по стенкам кристаллизатора.

Толщина корочки  $\delta$  растет неравномерно: быстрее в кристаллизаторе, медленнее в зоне вторичного охлаждения, еще медленнее на оставшемся участке длины жидкой фазы.

Имеется эмпирическая зависимость для оценки толщины корочки  $\delta$ , м:

$$\delta = \frac{q \cdot L_{кр}}{11,5 \cdot v}, \quad (4)$$

где  $v$  – скорость разливки, м/мин;  $L_{кр}$  – длина кристаллизатора, м; 11,5 – опытный коэффициент;  $q$  – плотность теплового потока, МВт/м<sup>2</sup>.  $q = 0,85$  МВт/м<sup>2</sup> (среднее значение плотности теплового потока в современных кристаллизаторах).

На базе аналитического решения классической задачи Стефана при постоянной температуре поверхности было получено уравнение квадратного корня, которое связывает толщину корочки  $\delta$  со временем  $\tau$ :

$$\delta = k \cdot \sqrt{\tau}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент затвердевания, величина которого для разных сталей может изменяться в пределах 0,023–0,032 м/мин<sup>0,5</sup>;  $\tau$  – время, мин.

Эта зависимость может использоваться для примерных расчетов при условии, что температура поверхности слитка в пределах кристаллизатора изменяется незначительно. Для сляба  $k = 0,028$ , для блюма и сорта  $k = 0,030$ .

Время  $\tau$ , мин, определяется из выражения

$$\tau = \frac{H_{кр}}{V_p}, \quad (6)$$

где  $H$  – высота столба жидкой стали в кристаллизаторе, м.

$$H_{кр} = H_{кр} - 0,1 \text{ м}. \quad (7)$$

где  $H_{кр}$  – высота кристаллизатора, м.

Схема формируемой корочки заготовки, удерживающей ферростатическое давление  $P_{\phi}$ , при которой

она не способна полностью удержать его приведена на рис. 3.

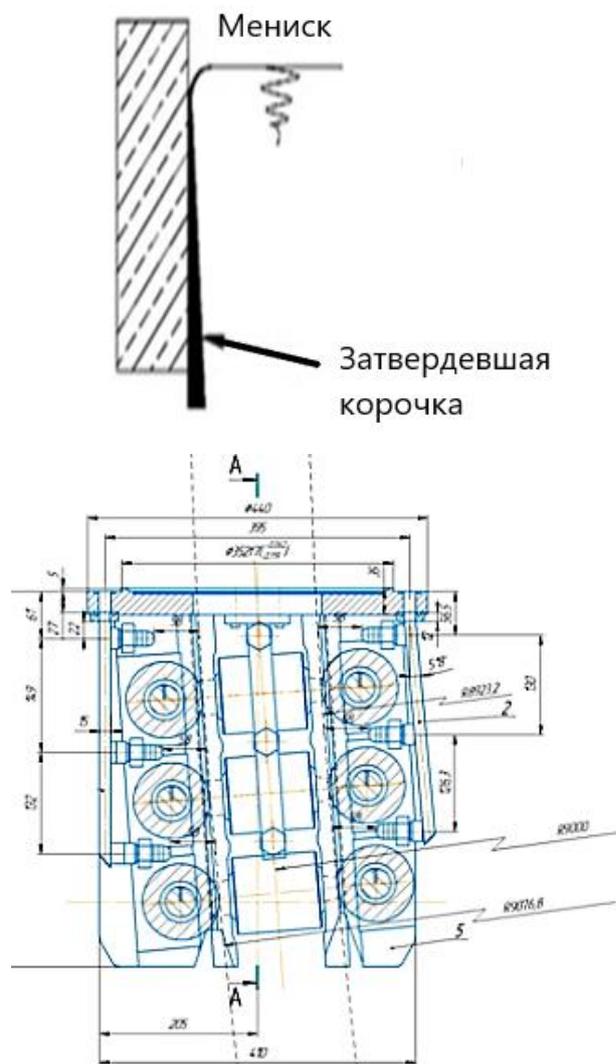


Рис. 3. Схема корочки формируемой заготовки при неполном удержании корочкой заготовки нагрузок от ферростатического давления расплава

Для снижения трения слитка о стенки кристаллизатора используется качание кристаллизатора, т.е. движение вверх-вниз по кристаллизующемуся слитку. Кроме качания для снижения трения в кристаллизаторе его стенки вместо чистой меди делают из сплава меди и серебра, а заготовки для стенок стали получают не горячей, а холодной прокаткой, что привело к увеличению твердости рабочей поверхности стенки кристаллизатора и позволило снизить не только коэффициент трения, но и повысить их износостойкость.

С целью снижения трения применяются экзотермические смеси с высокой жидкотекучестью и низкой температурой плавления, покрывающие мениск металла в кристаллизаторе и обеспечивающие защиту мениска от окисления (контакта с воздухом) и смазку

благодаря проникновению их в зазор между корочкой слитка и стенкой кристаллизатора.

В качестве смазки применяют рапсовое масло и разные порошковые смеси, подаваемые на поверхность мениска в кристаллизаторе, которые при температуре жидкой стали становятся жидкотекучими. В результате коэффициент трения слитка в кристаллизаторе  $f$  снижается от 0,5 до 0,2.

Определим среднее давление  $P_{cp}$  столба расплавленного металла (длина кристаллизатора минус 100 мм для предупреждения расплёскивания жидкого металла при качании кристаллизатора) на поверхность кристаллизатора.

Применительно к отливке сортовой заготовки сечением 150×150 мм давление  $P_{ф.н}$  на нижнем срезе кристаллизатора определяется как вес столба жидкого металла  $G_m$  высотой  $h_{кр} = 800$  мм, деленный на площадь сечения рабочей полости кристаллизатора. Высота кристаллизатора 900 мм, расстояние от верхнего торца кристаллизатора до мениска 100 мм.

Давление на нижнем срезе  $P_{ф.н \max}$ , г/см<sup>2</sup>,

$$P_{ф.н \max} = G_m / a \cdot b; \quad (8)$$

где  $a$  и  $b$  – размеры сечения кристаллизатора (15×15 см);  $\gamma$  – удельный вес жидкого металла,  $\gamma = 7,6$  г/см<sup>3</sup>;  $G_m$  – вес столба жидкого металла, г,

$$G_m = a \cdot b \cdot H_{кр} \cdot \gamma. \quad (9)$$

После подстановки данных, получим:

$$G_m = 15 \cdot 15 \cdot 80 \cdot 7,6 = 136,8 \cdot 10^3 \text{ г};$$

$$P_{ф.н \max} = 136,8 \cdot 10^3 / 15 \cdot 15 = 608 \text{ г/см}^2.$$

Среднее (расчетное) давление на стенки кристаллизатора составит:

$$P_{cp} = P_{ф.н \max} / 2 = 304 \text{ г/см}^2. \quad (10)$$

Площадь контактирующей с жидким металлом поверхности стенок кристаллизатора определим как

$$S = (2a + 2b) \cdot H_{кр}. \quad (11)$$

После подстановки данных получим

$$S = (2 \cdot 15 + 2 \cdot 15) \cdot 80 = 4,8 \cdot 10^3 \text{ см}^2.$$

Суммарное давление на четыре стенки кристаллизатора  $N$ , г, определим как

$$N = S \cdot P_{cp}. \quad (12)$$

После подстановки данных получим

$$N = S \cdot P_{cp} = 4,8 \cdot 10^3 \cdot 304 = 1459 \cdot 10^3 \text{ г}.$$

Определим среднее давление  $P_{cp}$  столба расплавленного металла на ролики подвешенного блока сортовой МНЛЗ сечением заготовки – 150×150 мм.

Марка стали – конструкционная.

Конфигурация технологической заготовки – радиальная, разгиб заготовки в одной точке линии.

Удельный вес жидкой стали –  $\gamma = 7,6$  г/см<sup>3</sup>; рас-

стояние от нижнего торца кристаллизатора до мениска жидкого металла – 800 мм (длина кристаллизатора 900 мм); жёсткостью оболочки (закристаллизовавшейся) – пренебрегаем; ролики подвешенного блока расположены на длине заготовки, где корочка еще прогибается под действием ферростатики; на расстоянии более  $h = 381$  мм от нижнего торца кристаллизатора корочка заготовки уже достаточно жесткая и давление ферростатики роликам не передается, для уверенности, что ролики удержат корочку от выпучивания, их располагаем по всем четырём граням заготовки; давление на нижнем срезе кристаллизатора –  $P_{н \max} = P_1 = 608$  г/см<sup>2</sup>.

Давление на уровне нижнего ролика подвешенного блока  $P_2$ , г/см<sup>2</sup>,

$$P_2 = G_2 / a \cdot b, \quad (13)$$

где  $G_2$  – вес заготовки высотой  $h_2$ , равной расстоянию от мениска до нижнего ролика подвешенного блока, г,

$$G_2 = a \cdot b \cdot h_2 \cdot \gamma. \quad (14)$$

После подстановки данных, получим:

$$h_2 = 80 + 38,1 = 118,1 \text{ см};$$

$$G_2 = 15 \cdot 15 \cdot 118,1 \cdot 7,6 = 202 \cdot 10^3 \text{ г};$$

$$P_2 = 202 \cdot 10^3 / 15 \cdot 15 = 898 \text{ г/см}^2.$$

Определим среднее давление на роликосую секцию:

$$P_{cp} = (P_1 + P_2) / 2; \quad (15)$$

$$P_{cp} = (608 + 898) / 2 = 753 \text{ г/см}^2 = 0,753 \text{ кг/см}^2.$$

Суммарное давление на ролики секции вторичного охлаждения высотой  $h = 381$  мм:

$$N_{\text{сум. рол.}} = P_{cp} \cdot F_{б.п.}, \text{ кг}; \quad (16)$$

$$F_{б.п.} = a \cdot h, \text{ см}^2; \quad (17)$$

$$F_{б.п.} = 15 \cdot 38,1 = 571,5 \text{ см}^2;$$

$$N_{\text{сум. рол.}} = 0,753 \cdot 571,5 = 430 \text{ кг}.$$

На каждый ролик действует средняя нагрузка в 214 кг.

Для определения нагрузки от ферростатического давления, действующего на каждый ролик, необходимо воспользоваться формулой

$$P_{ф.п.} = \gamma \cdot g \cdot b \cdot t \cdot h_i,$$

где  $t$  – шаг между роликами;

$h_i$  – расстояние по вертикали от мениска металла в кристаллизаторе до центра ролика.

### Заключение

На основе анализа взаимодействия формируемой заготовки, кристаллизатора и элементов подвесной роликовой проводки представлена методика расчета усилий, действующих на стенки кристаллизатора и ролики подвесного роликового блока зоны вторичного охлаждения сортовой машины непрерывного литья заготовки.

Материалы, содержащиеся в статье, будут полезны научным и инженерно-техническим работникам, а также учащимся технических вузов металлургических специальностей и направлений подготовки.

### Список литературы

1. Технологическое оборудование металлургических цехов: практикум для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка» (по направлениям) специализации 1-42 01 01-01 «Металлургическое производство и материалобработка (металлургия)», направления 1-42 01 01-01 02 «Электрометаллургия черных и цветных металлов» / авт.-сост. В.А. Жаранов, А.В. Ткаченко. Гомель: ГГТУ имени П.О. Сухого, 2017. 160 с.
2. Непрерывная разливка сортовой заготовки: монография / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, А.Л. Подкорытов, В.Е. Ухин, А.В. Кравченко, А.Ю. Орбачев. Донецк: Цифровая типография, 2012. 417 с.
3. Кузьминов А.Л., Кожевников А.В. Расчет и диагностика транспортирующих машин металлургических агрегатов: монография. LAP LAMBERT Academic Publishing CmbH & Co. KG, 2011. 148 с.
4. Андросенко М.В. Совершенствование подвесного блока зоны вторичного охлаждения МНЛЗ с целью повышения качества заготовки в процессе формирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2021. 18 с.
5. Андросенко М.В. Оценка напряженно-деформированного состояния слитка и конструкции МНЛЗ в области подвесных роликов зоны вторичного охлаждения // *Металлург.* 2019. №4. С. 36–40.
6. Androsenko, M. Determining the quality of continuous casting from billet caster / M. Androsenko, E. Kulikova, N. Tyuteryakov, E. Reshetnikova, K. Pashenko, A. Yaroslavtsev // *E3S WEB OF CONFERENCES.* 2019. p. 01034.
7. Моделирование тепловых полей в кристаллизаторе с щелевыми каналами охлаждения / Ячиков И.М., Феоктистов Н.А., Савинов А.С., Шафиков Т.И., Михалкина И.В. // *Теория и технология металлургического производства.* №1. 2022. С. 7.

### Сведения об авторах

**Андросенко Мария Владимировна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [m.androsenko@magtu.ru](mailto:m.androsenko@magtu.ru). ORCID 0000-0002-0560-9814

**Кенарь Екатерина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [redket78@mail.ru](mailto:redket78@mail.ru)

**Тютеряков Наиль Шаукатович** – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [ntc.mgtu@mail.ru](mailto:ntc.mgtu@mail.ru)

**Усатая Татьяна Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск, Россия.

**Дерябина Любовь Викторовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск, Россия.

## ALGORITHM FOR CALCULATION OF PARAMETERS AND CONDITION OF THE BILLET FROM CONTINUOUS CASTING MACHINE

**Androsenko Mariya V.** – Ph.D. (Eng), Senior Lecturer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [m.androsenko@magtu.ru](mailto:m.androsenko@magtu.ru). ORCID 0000-0002-0560-9814

**Kenar Ekaterina V.** – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [redket78@mail.ru](mailto:redket78@mail.ru).

**Tyuteryakov Nail Sh.** – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [ntc.mgtu@mail.ru](mailto:ntc.mgtu@mail.ru).

**Ysataya Tatyana V.** – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [usatayatv@gmail.com](mailto:usatayatv@gmail.com).

**Deryabina Lubov V.** – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [savlv@mail.ru](mailto:savlv@mail.ru).

**Abstract.** The paper presents a method for calculating the forces acting on the mould plates and the foot rollers of the roller unit of the billet caster secondary cooling zone. Methodology is presented based on the analysis of interaction of the billet with the mould and the elements of the roller guide.

**Key words:** CCM, continuous casting, billet, ingot shell, mould, roller guide, secondary cooling zone.

---

Ссылка на статью:

Алгоритм расчёта и состояния формируемой заготовки на машине непрерывного литья / Андросенко М.В., Кенарь Е.В., Тютеряков Н.Ш., Усатая Т.В., Дерябина Л.В. // Теория и технология металлургического производства. 2022. №2(41). С. 26-31.

Androsenko M.V., Kenar E.V., Tyuteryakov N.Sh., Usataya T.V., Deryabina L.V. Algorithm for calculation of parameters and condition of the billet from continuous casting machine. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 41, no. 2, pp. 26-31.