УДК 669.18.046.5.18:621

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ГИДРОДИНАМИКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СЛИТКОВ

В. М. Мелихов

Для получения рациональных скоростей разливки стали рассматриваются балансовые соотношения гидродинамических и теплообменных процессов. Формирование слитка рассчитывалось при помощи решения нелинейных дифференциальных уравнений теплопереноса и гидродинамики, которое реализовывалось при помощи разностных методов. Численное моделирование влияния теплопереноса и гидродинамики на процесс формирования слитка, показало: наличие шлака на зеркале металла способствует увеличению скорости разливки стали; шлаковый гарнисаж способствует уменьшению теплового потока к изложнице; увеличение перегрева приводит к уменьшению рациональной скорости разливки расплава; увеличение скорости наполнения изложницы способствует увеличению теплового потока.

Ключевые слова: теплофизические процессы, теплоперенос, гидродинамика, многослойный слиток, зазор, скорость заливки, численное моделирование, затвердевание.

Введение. Предъявляемые современной техникой требования к качеству литых изделий вызывают необходимость создания высоких технологий разливки и затвердевания сплавов. Одним из основных направлений решения поставленных задач является получение изделий, которые состоят из нескольких слоев сталей с различными теплофизическими свойствами. Разливка стали стали обычных слитков дает вожможность проследить формирование при традиционном формировании слитка. Ранее проводилось математическое моделирование теплофизических и гидродинамических процессов композитных слитков без учета зазора между слитком и изложницы, т.е. при идеальном тепловом кантате [1-3]. При этом применялись численные методы, которые позволяют с достаточной точность получить распределение скоростей в расплаве, температуру и другие параметры. При разливке и затвердевании стали происходит отвод тепла через стенки изложницы, где между слитком и изложницей может образовываться зазор вследствие усадки металла. Кроме того происходит теплообмен через покрытое шлаком зеркало металла.

Целью данной статьи является исследование процесса теплообмена металла с изложницей при наполнении и затвердевании слитка учетом зазора между слитком и изложницей и расчет рациональной скорости заливки стали. Для этого используется уравнения теплового баланса, а также дифференциальные уравнения теплопереноса и гидродинамики.

Постановка задачи и анализ результатов. При формировании многослойного слитка (МС) одними из главных определяющих параметров для получения высокого качества металла являются температура расплава и скорость его разливки в изложницу. Получение слитка состоит из нескольких этапов: 1) сифонная заливка легированной стали до прибыли; 2) затвердевания корочки легированной стали необходимой толщины; 3) заливка сверху углеродистой стали прибыльной части слитка.

Необходимо отметить, что скорость разливки стали и его температуру рекомендуется выбирать экспериментально для каждого типа слитка и разливаемой марки стали отдельно [1], но так как это связано с большими техническими и материальными затруднениями в данной статье проводится их теоретическая оценка. Параметры необходимые для большинства расчетов определялись при помощи математического моделирования с учетом результатов [2, 3].

При сифонной разливки оптимальная температура стали при входе в изложницу должна быть $T_{paзл} = T_{ковш} + 40^{\circ}$. Температура разливки стали, является одним из наиболее важных параметров, влияющих на качество слитков: развитие усадочных пустот и пористости в слитке, протекание процессов кристаллизации и сегрегации стали, выделение растворимых и нерастворимых примесей, появление трещин и заворотов на поверхности слитка [3].

Отличительной особенностью затвердевания МС состоит в том, что корочка стали затвердевающая в течение нескольких минут, является наружным слоем легированной стали. Рассмотрим процесс затвердевания пристеночного слоя жидкого металла толщиной $\delta_{\mathcal{H}}$ с учетом образования воздушного зазора между слитком и изложницей область исследования осесимметричная. В процессе затвердевания слой жидкого металла имеет теплосодержание $i_{\mathcal{H}}$, а затвердевший слоя толщиной корки металла δ_{me} обладает теплосодержанием $i_{\mathcal{H}}$ [6]:

$$i_{\mathcal{H}} = c_{\mathcal{H}} \rho_{\mathcal{H}} \delta_{\mathcal{H}} T_{\mathcal{H}}, \quad i_{m_{\theta}} = c_{m_{\theta}} \rho_{m_{\theta}} \delta_{m_{\theta}} T_{\kappa op}$$

$$\tag{1}$$

где $T_{\mathcal{H}}$ — температура ядра расплава; T_L — температура ликвидус расплава; T_{ms} — средняя температура слоя твердого металла толщиной δ_{ms} .

© Мелихов В. М.

При затвердевании слоя расплава $\delta_{\mathcal{H}}$ выделяется теплота кристаллизации, $Q_{\kappa p}$ и величина теплового потока от расплава металла к затвердевшей корочке стали имеет вид

$$Q_{\kappa\rho} = \rho_{me} L\delta \; ; \quad Q_{\kappa\rho\mu} = \alpha_{\mathcal{H}} (T_{\mathcal{H}} - T_e) \; , \tag{2}$$

где L – удельная теплота кристаллизации стали; T_{e} – температура выливаемости расплава. Область исследования теплопереноса и гидродинамики при формировании МС представлена на рис.1.

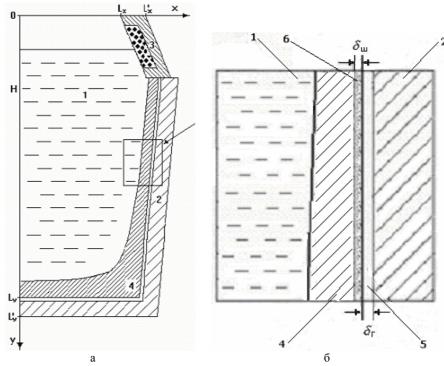


Рис 1. Схема исследуемой области: 1 –расплав стали; 2 – стенка изложницы; 3 – прибыльная надставка; 4 – затвердевший металл; 5 - газовый зазор; 6 – шлаковый гарнисаж. а) изложница; б) увеличенный фрагмент на границе слиток – изложница.

Рассмотрим теплообмен между слитком и изложницей. При этом тепловой поток Q_{cn} от поверхности слитка к изложнице при идеальном контакте Q_T и при неидеальном контакте Q_R будет равен:

$$Q_T = -\lambda_{me} \nabla T , \quad Q_R = \frac{1}{R_{\delta}} (T_{cn} - T_{u3n})$$
(3)

где $R_{\delta} = \delta_{3a3} / \lambda_{3a3} + \delta_{uu} / \lambda_{uu}$ — термическое сопротивление газового зазора и слоя шлака; δ_{3a3} — газовый зазор между изложницей и слитком; δ_{uu} — слой шлака между изложницей и слитком; λ_{3a3} — теплопроводность газового зазора; $R_{\delta} = \delta_{3a3} / \lambda_{3a3} + \delta_{uu} / \lambda_{uu}$ — теплопроводность шлака; T_{u3} , T_{cn} — температура изложницы и поверхности слитка. Величина газового зазора и время его образования определялись в соответствии с [7].

На основе выше приведенных соотношений уравнение теплового баланса процесса формирования корочки выразится как

$$i_{\mathcal{H}} - i_{m_{\mathcal{B}}} + Q_{\kappa p} = Q_{\mathcal{C}\pi} - Q_{\kappa O H \mathcal{B}} \tag{4}$$

Подставим в уравнение теплового баланса соотношения (1-4) и определим коэффициент теплопередачи от расплава к корочке как

$$\alpha_{\mathcal{H}} = \left[Q_{\mathcal{C}_{\mathcal{I}}} + \delta / \Delta \tau (c_{m_{\theta}} \rho_{m_{\theta}} T_L - c_{\mathcal{H}} \rho_{\mathcal{H}} T - \rho_{m_{\theta}} L) \right] / (T_{\mathcal{H}} - T_{\theta})$$
 (5)

где δ – толщина корочки; $\Delta \tau$ – время образования зазора.

При расчете по соотношению (5) будем руководствоваться результатами вычислительного эксперимента проведенного в согласно исследования [1-3].

Влияние скорости движения металла на тепловой поток от расплава к корковому слою выражается следующим соотношением [7]:

$$Nu = 0.74\sqrt{0.53Pe \pm 0.01Ra^{2/3}} \tag{6}$$

где $Nu=lpha_{\mathscr{H}}D_{\mathscr{H}}$ / $\lambda_{\mathscr{H}}$; $\lambda_{\mathscr{H}}$ – коэффициент теплопроводности жидкой расплава; $D_{\mathscr{H}}$ – диаметр жидкого расплава.

Мелихов В. М. 135

Критериальное соотношение (6) учитывает зависимость теплопереноса не только от тепловой конвекции, но также от конвекции вызванной заливочной струей (число Релея). Знаки перед числом подобия Релея указывает на совпадение (плюс) или несовпадение (минус) направления потоков вынужденной и тепловой конвекции.

Из соотношения (6) определим зависимость скорости поднятия уровня металла от условий заливки. При этом скорость циркуляционных потоков у поверхности затвердевающего металла выразим в виде [7]:

$$V_{u} = 4.7 d_{cmp} V_{cmp} / \left(\sqrt{\pi} D_{HC} \right) \tag{7}$$

где $d_{\it cmp}$ — диаметр струи при входе в изложницу; $V_{\it cmp}$ — скорость струи на выходе из разливочного стакана.

Из уравнения неразрывности потока $\pi d_{cmp}^2 V_{cmp} = \pi D_{cn}^2 V_{yp}$ следует, что скорость на выходе из разливочного стакана определяется как

$$V_{cmp} = V_{vp} (D_{c\pi} / d_{cmp})^2$$
 (8)

где $V_{yp}\,$ – скорость поднятия уровня стали в изложнице.

Из соотношения (6) и (8) определим скорость циркуляционных потоков как

$$V_{u} = \frac{4.7}{\sqrt{\pi}} \frac{D_{cn}}{d_{cmp}} V_{yp} \tag{9}$$

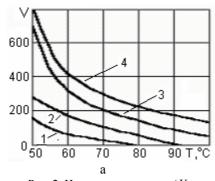
После преобразования приведенных соотношений скорость поднятия уровня равна:

$$V_{yp} = 0.4\sqrt{\pi} \left[\left(\frac{\alpha_{xc} X_0}{\lambda_{xc} 0.74} \right)^2 \mp 0.01 Ra^{2/3} \right] \frac{a_{xc} d_{cmp}}{D^2_{cn}}$$
 (10)

Полученное выражение (10) позволяет определять скорость поднятия уровня стали в зависимости от скорости продвижения фронта затвердевания, на величину которого влияет теплообмен между расплавом и корочкой затвердевающей стали. Причем величина этого теплообмена зависит от скорости подачи заливаемой в изложницу стали.

Для сравнительного анализа процессов теплопереноса и гидродинамики проводилось математическое моделирование. В основу математической модели формирования многослойного слитка взяты нестационарные безразмерные уравнения переноса вихря скорости, переноса газовой фазы и теплопереноса. Также в модели учитываются тепловые процессы, связанные с образованием доли твердой фазы, которая определяет кинетику кристаллизации в приближении неравновесной двухфазной зоны.

Основываясь на полученных выше соотношениях, и используя данные вычислительного эксперимента [1, 3, 5], получили некоторые данные по рациональным режимам формирования слитка. При этом оказалось, что влияние перегрева на скорость заливки стали (рис. 2) зависит от того, под шлаком производилась заливка или нет.



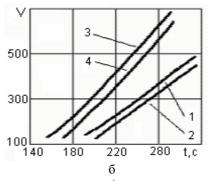


Рис. 2. Изменение скорости (V, $_{MM}/_{MUH}$) поднятия уровня металла: а) от перегрева; б) от времени отхода корочки; (1- без шлака; 2- со шлаком 3- без шлака с учетом вынужденной конвекции; 4- со шлаком с учетом вынужденной конвекции).

Причем наличие шлака на зеркале металла способствует возможности увеличения скорости разливки стали. В рассматриваемых случаях учитывалось также направление вынужденной конвекции вызванной заливочной струей (рис. 2, б). Противоположное направление тепловой и вынужденной конвекции приводит к некоторому увеличению скорости заливки стали, а однонапраленность уменьшает режим заполнения изложницы.

Изменение скорости заливки стали (рис. 3а) в зависимости от диаметра слитка показывает, что при его увеличении происходит уменьшение допустимой скорости заполнения. Увеличение диаметра зали-

Mелихов В. М.

ваемой струи металла дает возможность увеличить допустимую скорость заливки (рис. 3, б).

Одним из основных критериев качества металла является отсутствие дефектов трещин в слитке. Необходимо соблюдать такую допустимую скорость поднятия уровня металла, чтобы затвердевающая корочка была достаточной толщины и не разрушалась. При этом на корочку действуют напряжения: статического давления столба металла, термические напряжения и напряжения торможения усадки стали. В случае, когда корочка опирается на стенку изложницы и выполняется соотношение (11) в момент отхода корочки от стенки изложницы она не разрушается. При отливке слитка под шлаком и отсутствии дефектов на внутренней поверхности изложницы напряжения торможения усадки стали оус равно нулю [5].

Условие устойчивости корки слитка к разрушению выражается в том, что сумма напряжений возникающих в корке слитка толщиной δ не превышает предела прочности σ_{np} :

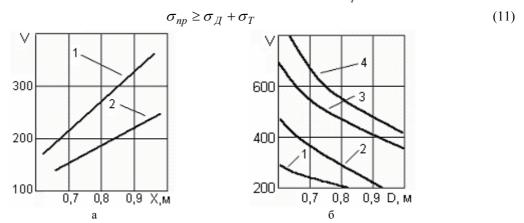


Рис. 3. Изменение скорости (V, mm/muh) поднятия уровня металла: а) от диаметра слитка; (1 – без шлака; 2 – со шлаком;) б) от диаметра струи – с учетом вынужденной конвекции.

Напряжения, возникающие в корке слитка под действием статического давления столба металла

$$\sigma_{II} = \rho_{\mathcal{H}} g V_{\mathcal{V}\mathcal{D}} D \Delta \tau / 2\delta \tag{12}$$

и термические напряжения σ_T в корке имеет вид [6]

имеет вид [о]
$$\sigma_T = \frac{2}{3} (T_{\rm gH} - T_{\rm H}) \frac{\alpha E \mu}{(1 - \mu^2)} \tag{13}$$

где α – коэффициент линейного расширения стали; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; $T_{\it en}$, $T_{\it u}$ – температуры внутренней и наружной поверхности корки.

Из соотношений (13-15) получим, что скорость поднятия уровня равна

$$V_{yp} = \frac{2\delta(\sigma_{np} - \sigma_T)}{\rho_{\mathcal{H}} g \Delta \tau D} \tag{14}$$

и она зависит от толщины корки стали, термических напряжений и времени отхода корки от изложницы.

В зависимости от напряжений в корочке, которые определяются разностью напряжений внутренней и наружной температурой корочки (16), определим рациональную скорость заполнения изложницы. Как можно отметить, увеличение разности температуры наружной и внутренней поверхности приводит к уменьшению рациональной скорости заливки (рис. 4, а). Характер изменения температуры показан на

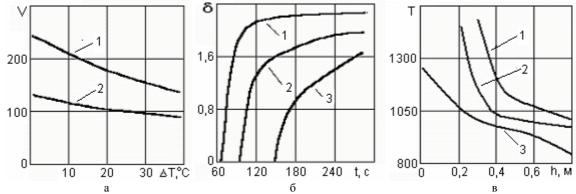


Рис. 4. Скорость V, $\mathit{мм}/\mathit{мин}$ поднятия уровня металла (а) в зависимости от напряжений в корочке (1 – без шлака; 2 – со шлаком); влияние коэффициента теплопередачи слоя шлака на величину газового зазора (б): 1 - 1800 Вт/(м²К); 2 – 400; 3 – 200; температура стенки слитка в моменты времени заполнения изложницы в): 1 – 1 мин; 2 – 2 мин; 3 – 3 мин.

Мелихов В. М. 137

рис. 4, в. Тепловые процессы, происходящие при образовании корки, показывают, что величина газового зазора при уменьшении теплопередачи через шлаковый гарнисаж, уменьшается и происходит позже.

При известных прочностных и особенно пластических свойствах стали при высоких температурах склонность слитков к образованию трещин и заворотов зависит от того количества тепла перегрева стали, которое подводится единице площади боковой поверхности затвердевающей корочки слитка при заполнении изложницы жидкой сталью. Если этого количества тепла много, то скорость кристаллизации уменьшается, корочка получается тонкой и способной к образованию разрывов. В случае небольшого подвода тепла скорость затвердевания увеличивается, но этого тепла может не хватать на компенсацию потерь тепла на излучение с открытой поверхности металла. Поэтому наименьшее количество поверхностных дефектов получается при каких-то оптимальных температурах разливки стали [6].

Зависимость изменения теплового потока от скорости наполнения изложницы расплавом (рис. 5) показывает, что ее увеличение способствует увеличению теплового потока, что согласуется с исследованиями [2, 5].

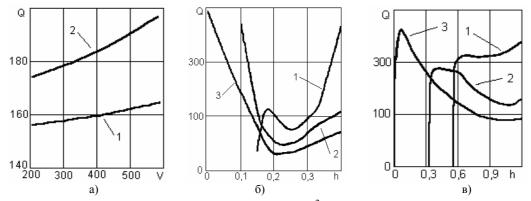


Рис. 5. Изменение потока теплоты (Q, $M \not \square w / m^3$): а) от скорости поднятия уровня: 1 – при сифонной заливке; 2 – при заливке сверху; б) в вычислительном эксперименте вдоль боковой стенки изложницы для времени: 1 мин; 2 мин; 3 мин.

Зависимость теплового потока от скорости движения расплава у корки позволяет его изменить, регулируя скорость разливки металла. Поскольку разливка сверху избавляет от образования корочки, скорость разливки может быть значительно увеличена вследствие снижения температуры металла при выпуске из печи. Возникающие при разливке металла трещины вызываются не тепловыми, а специфическими условиями этого способа разливки – приваркой к стенкам изложницы и другими причинами, связанными с торможением усадки стали.

При разливке сверху оптимальная температура металла на выпуске из печи должна быть значительно ниже, чем при сифонном способе разливки. Причем прогрев стенок изложницы происходит более интенсивно, чем при сифонной разливке. При этом потери тепла при выпуске металла из печи и транспортировке ковша остаются без изменения, а степень перегрева, необходимого для преодоления образования корки на поверхности металла в изложнице при разливке сверху уменьшается в несколько раз. Это объясняется тем, что вновь поступающие объемы жидкого металла при разливке сверху проникают на глубину не более 0,6 -1 м. Охлаждение этих масс металла происходит только через поверхность, определяемую высотой проникновения струи, и приводит к понижению температуры примерно в два раза меньше, чем при сифонной разливке стали [2].

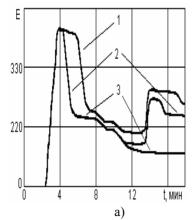
На основе математического моделирования проводился вычислительный эксперимент. Необходимо отметить качественное совпадение результатов вычислительного эксперимента [2,3] с экспериментальными данными по распределению потока от расплава к корочке.

При увеличении скорости циркуляции увеличивается величина теплового потока (рис. 5), передаваемого от расплава к внутренней поверхности коркового слоя слитка [1,8]. При этом может прекратится рост корки, образовавшейся в первый момент времени контакта жидкой стали со стенкой изложницы, а при дальнейшем увеличении теплового потока и подплавлении корки. Поэтому при отходе корки слитка от поверхности изложницы (вследствие усадки металла), толщина ее оказывается недостаточной, чтобы выдержать давление столба жидкого металла и термические напряжения, возникающие в ней, что приводит к возникновению трещин на поверхности слитка. При малом тепловом потоке к корочке слитка скорость ее нарастания значительно выше и вероятность образования трещин мала.

При формировании МС происходит нарастание плотности тепловой энергии в несколько этапов, т.к. заливается сифоном легированная сталь и сверху углеродистая после нарастания корочки легированной стали (рис. 6, а). Как видно из рисунка при массой скорости разливки 3 т/мин плотность тепловой энергии с перегревом 50°С и 100°С существенно отличаются. В первый период заливки при перегреве 100°С тепловая энергия принимает максимальное значение более продолжительное время чем при перегреве 50°С. Такое положение способствует большему прогреву стенки изложницы и образованию более

Mелихов В. M.

тонкой корочки стали. Влияние заливки сверху с различным перегревом (рис. 6, б) приводит к проплавлению корочки на различную глубину, что необходимо учитывать при образовании слоя легированной стали



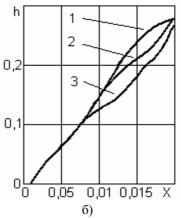


Рис. 6. Формирование многослойного слитка: а) тепловая энергия: 1- перегрев 100°C; 2 – перегрев 50°C; 3 – обычный слиток; б) корочка слитка: 1- до заливки сверху; 2- с перегревом 50°C; с перегревом 100°C.

Необходимо выбирать скорость разливки сверху и перегрев стали таким образом, чтобы формировался равномерный слой легированной стали как по толщине, так и по химическому составу на границе легированной стали и углеродистой.

Выводы. Из анализа проведенных исследований влияния теплопереноса и гидродинамики на процесс формирования слитка установлены следующие закономерности. Слой шлака на зеркале металла способствует увеличения скорости разливки стали до 30%. Шлаковый гарнисаж способствует уменьшению теплового потока на границе слиток - изложница и газовый зазор образуется позже. Увеличение перегрева приводит к уменьшению рациональной скорости разливки расплава. Увеличение скорости наполнения изложницы способствует увеличению теплового потока. Увеличение перегрева стали с 50°С до 100°С при разливке многослойного слитка приводит к увеличению проплавлению корки слитка на 30%.

РЕЗЮМЕ

Для получения рациональных скоростей разливки стали рассматриваются балансовые соотношения гидродинамических и теплообменных процессов. Формирование слитка рассчитывалось при помощи решения нелинейных дифференциальных уравнений теплопереноса и гидродинамики, которое реализовывалось при помощи разностных методов. Численное моделирование влияния теплопереноса и гидродинамики на процесс формирования слитка, показало: наличие шлака на зеркале металла способствует увеличению скорости разливки стали; шлаковый гарнисаж способствует уменьшению теплового потока к изложнице; увеличение перегрева приводит к уменьшению рациональной скорости разливки расплава; увеличение скорости наполнения изложницы способствует увеличению теплового потока.

Ключевые слова: теплофизические процессы, теплоперенос, гидродинамика, многослойный слиток, зазор, скорость заливки, численное моделирование, затвердевание.

SUMMARY

To obtain the rational speed casting of steel are considered balance relations hydrodynamic and heat processes. The formation of the ingot was calculated using the solution of nonlinear differential equations of heat transfer and fluid dynamics, which were implemented by difference methods. Numerical simulation of heat transfer and fluid dynamics on the formation of the ingot, while: the presence of slag on the metal mirror increases the casting speed steel slag skull helps to reduce heat flow to mould; increase overheating leads to a decrease in sound speed casting of the melt, increase the speed of filling the molds helps increase the heat flux.

Keywords: thermal processes, heat transfer, fluid dynamics, multi-layered ingot, gap, speed of casting, numerical simulation, solidification.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Мелихов В. М. Математическое моделирование гидродинамики и теплопереноса при формировании многослойных слитков / В. М. Мелихов // Вісник Донецького національного університету, Сер. А. Природничі науки. 2009. № 1. С. 436-443.
- 2. Ефимов В. А. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов / В. А. Ефимов, А. Эльдарханов. М.: Машиностроение, 1998. 359 с.
- 3. Затвердевание металлов и металлических композиций / В. А. Лейбензон, В. Л. Пилюшенко, В. В. Кондратенко и др. Киев: Наукова думка, 2009. 409 с.
- 4. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М.: Едиториал, 2003. 784 с.

Мелихов В. М. 139

ВІСНИК ДОНЕЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ, Сер. А: Природничі науки, 2010, вип. 2

- 5. Математическое моделирование формирования литой композиции углеродистой и хромистой сталей / В. А. Лейбензон, Ф. В. Недопекин, В. М. Мелихов и др. // Сталь. 2004. № 2. С. 55-57.
- 6. Повышение эффективности производства стальных слитков / В. И. Баптизманский, А. М. Поживанов, Е. И. Исаев, А. П. Огурцов. М.: Металлургия, 1992. 222 с.
- 7. Скворцов А. А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок / А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, В. А. Ульянов. М.: Металлургия, 1991. 218 с.
- 8. Прикладные задачи металлургической теплофизики / В. И. Тимошпольский, Н. М. Беляев, А. А. Рядно и др. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 319 с.

Поступила в редакцию 04.03.2010 г.

Mелихов В. М.