

*д.т.н. Смирнов А.Н.
(ГВУЗ «ДонНТУ», г. Донецк, Украина),
Шутов И.В.
(ОАО «АЗОЦМ», г. Артемовск, Украина),
к.т.н. Куберский С.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина),
к.т.н. Редько Г.А.
(ГВУЗ «ДонНТУ», г. Донецк, Украина)*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ НА ХАРАКТЕР ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МЕДНОЙ ЗАГОТОВКИ, ОТЛИВАЕМОЙ НА КОЛЕСО

Розроблено математичну модель яка дозволяє імітувати затвердіння мідної заготовки, що відливається на колесо в залежності від швидкості його обертання, температури розливання і умов охолодження, а також прогнозувати якість внутрішньої структури металопродукції.

Ключові слова: *мідь, безперервне розливання, колесо, математична модель, затвердіння, прогнозування якості.*

Разработана математическая модель позволяющая имитировать затвердевание медной заготовки отливается на колесо в зависимости от скорости его вращения, температуры разлива и условий охлаждения, а также прогнозировать качество внутренней структуры металлопродукции.

Ключевые слова: *медь, непрерывная разливка, колесо, математическая модель, затвердевание, прогнозирование качества.*

Определяющей тенденцией современной практики производства и разлива металлов и сплавов является стремление производителей уменьшить удельные затраты энергии на тонну продукции. В этом плане наиболее перспективными направлениями развития являются технологии непрерывной разлива металла на заготовки, сечение которых максимально приближено к сечению продукции, а также технологии совмещенной разлива и прокатки заготовки. В мировой практике разлива высококачественных марок меди большое распространение получили агрегаты разлива меди на колесо с последующей прокаткой на проволоку [1,2]. Особенностью работы таких агрегатов является то, что они пред-

ставляют собой хорошо гармонизированную и автоматизированную технологическую систему, в которой важнейшее значение имеет скорость разлива (вращения колеса) и стабильное качество заготовки, выходящей с разливочной машины.

Концептуальная модель процесса непрерывного литья медной заготовки на колесо и ее затвердевания может быть представлена следующим алгоритмом: «оптимизация скорости литья заготовки» → «тепловой баланс на участке миксер – переливное устройство – кристаллизатор» → «оптимизация геометрической формы полости кристаллизатора» → «динамическое управление зоной водяного охлаждения» → «прогнозирование качества заготовки» → «поддержание согласованной работы разливочного колеса и участка прокатных клетей». В этой цепочке огромное значение приобретает оптимизация интенсивности теплопередачи (теплоотвода) на колесе и протяженности жидкой фазы по длине заготовки.

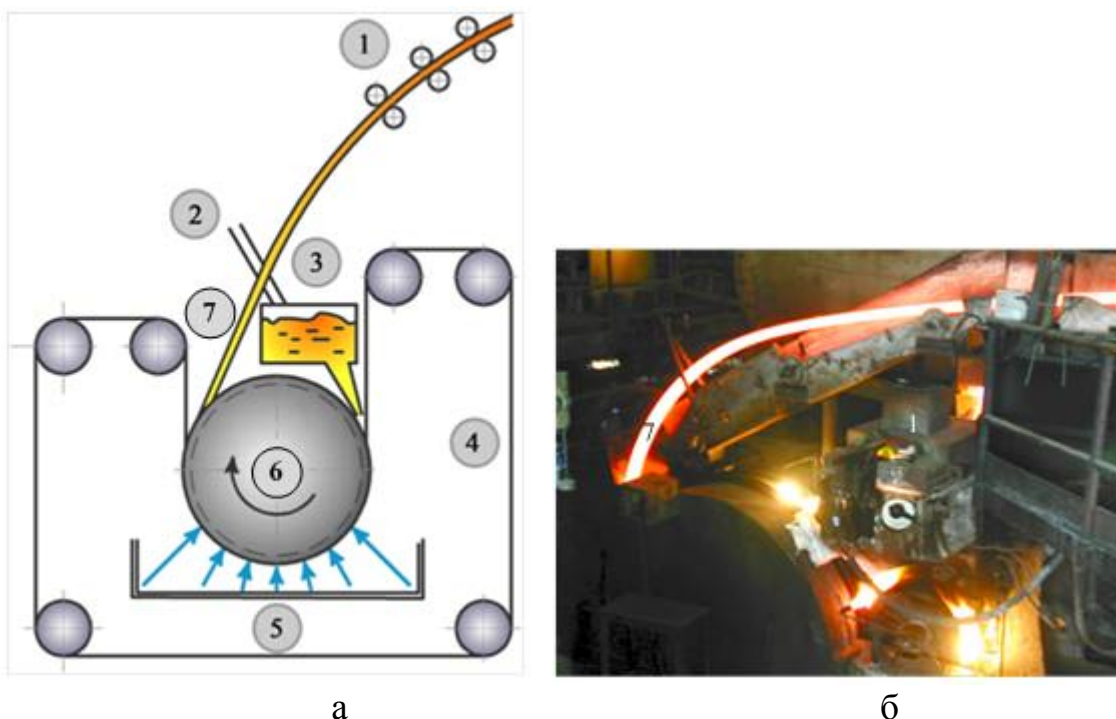
При этом протяженность зоны жидкой фазы в заготовке ограничивается несколькими технологическими соображениями, главными из которых являются недопущение возможности появления внутренних трещин при разгибе заготовки, а также предотвращение образования пористости в осевой зоне заготовки в процессе ее затвердевания.

Образование внутренней пористости следует связывать с затрудненными условиями питания жидкой зоны заготовки на конечной стадии затвердевания, где вязкость расплава значительно увеличивается, а растущие дендриты препятствуют продвижению жидкости. В случае разлива на колесо дополнительным фактором, ограничивающим возможности питания внутренней области заготовки жидким металлом, является положение области окончания затвердевания. Весьма важным фактором является то, что заготовка сначала движется вниз по окружности колеса, а затем после достижения ею нижней точки на разливочном колесе она начинает подниматься вверх. На этом участке условия питания осевой части заготовки ухудшаются в силу снижения металлостатического давления в жидкой ванне, что может приводить к появлению осевой усадочной пористости, отрицательно влияющей на качество металлопродукции.

Основной целью данных исследований было моделирование условий затвердевания непрерывнолитой медной заготовки разливаемой на колесо, что является важной научной задачей, решение которой позволит с достаточной точностью определять положение зоны полного затвердевания заготовки в зависимости от ее сечения, скорости вращения колеса, температуры заливаемой меди, интенсивности охлаждения и пр.

Теплофизические процессы в системе «колесо – заготовка – лента» включают перенос (перераспределение) тепловой энергии между

данными элементами и окружающей средой в определенный промежуток времени, а также выделение тепла непосредственно при кристаллизации меди (рисунок 1).



- 1 – получаемая заготовка; 2 – желоб для подачи меди из миксера;
- 3 – промежуточный ковш; 4 – стальная лента; 5 – зона водяного охлаждения колеса; 6 – рабочее колесо в защитном кожухе;
- 7 – зона выхода заготовки из полости колеса и ее разгибания

Рисунок 1 – Схема (а) и фото (б) разливки меди на колесо

Область затвердевания заготовки условно можно разбить на 4 зоны:

- зона 1 – зона снятия теплоты перегрева (тепловой поток в этой зоне не зависит от формы кристаллизатора, протяженность зоны для конкретных условий кристаллизации заготовки составляет 40-50 мм);
- зона 2 – зона непосредственного контакта затвердевшей корочки со стенкой колеса протяженность, которой напрямую зависит от геометрии стенки колеса (увеличение протяженности этой зоны способствует повышению общего теплоотвода при прочих равных условиях);
- зона 3 – зона теплопередачи через образовавшийся воздушный зазор; чем меньше зазор в этой зоне, тем больше коэффициент теплопередачи; в этой связи необходимо стремиться к созданию такого профиля колеса, который бы обеспечил наименьший зазор в этой зоне;
- зона 4 – зона вторичного воздушного охлаждения при выходе заготовки из полости колеса и ее разгибании (поз.7 рисунок 1).

В качестве исследуемой области было выбрано поперечное сечение в плоскости, перпендикулярной окружности колеса. Расчетная область включает в себя точки, принадлежащие колесу и отливаемой заготовке.

Моделирование процессов формирования заготовки выполнено на базе основных законов теплофизики многофазных сред. После расчета распределений температурного поля и доли твердой фазы в заданных сечениях заготовки (начиная от мениска) определяются геометрические размеры затвердевшей части и приходящееся на нее количество элементарных слоев по толщине и по ширине заготовки.

Теплоперенос в медной заготовке описывается уравнением

$$\rho_3 C_{3\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

где T – температура в рассматриваемой точке, $^{\circ}\text{C}$;

x – координата по оси в направлении толщины колеса, м;

r – координата по оси в направлении радиуса колеса, м;

τ – время от момента заливки расплава в кристаллизатор, с;

ρ_3 – плотность материала бруска, $\text{кг}/\text{м}^3$;

λ_3 – теплопроводность материала бруска, $\text{Дж}/(\text{м}\cdot\text{К}\cdot\text{с})$;

$C_{3\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплоемкости, определяемый по формуле

$$C_{3\text{эф}} = C_3 + L_3 \frac{df_s}{dT},$$

где C_3 – удельная теплоемкость материала заготовки, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

L_3 – удельная теплота кристаллизации материала бруска, $\text{Дж}/\text{кг}$;

f_s – доля твердой фазы.

Процесс формирования твердой корочки внутри заготовки описывается с помощью линейной модели

$$f_s = \frac{T_L - T}{T_L - T_S},$$

где T_L – температура ликвидус материала бруска, $^{\circ}\text{C}$;

T_S – температура солидус материала бруска, $^{\circ}\text{C}$.

Для описания теплопереноса внутри колеса используется уравнение теплообмена при отсутствии фазового перехода

$$\rho_k C_k \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_k \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

где ρ_k – плотность материала колеса, кг/м³;
 λ_k – теплопроводность материала колеса, Дж/(м·К·с);
 C_k – удельная теплоемкость материала колеса, Дж/(кг·К).

Математическая модель дополняется системой граничных условий, необходимых для решения поставленной задачи. В начальный момент времени задаются постоянные поля температуры по всему рабочему сечению [3, 4].

1. На боковых поверхностях колеса предполагается конвективный теплообмен с воздухом

$$-\lambda_k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{\substack{x=x_0 \\ x=x_n}} = q = \alpha (T|_{\substack{x=x_0 \\ x=x_n}} - T_a),$$

где α – локальный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К);
 T_a – температура воздуха на границе с колесом, °С.

2. На «внутренней» поверхности колеса предполагается охлаждение разбрызгиваемой водой, описываемое по уравнению

$$-\lambda_k \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_0} = \alpha_w (T|_{r=r_0} - T_w),$$

где α_w – коэффициент теплоотдачи, определяемый расходом охлаждающей воды, Вт/(м²К);

T_w – температура охлаждающей воды, °С.

3. Граничные условия для поверхности заготовки задаются в зависимости от момента времени. При $\tau < \tau_1$ (период нахождения заготовки в кристаллизаторе) предполагается, что на поверхностях, соприкасающихся с колесом осуществляется прямой кондуктивный теплообмен [4]

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_k = \left. \frac{dT}{dr} \right|_z, \quad \left. \frac{dT}{dx} \right|_k = \left. \frac{dT}{dx} \right|_z.$$

Таким образом, все тепло, подводимое от внутренних точек колеса, передается заготовке (бруску).

На поверхности заготовки, соответствующей внешнему радиусу колеса, осуществляется конвективное охлаждение за счет подаваемой воды. Данный процесс можно описать следующими уравнениями

$$-\lambda_k \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_n} = \alpha_w (T|_{r=r_n} - T_w), \quad -\lambda_z \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_n} = \alpha_w (T|_{r=r_n} - T_w).$$

4. После выхода заготовки из кристаллизатора ($\tau > \tau_1$) теплообмен осуществляется за счет конвективного теплообмена с воздухом и излучения, что дает следующее граничное условие

$$-\lambda_3 \frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_{30}}^{r=r_{33}} = \alpha_{36} \left(T \Big|_{r=r_{30}}^{r=r_{33}} - T_a \right) + \sigma \varepsilon \left(T^4 \Big|_{r=r_{30}}^{r=r_{33}} - T_a^4 \right),$$

$$-\lambda_3 \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_{30}}^{x=x_{33}} = \alpha_{36} \left(T \Big|_{x=x_{30}}^{x=x_{33}} - T_a \right) + \sigma \varepsilon \left(T^4 \Big|_{x=x_{30}}^{x=x_{33}} - T_a^4 \right),$$

где σ – константа Стефана-Больцмана;

ε – излучательная способность поверхности заготовки при радиационном теплообмене.

Система уравнений и граничных условий преобразуется с помощью конечно-разностных методов в форму, удобную для компьютерных расчетов [5]. Для настройки программы и оценки ее работоспособности были использованы исходные данные представленные в таблице 1, которые оставались неизменными для всех исследуемых вариантов.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

Параметры колеса и заготовки	Значения
Радиус колеса, мм	1000
Толщина колеса, мм	113
Материал колеса	бронза
Начальная температура колеса (перед заливкой Cu), °C	190
Высота заготовки, мм	36
Ширина заготовки, мм	63
Материал заготовки	медь
Плотность медной заготовки, кг/м ³	8950
Коэффициент теплопроводности меди, Вт/(м К)	380
Коэффициент теплоемкости меди, Дж/(кг К)	886
Начальная температура заливаемого расплава, °C	1185

Построенная на основе разработанной математической модели компьютерная программа позволяет рассматривать различные массивы исходных данных, подбирая оптимальные режимы разлива, вращения колеса и охлаждения заготовки, рассчитать поля температуры и долю твердой фазы в исследуемой заготовке в любой момент затвердевания, а также вывести результаты в виде диаграмм и графиков (рисунки 2 и 3).

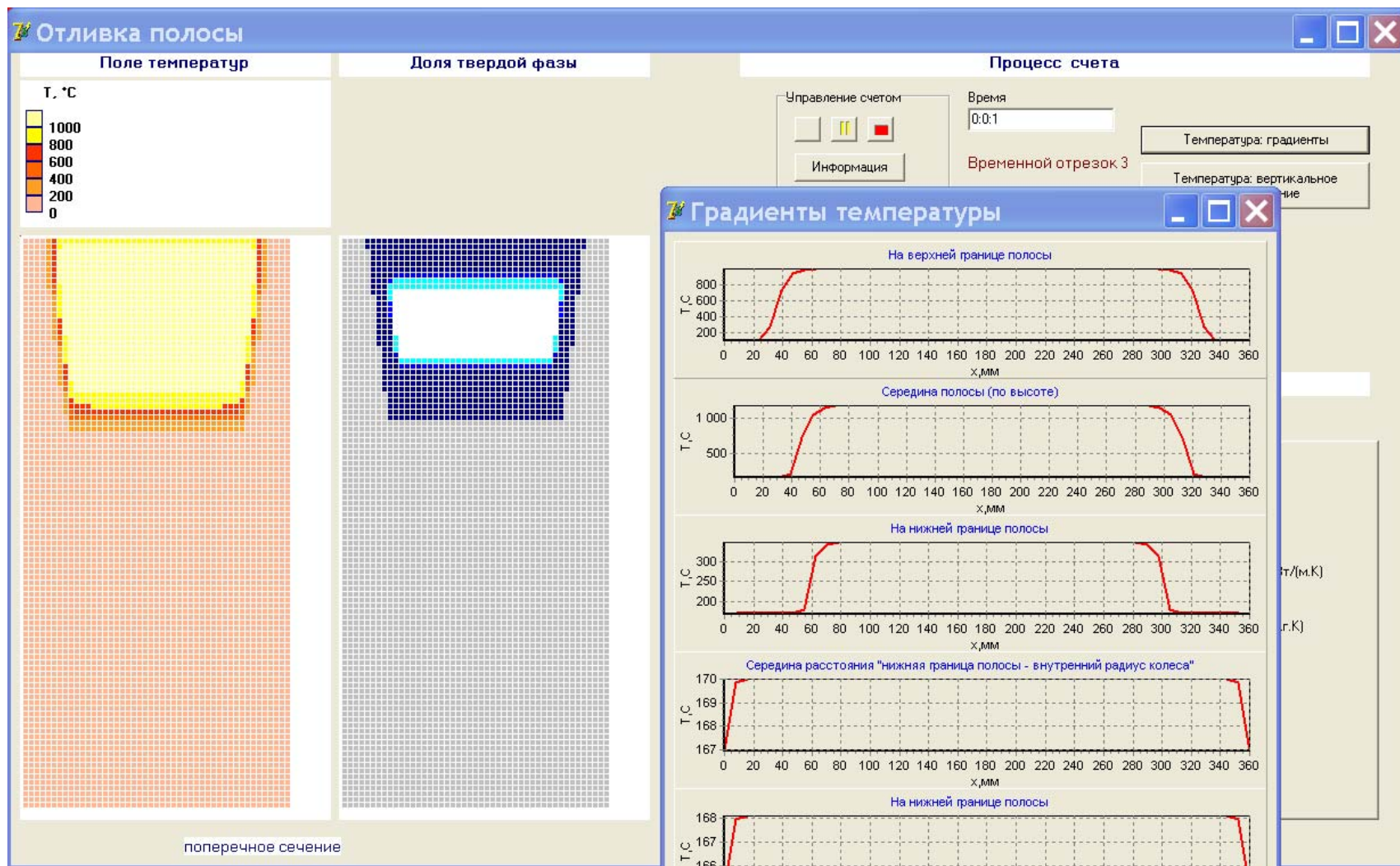


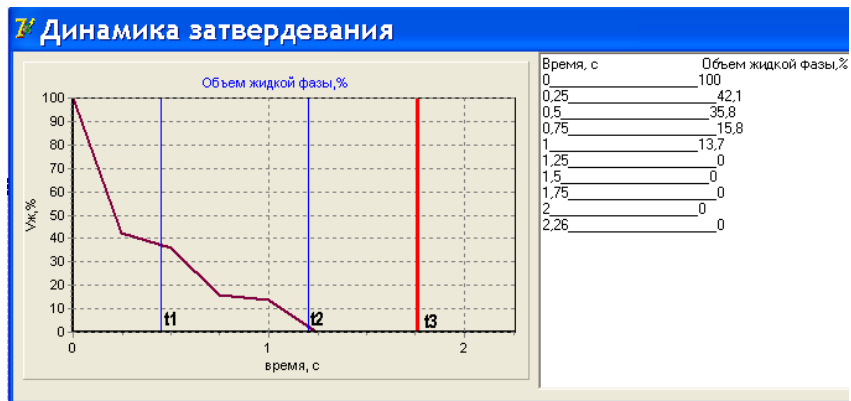
Рисунок 2 – Рабочее окно программы (модели расчета)



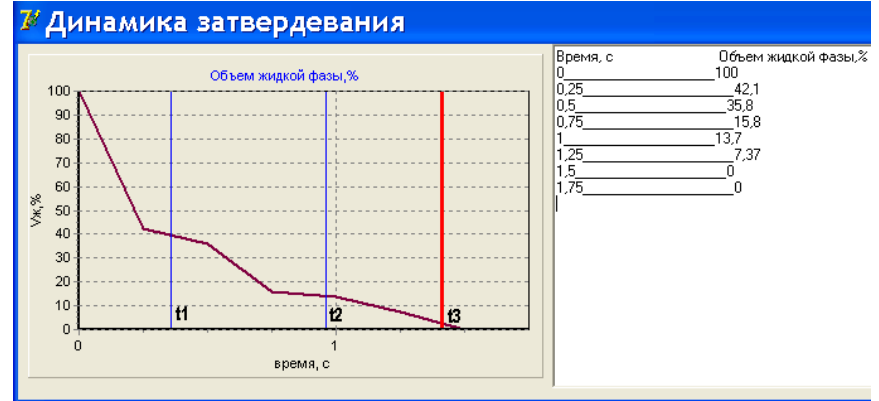
а



б



в



г

Рисунок 3 – Расчетные графики показывающие долю жидкой фазы в общем объеме заготовки в каждый момент времени при различных скоростях вращения колеса, об/ч (а – 700, б – 1200, в – 1600, г – 2000)

Расчеты выполнены для всего возможного диапазона скоростей вращения колеса. На расчетных графиках (рисунок 3) представлены кривые, показывающие долю жидкой фазы в общем объеме заготовки в каждый момент времени. Справа представлена та же информация в табличной форме (для уточнения контрольных значений). Линиями t_1 и t_2 обозначены границы зоны охлаждения водой. Прямая t_3 является границей, за которой недопустимо наличие жидкой фазы, т.к. в этой точке заготовка отделяется от колеса. Расчетное время затвердевания заготовки – 85 с.

Обобщая выполненные исследования (рисунок 4), следует отметить, что глубина проникновения зоны жидкой (или жидко-твердой) фазы в значительной степени зависит от скорости вращения колеса.

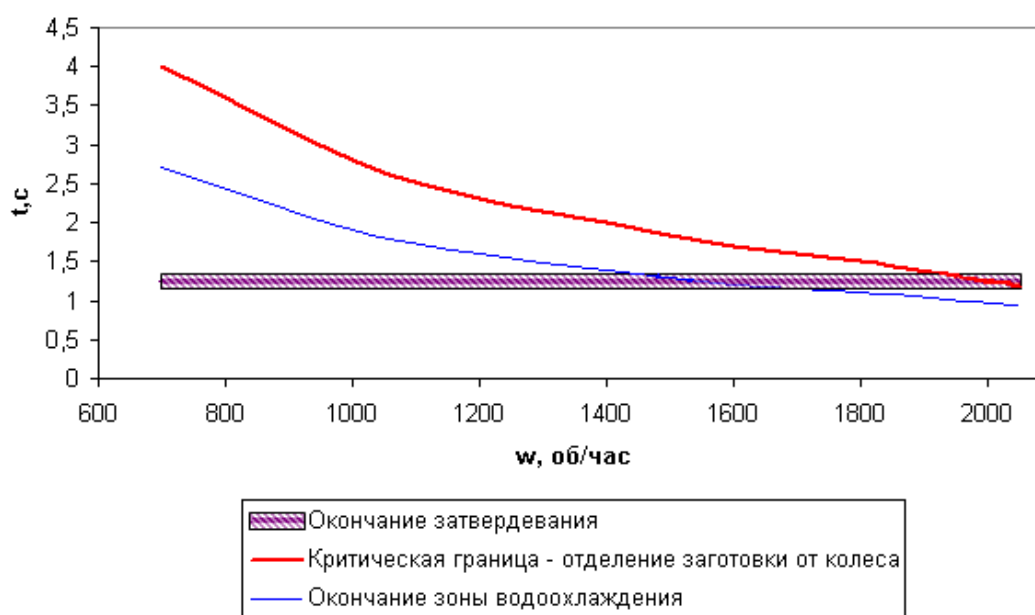


Рисунок 4 – Влияние скорости вращения колеса на формирование твердой фазы заготовки

Значения скорости 1800-1900 об/ч и выше приводят к попаданию границы зоны затвердевания за пределы допустимых значений, которые определяются условием отделения заготовки от колеса и ее пластической деформацией в процессе расправления. Это соображение обусловлено тем фактом, что твердая фаза материала в области температуры затвердевания, как правило, имеет крайне низкие пластические свойства и растрескивается при наложении растягивающих напряжений [6].

Значения скорости в диапазоне 1600-1800 об/ч находятся в зоне повышенного риска получения внутренних дефектов заготовки, которые обусловлены условиями затрудненного питания внутренних областей заготовки жидким металлом [7]. Это связано с тем фактом, что заготовка начинает двигаться вверх после достижения нижней критической

точки колеса. Соответственно металлостатическое давление в зумпфовой (конечной) зоне на заготовку становится меньше. Для этого критического диапазона весьма важным фактором является температура перегрева меди при разливке, поскольку при ее увеличении возрастает протяженность зумпфовой зоны.

Наиболее эффективными (с точки зрения производительности и качества заготовки) значениями скорости вращения колеса является диапазон 1450-1600 об/ч. В этом случае затвердевание заготовки завершается в нижней области колеса в зоне интенсивного охлаждения водой, что позволяет исключить получение внутренних дефектов заготовки (рисунок 5).

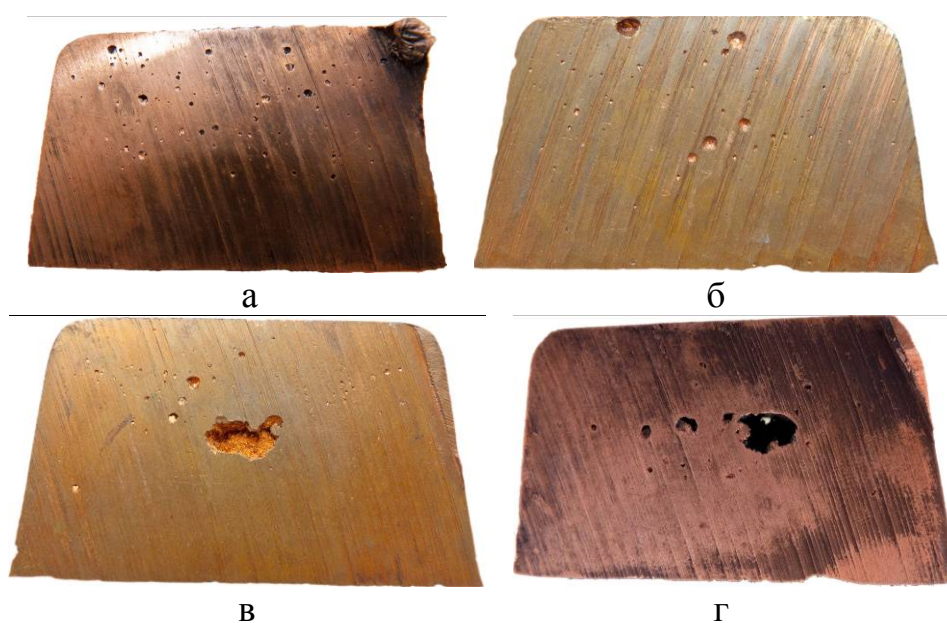


Рисунок 5 – Внутренние дефекты медной заготовки разлитой со скоростью 1500 об/ч (а), 1550 об/ч (б), 1750 об/ч (в) и 1850 об/ч (г)

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет имитировать затвердевание медной заготовки на колесе в зависимости от скорости вращения колеса, температуры разливки, условий охлаждения и пр. Важнейшим элементом моделирования является определение положения границы жидкой фазы на конечной стадии затвердевания. Фактически эта информация позволяет внести ограничения в части скорости разливки и оптимизировать качество заготовки. Для обеспечения гарантированного качества заготовки (в том числе внутренних объемов) в процессе разливки меди на колесо необходимо строго соблюдать совокупность таких неразрывно связанных между собой технологических параметров литья как: скорость движения заготовки, профиль кристаллизатора, температура разливаемой меди, которые учитывают особен-

ности формирования твердой корочки в условиях используемого колеса. Целесообразно осуществлять контроль профиля рабочей полости колеса и определить допустимые отклонения в износе профиля. При этом отклонение от номинальных параметров литья может привести к неравномерному контакту затвердевающей корочки со стенкой колеса, что может стать причиной возникновения дефектов геометрической формы заготовки. Также изменение профиля полости колеса может стать причиной деформации корочки и приводить к повреждению заготовки.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение адекватности разработанной математической модели в производственных условиях, а также математическое моделирование влияния профиля рабочей полости колеса и протяженности зоны водяного охлаждения на возникновение дефектов геометрической формы и качество получаемой продукции.

Библиографический список

1. Шутов И.В. Литейно-прокатный модуль для получения катанки из рафинированной меди / И.В. Шутов, А.Н. Смирнов, С.М. Волков, С.В. Куберский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 6. – С.44-46.

2. Arderiu O.G. Continuous Copper Rod Production from 100% Scrap / O.G. Arderiu, G. Properzi // *Proc. 65th Annual Convention of the Wire Association International. Atlanta, Georgia, USA, March 1995*. – *Wire Journal International*, 1996. – P.75-82.

3. Kubo K. Mathematical Modeling of Porosity Formation in Solidification / K. Kubo, R.D. Pehlke // *Metallurgical Transaction B*. – 1985. Vol. 16B. – № 3. – P.359-366.

196 4. Kumar A. A Mathematical Model of Single Roll Strip Caster Based on Macroscopic Enthalpy Balances / A. Kumar, S.P. Mehrotra // *Steel Research*. – 1991. – Vol. 62. – P.164-170.

5. Takeshita K. Thermal Contact during the Cooling by the Single Roller Chill Block Casting / K. Takeshita, P.H. Shingu // *Transactions of the Japan Institute of Metals*. – 1986. – Vol.27. – № 6. – P.454-462.

6. Li G. Transient Thermal Model of the Continuous Single-Wheel Thin-Strip Casting Process / G. Li, B.G. Thomas // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 1996. – Vol. 27B. № 3. – P.509-525.

7. Гридін С.В. Дослідження явищ усадки при формуванні мідних зливків / С.В. Гридін, Д.В. Спирідонов, Ю.Д. Савенков, А.Н. Смірнов // *Металознавство та обробка металів*. – 2009. – №2. – С.35-39.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.