



The temperatures of the round ingot, produced in the machine of continuous casting with bending radius 5 meters, are calculated by means of numerical calculation. The dependence of the temperature in the field of ingot cutting on speed of the ingot moving and coefficients of the zones of primary and secondary cooling is determined.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, В. А. МАТОЧКИН, РУП «БМЗ», Д. М. КУКУЙ, БНТУ,  
М. А. МУРИКОВ, А. В. ДЕМИН, РУП «БМЗ», О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 519:669.27

## ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КРУГЛОГО СЛИТКА В ОБЛАСТИ РАСКРОЯ ПРИ ЕГО ВЫТЯЖКЕ НА МАШИНЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК МАЛОГО РАДИУСА

Известно, что при получении слитков на некоторых машинах непрерывной разливки стали возникает необходимость в достижении требуемой температуры поверхности слитка в области его раскроя. В частности, на Белорусском металлургическом заводе на МНЛЗ-1 технологически должна обеспечиваться температура в интервале 850–900°C в области раскроя слитка на участке выпрямления. Представляет научный и практический интерес оценить теоретически температуру поверхности круглой заготовки в области ее резки для различных технологических режимов вытяжки.

Целью настоящей работы является исследование влияния технологических факторов (скорости вытяжки слитка, температуры заливки, степени охлаждения слитка в кристаллизаторе и зонах вторичного охлаждения) на температуру поверхности круглого слитка в области его раскроя.

В качестве метода для определения температуры использовали математические модели, представленные в [1–5]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c(T)\rho} \left( F_x + F_y + F_z + Q_{кр} \frac{\partial \rho_{sol}}{\partial \tau} \right), \quad (1)$$

$$F_i = \begin{cases} \frac{\partial \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial i} \right)}{\partial i}, & \text{если } R(x, y, z) \in \Omega_M, \\ \frac{\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial i} - k(T - T_{cp})}{\partial i}, & \text{если } R(x, y, z) \in \Omega_{M-cp}, \end{cases} \quad (2)$$

$T$  — температура в точках  $x, y, z$  слитка;  $T_{cp}$  — температура внешней среды (постоянная величина

— 25°C);  $\tau_i$  — время;  $\lambda(T)$  — коэффициент теплопроводности материала при температуре  $T$ ;  $c(T)$  — удельная теплоемкость материала при температуре  $T$ ;  $\rho_{sol}$  — плотность твердой фазы;  $\rho_{lic}$  — плотность жидкой фазы;  $\rho = \rho_{sol} + \rho_{lic}$  — относительная плотность материала;  $x, y, z$  — декартовы координаты;  $Q_{кр}$  — удельная теплота кристаллизации металла;  $k$  — коэффициент теплоотдачи поверхности металла в охлаждающую среду;  $\Omega_M$  — пространство точек металла;  $\Omega_{M-cp}$  — пространство точек границы металл–среда.

На основе уравнений (1) и (2), используя конечно-разностные аппроксимации, были проведены расчеты температурного поля слитка, движущегося с заданной скоростью в МНЛЗ-1, используемой на БМЗ. В качестве основного рассчитываемого параметра использовали температуру поверхности слитка  $T_L=13$ . Уровень скоростей вытяжки принимали равным  $v=2,5, 3,0, 3,5$  м/с. Диаметр круглых заготовок выбирали 80, 100, 120 и 140 мм. В качестве исходных технологических параметров (размеры рассчитываемой схемы соответствуют МНЛЗ-1) использовали:

- коэффициенты теплоотвода в кристаллизаторе — 2400; 3200; 4000 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- коэффициенты теплоотвода зоны 1 — 1500; 2000; 2500 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- коэффициенты теплоотвода зоны 2 — 1200; 1600; 2000 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- коэффициенты теплоотвода зоны 3 — 1100; 1466; 1833 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- коэффициенты теплоотвода на воздухе — 150 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- коэффициенты теплоотвода роликов — 800 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- температура охлаждаемого ролика — 200°C;
- температура неохлаждаемого ролика — 600°C.

На рис. 1 показана схема моделируемого процесса. На рисунке видно положение анализируемой температуры, которая находится на расстоянии 13 м от начала кристаллизатора. В дальнейшем эта температура будет обозначаться как  $T_{L=13}$ .

На рис. 2 приведена зависимость температуры поверхности  $T_{L=13}$  от диаметра круглой заготовки и скоростей вытяжки для стали Ст20 при следующих тепловых условиях: температура заливки  $T=1550-1560$  °С, теплоотвод в кристаллизаторе  $K_{кр} = 2400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), теплоотвод в первой, второй и третьей зонах охлаждения  $K_{31} = 1500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $K_{32} = 1200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $K_{33} = 1100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) соответственно. На рисунке горизонтальная линия – это критическая температура слитка на участке  $L=13$  м, ниже которой могут возникнуть проблемы раскря слитка из-за низкой пластичности. Из рис. 2, а видно, что при температуре заливки  $T=1560$  °С для всех скоростей вытяжки температура поверхности рассчитанных заготовок больше 900°С. Как видно из рис. 2, б, картина изменения температуры поверхности  $T_{L=13}$  при температуре заливки  $T=1550$  °С для слитков диаметром  $d=80-140$  мм и скоростей вытяжки  $v=2,5-3,5$  м/мин не изменилась.

На следующем этапе моделирования были изменены условия охлаждения в кристаллизаторе от  $K_{кр} = 2400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) до  $K_{кр} = 3200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (в процентном отношении – на 33%) для различных диаметров круглых заготовок из стали Ст20 и скоростей вытяжки  $v=2,5-3,5$  м/мин. Температура заливки оставалась постоянной  $T=1550$  °С. Как видно из рис. 3, а, температура поверхности  $T_{L=13}$  снизилась до значений ниже критических для заготовки диаметром  $d=80$  мм, что может создать проблемы при раскря слитка. В целом картина изменения зависимости температуры поверхности  $T_{L=13}$  от диаметра заготовок практически не изменилась. Далее было промоделировано изменение зависимости температуры поверхности  $T_{L=13}$  при увеличении теплоотвода от зон вторичного охлаждения. Интенсивность охлаждения в зонах вторичного охлаждения заготовки была увеличена на 33% (от 1500 до 2000 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) в ЗВО-1, на 33% (от 1200 до 1600 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) в ЗВО-2, на 33% (от 1100 до

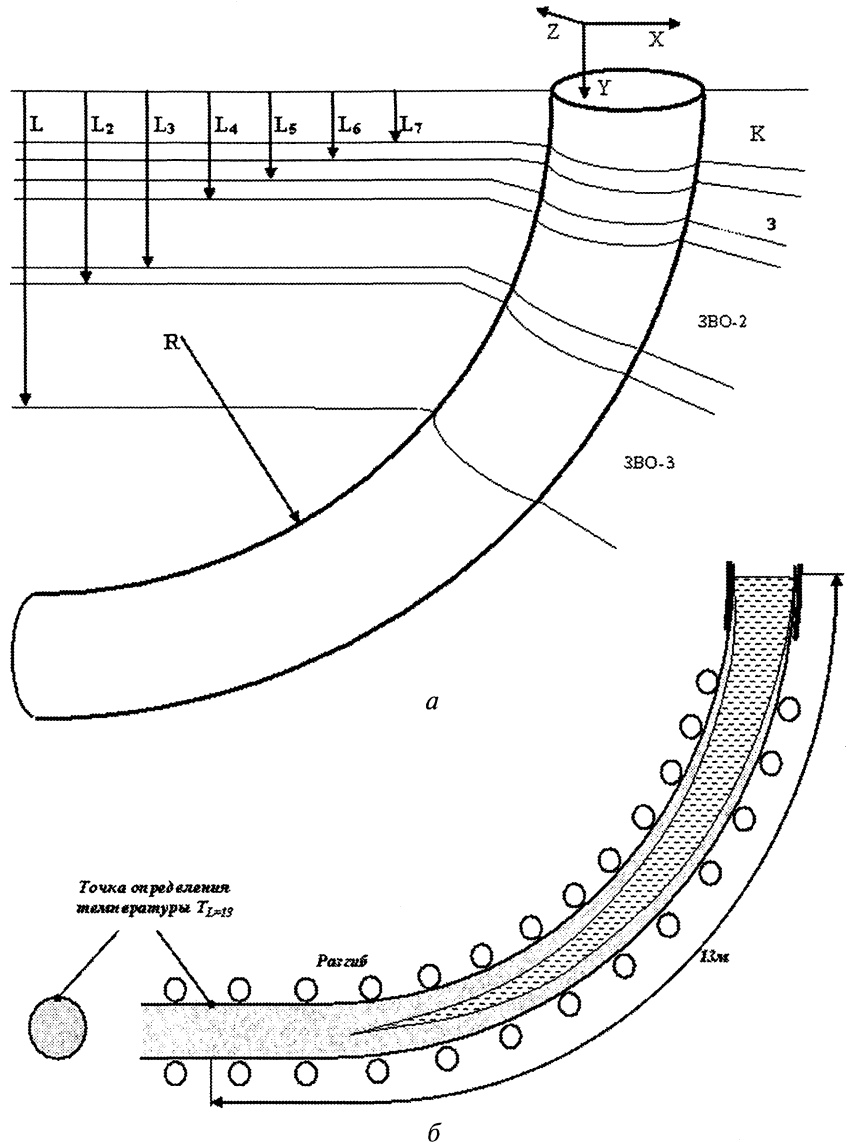


Рис. 1. Схема кристаллизующегося круглого слитка в машине непрерывного литья заготовок: а – с кристаллизатором (К) и зонами вторичного охлаждения (ЗВО-1, ЗВО-2, ЗВО-3):  $L_1 = 5,126$  м;  $L_2 = 2,606$  м;  $L_3 = 2,528$  м;  $L_4 = 1,088$  м;  $L_5 = 1,010$  м;  $L_6 = 0,880$  м;  $L_7 = 0,780$  м;  $R = 5$  м; б – с роликми, положением жидкой фазы и расчетной точкой температуры  $T_{L=13}$

1466 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) в ЗВО-3. Результаты моделирования показаны на рис. 3, б. Как видно из рисунка, увеличение интенсивности охлаждения уменьшает температуру поверхности  $T_{L=13}$  и переводит ее для заготовки диаметром  $d=80$  мм за критическую область при скорости вытяжки  $v=2,5$  м/мин. Однако для скорости  $v=3,0$  и 3,5 м/мин температура поверхности  $T_{L=13}$  находится выше критической для всех рассчитанных заготовок с сечением в диаметре  $d=80-140$  мм при заданных тепловых режимах, что делает возможным раскря слитка.

На следующем этапе было промоделировано изменение температуры поверхности  $T_{L=13}$  при увеличении теплоотвода от поверхности кристаллизатора и зон вторичного охлаждения для различных заготовок. Интенсивность охлаждения заготовки была увеличена на 25% (от 3200 до 4000 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) в кристал-

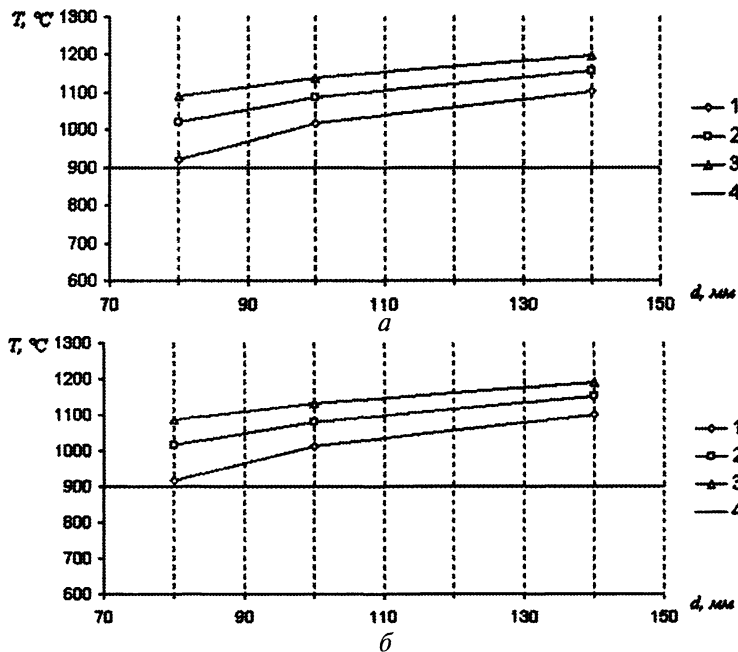


Рис. 2. Зависимость изменения температуры поверхности  $T_{L=13}$  слитка из стали Ст20 от диаметра заготовки для разных скоростей вытяжки (1 –  $v=2,5$  м/мин; 2 – 3,0; 3 – 3,5 м/мин; 4 – температурная граница области допустимых значений) при температурах заливки  $T=1560$  °С (а) и  $T=1550$  °С (б). Расчеты соответствуют коэффициентам теплоотвода в кристаллизаторе  $K_{кр}=2400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и зонах вторичного охлаждения  $K_{31}=1500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $K_{32}=1200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $K_{33}=1100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

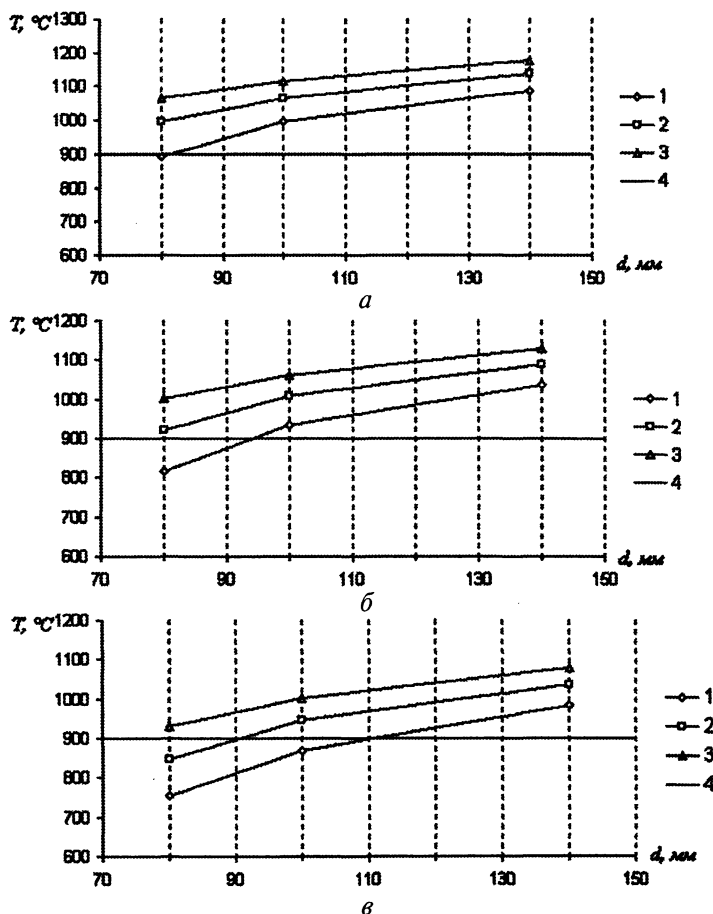


Рис. 3. Зависимость изменения температуры поверхности  $T_{L=13}$  слитка из стали Ст20 от диаметра заготовки для скоростей вытяжки (1 –  $v=2,5$  м/мин; 2 – 3,0; 3 – 3,5 м/мин; 4 – температурная граница допустимых значений) при температуре заливки  $T=1550$  °С и различных условиях теплоотвода: а –  $K_{кр}=3200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-1 –  $K_{31}=1500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-2 –  $K_{32}=1200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-3 –  $K_{33}=1100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); б –  $K_{кр}=3200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-1 –  $K_{31}=2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-2 –  $K_{32}=1600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-3 –  $K_{33}=1466$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); в –  $K_{кр}=4000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-1 –  $K_{31}=2500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-2 –  $K_{32}=2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-3 –  $K_{33}=1833$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

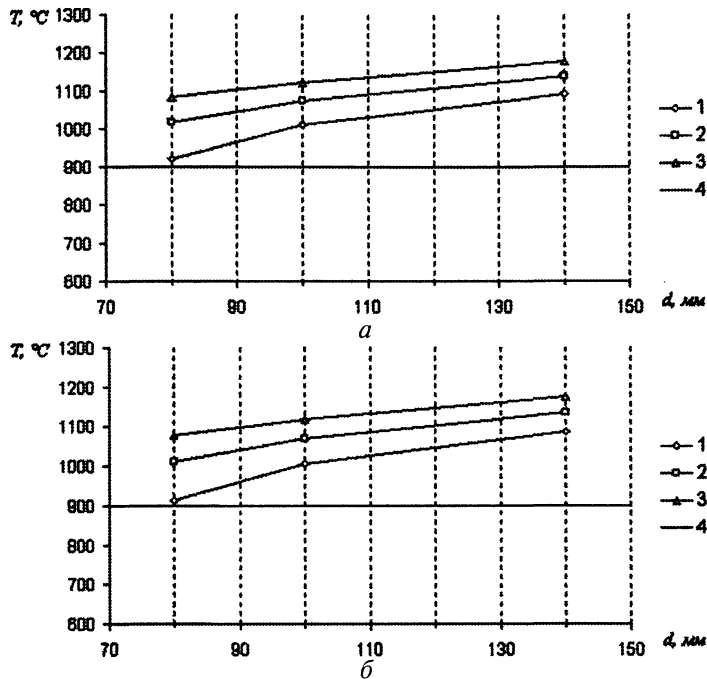


Рис. 4. Зависимость изменения температуры поверхности  $T_{L=13}$  слитка из стали 40X от диаметра заготовки для разных скоростей вытяжки (1 –  $v=2,5$  м/мин; 2 – 3,0; 3 – 3,5 м/мин; 4 – температурная граница допустимых значений) при температурах заливки  $T=1530$  °С (а) и  $T=1520$  °С (б). Расчеты соответствуют коэффициентам теплоотвода в кристаллизаторе  $K_{кр} = 2400$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ) и зонах вторичного охлаждения  $K_{31}=1500$  Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $K_{32}=1200$  Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $K_{33}=1100$  Вт/( $m^2 \cdot K$ )

лизаторе, на 25% (от 2000 до 2500 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-1, на 25% (от 1600 до 2000 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-2, на 25% (от 1466 до 1833 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-3. Как видно из рис. 3, в, увеличение интенсивности охлаждения снижает температуру поверхности  $T_{L=13}$ . Причем на скорости  $v=3,0$  м/мин для заготовок диаметром  $d=80$  мм температура  $T_{L=13}$  снижается ниже критической при перечисленных выше тепловых режимах. При скорости  $v=2,5$  м/мин температура поверхности  $T_{L=13}$  снижается ниже критической для заготовок диаметром  $d=80, 90$  и 100 мм.

Таким образом, приведенные результаты расчетов показывают возможность получения круглой заготовки диаметром  $d=80-140$  мм при различных скоростях вытяжки и интенсивности охлаждения заготовки из стали Ст20.

На рис. 4 показана зависимость температуры поверхности  $T_{L=13}$  от диаметра круглой заготовки и скоростей вытяжки  $v=2,5-3,5$  м/мин для стали 40X. Из рис. 4, а видно, что при температуре заливки  $T=1530$ °С для всех скоростей вытяжки температура поверхности рассчитанных заготовок больше 900 °С. Далее температура заливки расплава была на 10°С уменьшена ( $T=1520$  °С). На рис. 4, б представлена зависимость температуры поверхности  $T_{L=13}$  для тепловых условий: теплоотвод в кристаллизаторе  $K_{кр}=2400$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ), теплоотвод в первой, второй и третьей зонах охлаждения  $K_{31}=1500$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ),  $K_{32}=1200$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ),  $K_{33}=1100$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ) соответственно. Как видно из рис. 4, б, картина изменения температуры поверхности  $T_{L=13}$

для слитков диаметром  $d=80-140$  мм и скоростей  $v=2,5-3,5$  м/мин не изменилась.

Как видно из представленных данных, получение заготовок диаметром  $d=80-140$  мм при скорости  $v=2,5-3,5$  м/мин возможно на МНЛЗ-1 при данных тепловых режимах.

На следующем этапе моделирования были изменены условия охлаждения в кристаллизаторе от  $K_{кр}=2400$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ) до  $K_{кр}=3200$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ) (в процентном отношении – на 33%) для различных скоростей вытяжки  $v=2,5-3,5$  м/мин и диаметров круглых заготовок из стали 40X. Как видно из рис. 5, а, температура поверхности  $T_{L=13}$  снизилась до значений ниже критических для заготовки диаметром  $d=80$  мм, что может создать проблемы при раскросе слитка. В целом картина изменения зависимости температуры поверхности  $T_{L=13}$  от диаметра заготовок практически не изменилась.

Далее была рассчитана зависимость температуры поверхности  $T_{L=13}$  при увеличении теплоотвода от зон вторичного охлаждения. Интенсивность охлаждения заготовки была увеличена на 33% (от 1500 до 2000 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-1, на 33% (от 1200 до 1600 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-2, на 33% (от 1100 до 1466 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-3. Результаты моделирования приведены на рис. 5, б. Как видно из рисунка, увеличение интенсивности охлаждения уменьшает температуру поверхности  $T_{L=13}$  и переводит ее для заготовки диаметром  $d=80-95$  мм в критическую область для скорости вытяжки  $v=2,5$  м/мин. Однако для скорости  $v=3,0$  и 3,5 м/мин температура поверхности  $T_{L=13}$  нахо-

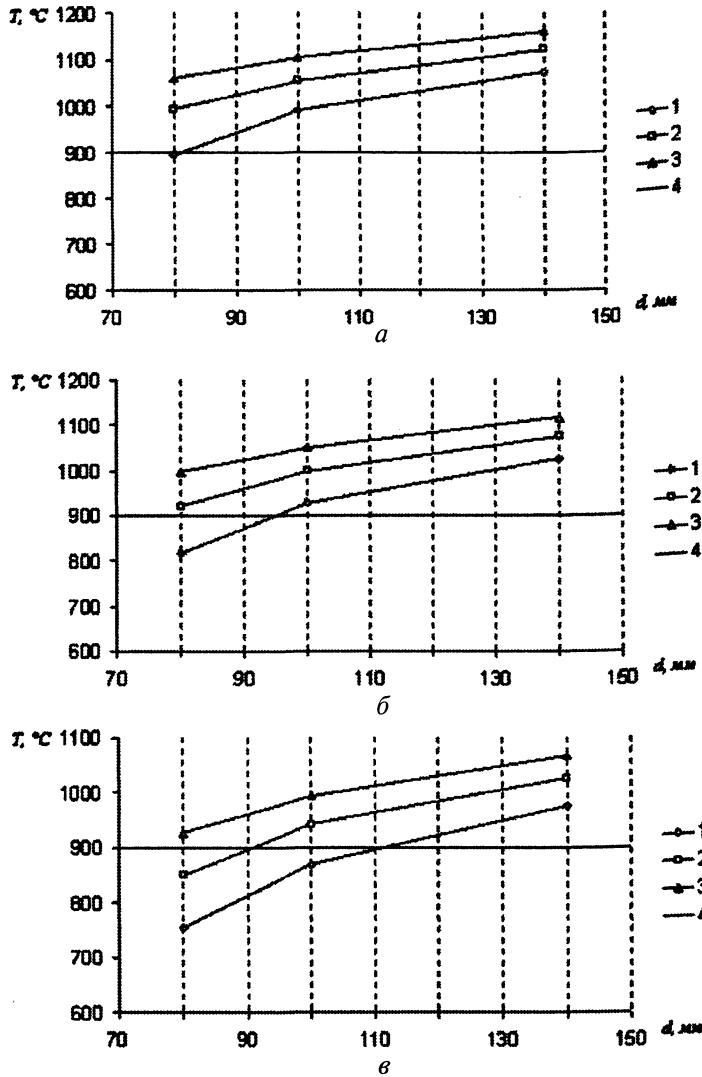


Рис. 5. Зависимость изменения температуры поверхности  $T_{L=13}$  слитка из стали 40X от диаметра заготовки для разных скоростей вытяжки (1 –  $v=2,5$  м/мин; 2 – 3,0; 3 – 3,5 м/мин; 4 – температурная граница допустимых значений) при температуре заливки  $T=1520$  °C и различных условиях теплоотвода: а –  $K_{кр}=3200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-1 –  $K_{31}=1500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-2 –  $K_{32}=1200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-3 –  $K_{33}=1100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); б –  $K_{кр}=3200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-1 –  $K_{31}=2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-2 –  $K_{32}=1600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-3 –  $K_{33}=1466$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); в –  $K_{кр}=4000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-1 –  $K_{31}=2500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-2 –  $K_{32}=2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); ЗВО-3 –  $K_{33}=1833$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

дится выше критической для всех рассчитанных заготовок с сечением в диаметре  $d=80-140$  мм при заданных тепловых режимах, что делает возможным раскрой слитка. Далее было промоделировано изменение зависимости температуры поверхности  $T_{L=13}$  при дальнейшем увеличении теплоотвода от поверхности кристаллизатора и зон вторичного охлаждения для различных заготовок. Интенсивность охлаждения заготовки была увеличена на 25% (от 3200 до 4000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) в кристаллизаторе, на 25% (от 2000 до 2500 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) в ЗВО-1, на 25% (от 1600 до 2000 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) в ЗВО-2, на 25% (от 1466 до 1833 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) в ЗВО-3. Как видно из рис. 5, в, увеличение интенсивности охлаждения снижает температуру поверхности  $T_{L=13}$ . Причем на скорости  $v=3,0$  м/мин для заготовок диаметром  $d=80-90$  мм температура  $T_{L=13}$  снижается ниже критической при перечис-

ленных выше тепловых режимах. При скорости  $v=2,5$  м/мин температура поверхности  $T_{L=13}$  снижается ниже критической для заготовок диаметром  $d=80-110$  мм. Приведенные результаты моделирования показывают возможность получения круглой заготовки диаметром  $d=80-140$  мм при различных скоростях вытяжки для стали 40X.

На рис. 6 представлена зависимость температуры поверхности  $T_{L=13}$  от диаметра круглой заготовки и скоростей вытяжки  $v=2,5-3,5$  м/мин для стали ШХ15СГ. Из рис. 6, а видно, что для всех скоростей вытяжки при температуре заливки  $T=1460$  °C температура поверхности рассчитанных заготовок больше 900 °C кроме заготовки диаметром  $d=80$  мм. Далее температура заливки расплава была на 10 °C уменьшена ( $T=1450$  °C) и рассчитана  $T_{L=13}$  для слитков разного диаметра и скоростей вытяжки при теплоотводе в кристаллизаторе  $K_{кр}=2400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

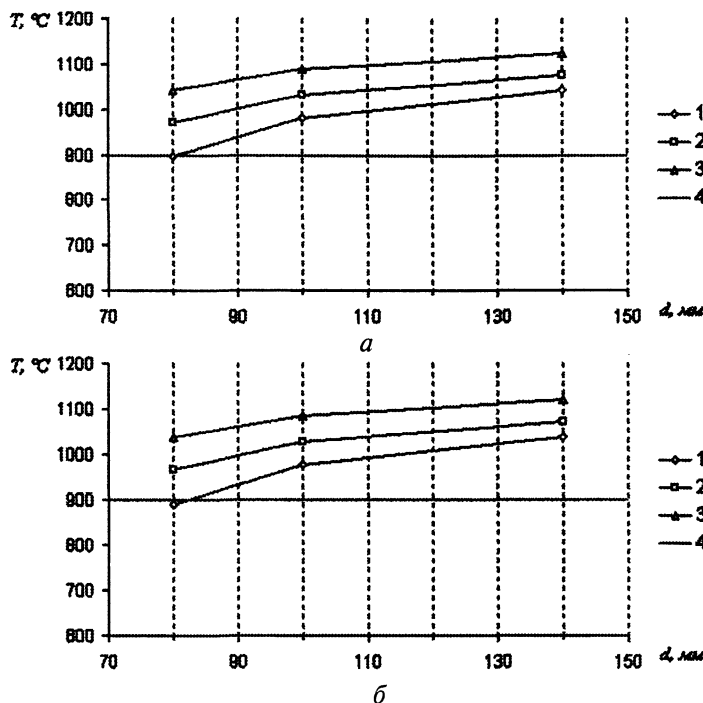


Рис. 6. Зависимость изменения температуры поверхности  $T_{L=13}$  слитка из стали ШХ15СГ от диаметра заготовки для разных скоростей вытяжки (1 –  $v=2,5$  м/мин; 2 – 3,0; 3 – 3,5 м/мин; 4 – температурная граница допустимых значений) при температурах заливки  $T=1460$  °С (а) и  $T=1450$  °С (б). Расчеты соответствуют коэффициентам теплоотвода в кристаллизаторе  $K_{кр}=2400$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ) и зонах вторичного охлаждения  $K_{31}=1500$  Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $K_{32}=1200$  Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $K_{33}=1100$  Вт/( $m^2 \cdot K$ )

и теплоотводе в первой, второй и третьей зонах охлаждения  $K_{31}=1500$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ),  $K_{32}=1200$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ),  $K_{33}=1100$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ) соответственно (рис. 6, б). Как видно из рис. 6, б, картина изменения температуры поверхности  $T_{L=13}$  для слитков диаметром  $d=80-140$  мм и скоростей  $v=2,5-3,5$  м/мин не изменилась.

Таким образом, можно сделать вывод, что получение заготовок диаметром  $d=90-140$  мм при скорости вытяжки  $v=2,5-3,5$  м/мин возможно на МНЛЗ-1 при данных тепловых режимах. Для заготовок диаметром  $d=80$  мм скорость вытяжки  $v=2,5$  м/мин является критической.

На следующем этапе моделирования были изменены условия охлаждения в кристаллизаторе от  $K_{кр}=2400$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ) до  $K_{кр}=3200$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ) (в процентном отношении – на 33%) для различных скоростей вытяжки  $v=2,5-3,5$  м/мин и диаметров круглых заготовок из стали ШХ15СГ. Как видно из рис. 7, а, температура поверхности  $T_{L=13}$  снизилась до значений ниже критических для заготовок диаметром  $d=80-85$  мм, что может создать проблемы при раскросе слитка. В целом картина изменения зависимости температуры поверхности  $T_{L=13}$  от диаметра заготовок практически не изменилась.

Далее интенсивность охлаждения заготовки была увеличена на 33% (от 1500 до 2000 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-1, на 33% (от 1200 до 1600 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-2, на 33% (от 1100 до 1466 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-3. Результаты моделирования приведены на

рис. 7, б. Как видно из рисунка, увеличение интенсивности охлаждения уменьшает температуру поверхности  $T_{L=13}$  и переводит ее для заготовки диаметром  $d=80-100$  мм за критическую область для скорости вытяжки  $v=2,5$  м/мин. Однако для скорости  $v=3,0$  и 3,5 м/мин температура поверхности  $T_{L=13}$  находится выше критической для всех рассчитанных заготовок с сечением в диаметре  $d=85-140$  мм при заданных тепловых режимах, что делает возможным раскрой слитка. Для заготовки диаметра  $d=80$  мм скорость  $v=3,0$  м/мин является критической.

Далее интенсивность охлаждения заготовки была увеличена на 25% (от 3200 до 4000 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в кристаллизаторе, на 25% (от 2000 до 2500 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-1, на 25% (от 1600 до 2000 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-2, на 25% (от 1466 до 1833 Вт/( $m^2 \cdot K$ )) в ЗВО-3. Как видно из рис. 7, в, увеличение интенсивности охлаждения снижает температуру поверхности  $T_{L=13}$ . Причем на скорости  $v=3,0$  м/мин для заготовок диаметром  $d=80-100$  мм температура  $T_{L=13}$  снижается ниже критической при вышеперечисленных тепловых режимах. При скорости  $v=2,5$  м/мин температура поверхности  $T_{L=13}$  снижается ниже критической для всех заготовок диаметром  $d=80-140$  мм, что делает данную скорость нетехнологичной.

Приведенные результаты моделирования показывают возможность получения круглой заготовки диаметром  $d=80-140$  мм при различных скоростях вытяжки слитка из стали ШХ15СГ.

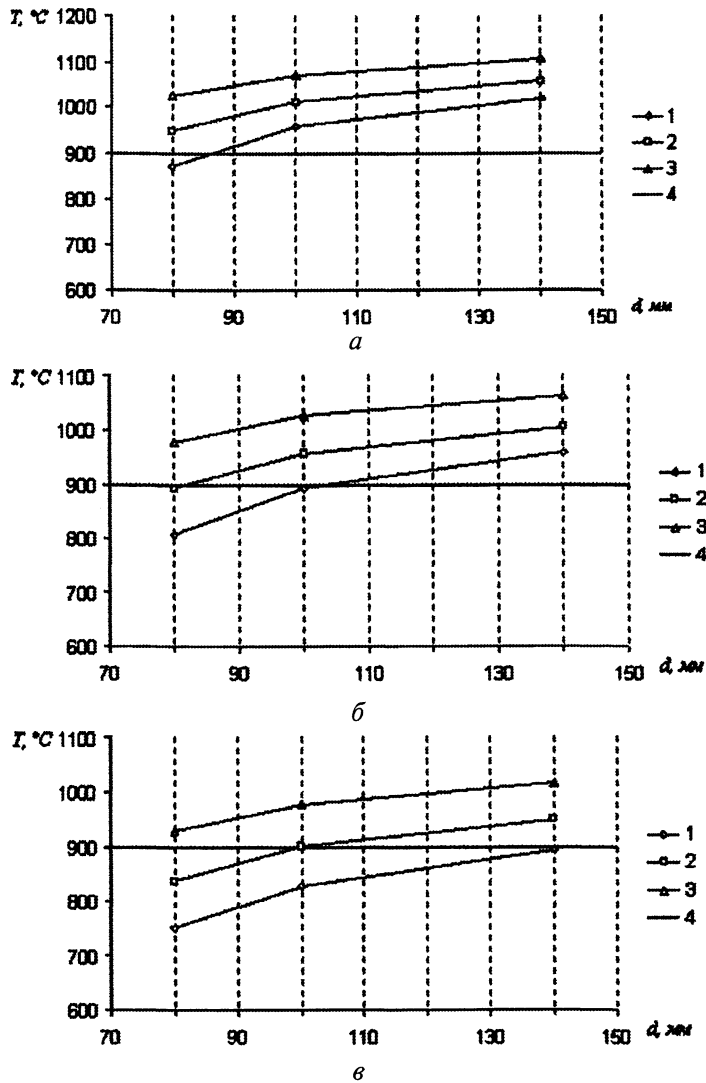


Рис. 7. Зависимость изменения температуры поверхности  $T_{L=13}$  слитка из стали ШХ15СГ от диаметра заготовки для разных скоростей вытяжки (1 –  $v=2,5$  м/мин; 2 – 3,0; 3 – 3,5 м/мин; 4 – температурная граница допустимых значений) при температуре заливки  $T=1450$  °С и различных условиях тепловода: а –  $K_{кр}=3200$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); ЗВО-1 –  $K_{31}=1500$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); ЗВО-2 –  $K_{32}=1200$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); ЗВО-3 –  $K_{33}=1100$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); б –  $K_{кр}=3200$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); ЗВО-1 –  $K_{31}=2000$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); ЗВО-2 –  $K_{32}=1600$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); ЗВО-3 –  $K_{33}=1466$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); в –  $K_{кр}=4000$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); ЗВО-1 –  $K_{31}=2500$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); ЗВО-2 –  $K_{32}=2000$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); ЗВО-3 –  $K_{33}=1833$  Вт/( $m^2 \cdot K$ )

### Литература

1. Чичко А.Н., Кукуй Д.М., Андрианов Н.В., Яцкевич Ю.В., Чичко О.И. Моделирование влияния охлаждаемых и неохлаждаемых роликов на температуры и напряжения поверхности промышленного слитка в зоне вторичного охлаждения // Литье и металлургия. 2003. №3. С. 131–138.
2. Чичко А.Н., Кукуй Д.М., Соболев В.Ф. и др. Компьютерная система «ПроНРС» и трехмерное моделирование распределения температур, напряжений и углерода в процессе непрерывной разливки стали // Литье и металлургия. 2002. №3. С. 21–27.
3. Чичко О.И., Соболев В.Ф., Анисович Г.А., Чичко А.Н. О методах компьютерного анализа напряже-

ний и деформаций трехмерной детали, подвергнутой термической обработке // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. №4. С. 24–29.

4. Чичко А.Н., Андрианов Н.В., Демин А.В. и др. Численные расчеты температур и напряжений в кристаллизующемся слитке из стали 20ХН3А размером 300x400 мм для различных условий охлаждения // Литье и металлургия. 2004. № 3. С. 131–135.

5. Чичко А.Н., Андрианов Н.В., Демин А.В. и др. Компьютерное моделирование на основе программы «ПроНРС-2» продольных напряжений в слитке, охлаждаемом плоскофакельными форсунками // Литье и металлургия. 2004. № 2. С. 10–18.