



The methods and results of analysis on influence of technological factors of the ingot stretching process on dynamics of the hard skin thickness are presented. The analysis of the dynamics of the round ingots hard skin of different diameters at changing of stretching rapidity as applied to MNLZ used at BMZ.

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

УДК 519:669.27

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТВЕРДОЙ КОРКИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КРУГЛОГО СЛИТКА В МНЛЗ

Одним из основных методов расчета толщины твердой корки при кристаллизации слитка является закон квадратного корня. Однако он не учитывает целый ряд особенностей кристаллизации, в частности, связанных с размером и пространственной кристаллизацией слитка, а также с изменениями охлаждения во времени, которые происходят при движении слитка через зоны вторичного охлаждения. Развитие математического моделирования и компьютерных технологий позволяет рассчитывать толщину корки, учитывая особенности кристаллизации слитка в объеме, используя численное моделирование процесса на основе теплофизических моделей. Необходимость исследования динамики корки слитка в кристаллизаторе МНЛЗ связана с тем, что от толщины корки зависит уровень напряжений и возможность образования многочисленных дефектов, что делает проблему ее расчета актуальной.

Цель настоящей работы — компьютерный анализ влияния скорости вытяжки и условий охлаждения на толщину твердой корки, рассчитанную на основе уравнения теплопроводности для различных вариантов круглого сечения слитков, которые могут быть получены в условиях оборудования РУП «БМЗ».

В основу исследования динамики изменения толщины корки в процессе вытяжки слитка положен математический аппарат для численного решения уравнения теплопроводности [1–5]. Алгоритм решения задачи основывался на использовании конечно-разностных аппроксимаций уравнения теплопроводности. Первоначально определяли температурное поле движущегося слитка, по которому рассчитывали соотношение жидкой и твердой фазы в нем по толщине. Далее определяли толщину твердой корки по специально разработанной методике.

На рис. 1 показана схема изменения толщины корки круглого слитка в центральном сечении кристаллизатора. Для расчета толщины корки использовали следующую методику. Рассмотрим поперечное сечение слитка на выходе из кристал-

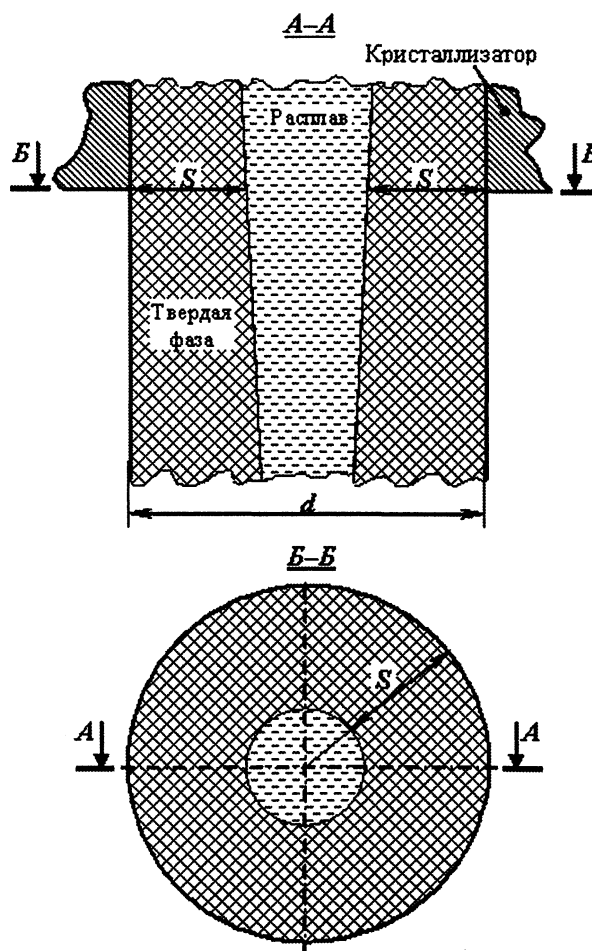


Рис. 1. Толщина слоя твердой фазы на выходе из кристаллизатора

лизатора (Б-Б, рис. 1). Площадь этого сечения определяется как $S_h = \pi d^2/4$, где d – диаметр слитка. Площадь, занятая жидкой фазой, рассчитывается как $S_f = \pi(d/2 - s)^2$, где s – искомая толщина слоя твердой фазы. Тогда имеет место соотношение

$$\frac{S_l}{S_s} = \frac{\iint_{y=h} \rho_{lic}(x, y, z) dx dz}{\iint_{y=h} (\rho_{lic}(x, y, z) + \rho_{sol}(x, y, z)) dx dz}, \quad (1)$$

где h – координата выхода кристаллизатора.

Подставляя в соотношение (1) выражения для площадей и перейдя к дискретной форме, получаем выражение для определения толщины твердой фазы:

$$\frac{(d/2 - s)^2}{d^2/4} = \frac{\sum_{i,k} \rho_{lic}(x_i, h, z_k)}{\sum_{i,k} (\rho_{lic}(x_i, h, z_k) + \rho_{sol}(x_i, h, z_k))}. \quad (2)$$

Преобразовывая (2), окончательно получаем формулу для расчета толщины твердой корки:

$$s = \frac{d}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\sum_{i,k} \rho_{lic}(x_i, h, z_k)}{\sum_{i,k} (\rho_{lic}(x_i, h, z_k) + \rho_{sol}(x_i, h, z_k))}} \right). \quad (3)$$

На основе представленной выше методики была разработана программа, по которой были проведены исследования влияния скорости вытяжки, температуры заливки, коэффициента теплоотвода в кристаллизаторе на толщину затвердевающей корки. При этом учитывали три уровня скоростей, которые соответствовали конструкции МНЛЗ-3, используемой на БМЗ. В качестве материала слитка взяты стали Ст20, 40Х, ШХ15СГ. Каждой из них соответствовало два уровня температуры заливки. Коэффициент теплоотвода в кристаллизаторе первоначально составлял $K_{кр} = 2400$ Вт/(м²·К) и изменялся на 33% (3200 Вт/(м²·К)), на 66% (4000 Вт/(м²·К)), на 100% (4800 Вт/(м²·К)) относительно базового уровня. При этом все расчеты проводили для заготовок диаметром $d = 160, 200, 240$ мм.

На рис. 2–4 приведены результаты расчетов для сталей диаметрами заготовок 160, 200, 240 мм. Эти зависимости показывают влияние технологических факторов на динамику изменения твердой корки в процессе вытяжки слитка.

Установлено, что для круглой заготовки диаметром $d = 160$ мм для стали Ст20 при изменении скорости вытяжки с 0,8 до 1,2 м/мин происходит уменьшение корки на 29,3% при температуре заливки $T = 1550$ °С и теплоотводе в кристаллизаторе $K_{кр} = 1600$ Вт/(м²·К). На рис. 2, а приведена зависимость толщины корки в кристаллизаторе от

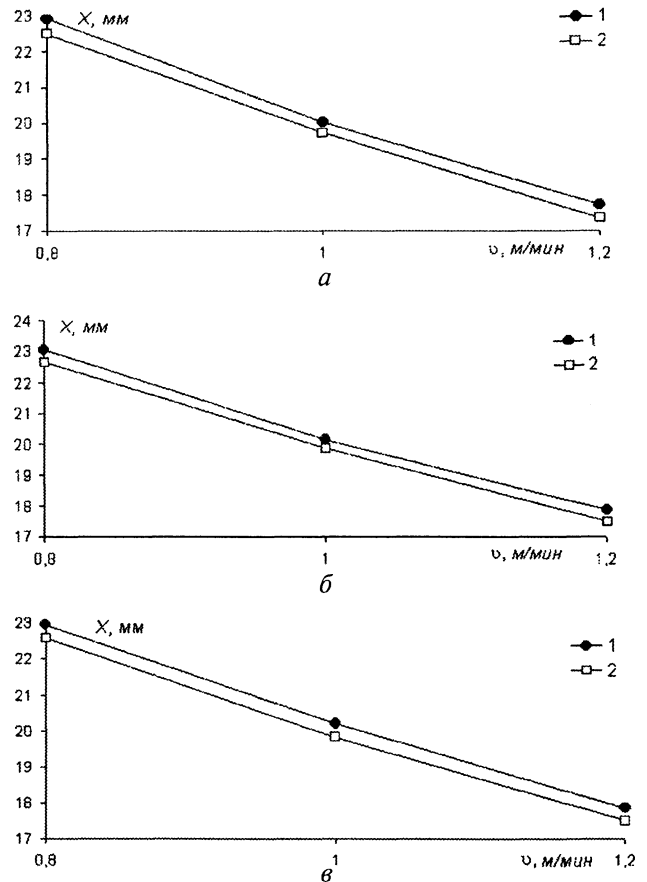


Рис. 2. Зависимость толщины слоя твердой фазы на выходе из кристаллизатора (теплоотвод в кристаллизаторе $K_{кр} = 1600$ Вт/(м²·К)) от скорости вытяжки заготовки диаметрами: а – $d = 160$ мм; б – 200; в – 240 мм (сталь Ст20, МНЛЗ-3) при температурах заливки: 1 – $T = 1550$ °С; 2 – $T = 1560$ °С

скорости вытяжки для заготовки диаметром $d = 160$ мм и коэффициенте теплоотвода в кристаллизаторе $K_{кр} = 1600$ Вт/(м²·К). Как видно из рисунка, толщина корки в кристаллизаторе уменьшается с увеличением скорости движения слитка. Аналогичные изменения в толщине корки происходят при температуре заливки $T = 1560$ °С. На рис. 2, б, в показаны зависимости толщины корки в кристаллизаторе от скорости вытяжки для заготовок диаметром 200 и 240 мм из стали Ст20 при коэффициенте теплоотвода в кристаллизаторе $K_{кр} = 1600$ Вт/(м²·К). Из рисунков видно, что толщина корки в кристаллизаторе уменьшается на 29 и на 28,5% с увеличением скорости движения слитка. Аналогичные изменения в толщине корки происходят при температуре заливки $T = 1560$ °С.

На рис. 3 представлены зависимости толщины корки в кристаллизаторе от скорости вытяжки для заготовок диаметром $d = 200$ мм для сталей Ст20, 40Х и ШХ15СГ при коэффициенте теплоотвода в кристаллизаторе $K_{кр} = 1600$ Вт/(м²·К). Из рисунка видно, что толщина корки в кристаллизаторе уменьшается на 28,4% для стали 40Х и на 27,7% для стали ШХ15СГ с увеличением скорости движения слитка для температур заливки

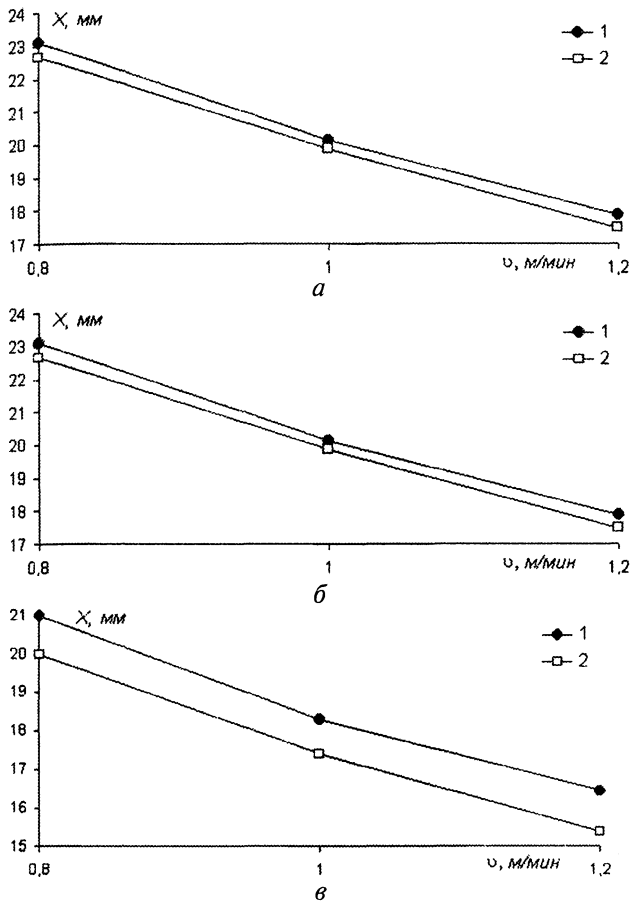


Рис. 3. Зависимость толщины слоя твердой фазы на выходе из кристаллизатора (теплоотвод в кристаллизаторе $K_{кр} = 1600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) от скорости вытяжки заготовки диаметром $d=200 \text{ мм}$ в МНЛЗ-3: а – сталь Ст20 при температуре заливки: 1 – $T=1550 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T=1560 \text{ }^\circ\text{C}$; б – сталь 40X при температуре заливки: 1 – $T=1520 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T=1530 \text{ }^\circ\text{C}$; в – сталь ШХ15СГ при температуре заливки: 1 – $T=1450 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T=1470 \text{ }^\circ\text{C}$

1520 и 1450 $^\circ\text{C}$ соответственно. Аналогичные изменения в толщине корки происходят при других температурах заливки.

На следующем этапе были проанализированы влияния теплоотвода в кристаллизаторе на изменение толщины корки. Использовали четыре уровня теплоотвода. На рис. 4 приведены зависимости толщины корки в кристаллизаторе при скорости вытяжки $v=0,8-1,2 \text{ м/мин}$ для заготовок диаметром $d=200 \text{ мм}$ для сталей Ст20, 40X и ШХ15СГ при различных коэффициентах теплоотвода в кристаллизаторе (МНЛЗ-3). Как видно из рисунка, увеличение интенсивности охлаждения слитка сдвигает толщину корки в сторону увеличения. Причем при скорости вытяжки $v=0,8 \text{ м/мин}$ ($d=200 \text{ мм}$, $T=1560 \text{ }^\circ\text{C}$, сталь Ст20) при переходе коэффициента теплоотвода от $K_{кр}=800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $K_{кр}=1200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ толщина корки увеличивается на 23,91%. При переходе коэффициента теплоотвода от $K_{кр}=800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $K_{кр}=1600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ толщина корки увеличивается на 37,83%, при переходе от $K_{кр}=800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $K_{кр}=2400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – на 56,9%. При скорости вытяжки $v=1 \text{ м/мин}$

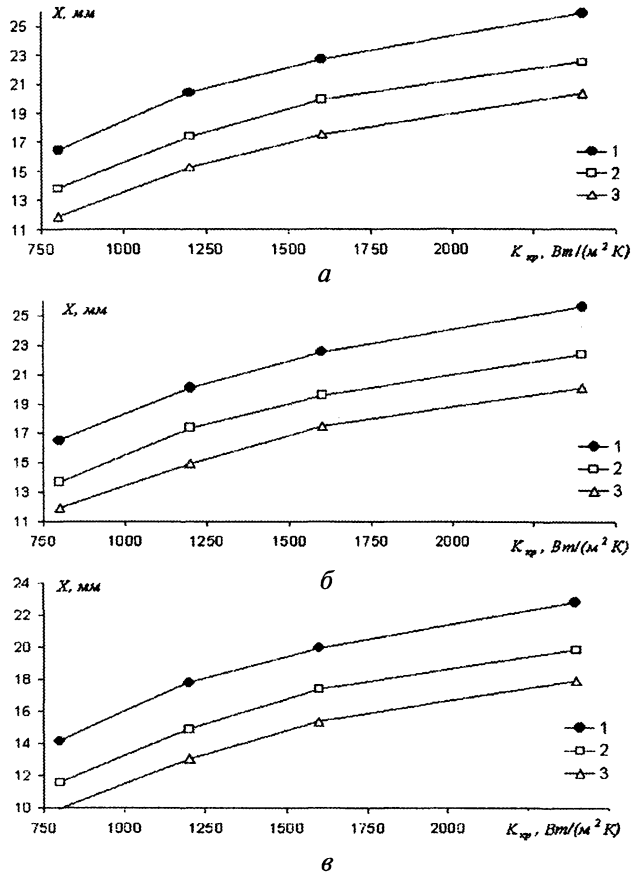


Рис. 4. Зависимость толщины слоя твердой фазы на выходе из кристаллизатора МНЛЗ-3 от интенсивности охлаждения для разных скоростей вытяжки (1 – $v=0,8 \text{ м/мин}$; 2 – 1,0; 3 – 1,2 м/мин) при температуре заливки: а – $T=1560 \text{ }^\circ\text{C}$ для стали Ст20; б – $T=1530 \text{ }^\circ\text{C}$ для стали 40X; в – $T=1470 \text{ }^\circ\text{C}$ для стали ШХ15СГ

($d=200 \text{ мм}$, $T=1530 \text{ }^\circ\text{C}$, сталь 40X, МНЛЗ-3) при переходе коэффициента теплоотвода от $K_{кр}=800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $K_{кр}=1200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ толщина корки увеличивается на 26,84%. При переходе коэффициента теплоотвода от $K_{кр}=800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $K_{кр}=1600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ толщина корки увеличивается на 42,96%, при переходе от $K_{кр}=800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $K_{кр}=2400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – на 63,23%. При скорости вытяжки $v=1 \text{ м/мин}$ ($d=200 \text{ мм}$, $T=1470 \text{ }^\circ\text{C}$, сталь ШХ15СГ, МНЛЗ-3) при переходе коэффициента теплоотвода от $K_{кр}=800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $K_{кр}=1200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ толщина корки увеличивается на 28,5%. При переходе коэффициента теплоотвода от $K_{кр}=800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $K_{кр}=1600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ толщина корки увеличивается на 49,9%, при переходе от $K_{кр}=800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $K_{кр}=2400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – на 71,4%.

Таким образом, проведенные исследования расчетов толщины корки в кристаллизаторе показывают линейный характер изменения толщины корки под влиянием коэффициента теплоотвода кристаллизатора. Влияние скорости вытяжки на динамику роста толщины корки также носит линейный характер. Это позволяет построить аппроксимационные полиномы для расчета

толщины корки в зависимости от технологических параметров.

Выводы

1. Расчетным путем установлено, что толщина слоя твердого металла (корки), образующегося в кристаллизаторе при движении слитка, слабо зависит от диаметра круглой заготовки и температуры заливки стали. Это делает возможным при рассмотрении толщины корки и динамики ее изменения использовать полученные закономерности для всех диаметров заготовок.

2. Расчетным путем установлено, что сталь 40X выделяется в худшую сторону по возможностям обеспечения требуемой толщины корки (требуется на 15% более интенсивное охлаждение). Стали Ст20 и ШХ15СГ практически совпадают по возможностям обеспечения требуемой толщины корки. Причиной этих закономерностей являются различия в теплофизических свойствах сталей.

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 «ПроНПС» 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 напряжений и деформаций трехмерной детали, подвергнутой термической обработке // *Весті 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 20ХНЗА размером 300х400 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 «ПроНПС-2» продольных напряжений в слитке, охлаждаемом плоскофакельными форсунками // *Литье и металлургия*. 2004. № 2. С. 10–18.