

Жижкина Н. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ НА ДВИЖЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕМСЯ СПЛАВЕ

Zhizhkina N. A.

THE RESEARCH OF CENTRIFUGAL FORCES' INFLUENCE AT NON-METALLIC INCLUDES' MOTION IN CRYSTALLIZED ALLOY

Работа посвящена процессу затвердения металла рабочего слоя массивных валков в условиях вращения. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что скорость кристаллизации такого сплава зависит от геометрических, кристаллизационных и температурных параметров отливки. Показано, что центробежные силы способствуют очищению горячего металла от неметаллических частиц. Определены минимально предельные диаметры неметаллических включений, которые могут беспрепятственно двигаться в кристаллизующемся слое в условиях центробежного литья.

Ключевые слова: валок, диаметр, неметаллическое включение, скорость, сплав, фронт кристаллизации, центробежное литье.

Введение

Валки относятся к числу ответственных деталей прокатного стана, качество которых предопределяют не только надежность, но и сортмент выпускаемой продукции, выход годного и расход материалов. Поэтому совершенствование конструкции прокатного инструмента является важным научно-практическим заданием.

Опыт производства валков показывает [1], что основными направлениями улучшения качества таких массивных изделий является применение новых сложнлегированных материалов и усовершенствование технологии их изготовления. Установлено, что одновременно обеспечить износостойкость рабочего слоя и прочность сердцевины валков возможно путем их литья центробежным методом.

Вместе с тем охлаждение и затверждение массивных отливок в условиях вращения характеризуются рядом технологических особенностей. Так, на начальном этапе мгновенно образуется твердая корка на поверхности отливки, а следом - газовый зазор между ней и кокилем. Затвер-

девшая оболочка испытывает гидравлическое давление вращающегося металла, что налагает дополнительные напряжения в корке и приводит к ее деформированию и возможному образованию горячих трещин на валковой поверхности [2]. В результате исследований установлено, что в рабочем слое центробежнолитых отливок могут наблюдаться несплошности макроструктуры в виде раковин и засоров. Основным фактором их образования является насыщение расплава газовыми и другими включениями. В работах [3, 4] показано, что центробежные силы способствуют очищению горячего металла от таких частиц за счет увеличения скорости их всплытия. Вместе с тем процессу очищения препятствует продвигающийся вглубь отливки фронт кристаллизации.

В связи с этим целью работы явилось исследование влияния процесса кристаллизации рабочего слоя центробежнолитых валков на очищение его металла от неметаллических включений. Для достижения поставленной в работе цели были решены следующие задачи:

- оценить скорость продвижения фронта кристаллизации высоколегированного сплава;
- определить минимальный диаметр неметаллических включений, которые всплывают из затвердевающего металла в поле действия центробежных сил.

Математическая модель

Известно [4], что скорость движения неметаллических включений во вращающемся металле определяется по формуле (1):

$$v_{max} = \frac{d_{вкл}^2 \cdot g \cdot (\rho_{распл} - \rho_{вкл}) \cdot k_{гравит}}{18 \cdot \eta} \quad (1)$$

где $d_{вкл}$ - диаметр включения, м;

$g = 9,81$ м/с² - ускорение свободного падения;

$\rho_{распл}$ и $\rho_{вкл}$ - плотности соответственно расплава и включения, кг/м³;

η - коэффициент внутреннего трения или вязкость жидкого расплава, кг/м·с;

$k_{гравит}$ - коэффициент гравитации.

Удаление неметаллических включений из вращающегося металла рабочего слоя происходит при условии, что скорость их движения v_{max} превышает линейную скорость продвижения фронта кристаллизации:

$$v_{max} > u \quad (2)$$

где u – линейная скорость продвижения фронта кристаллизации (затвердевания) металла рабочего слоя, м/с.

Для описания продвижения фронта кристаллизации и определения линейной скорости затвердевания металла согласно [5] условия литья классифицировали по геометрическим характеристикам системы «отливка-зазор-форма». В качестве размера отливки выбрана величина $r_{от.}$ – ее радиус, а величины зазора, состоящего из слоя теплоизоляционного покрытия, окислов и газовой прослойки, и толщины кокиля – $h_{зас.}$ и $h_{кок.}$ соответственно. Согласно выбранным обозначениям и практическим данным учитывали только аккумулирующую способность кокиля и потери тепла в окружающую среду. С другой стороны реальный валок имеет достаточно сложную конфигурацию расчета процесса затвердевания. В связи с этим расчету подвергался не реальный валок, а эквивалентная ему цилиндрическая отливка, затвердевающая изнутри.

В случае полой цилиндрической отливки, затвердевающей изнутри, согласно [5] линейная скорость затвердевания определяется по формуле (3):

$$u = \frac{dh_{з.к.}}{d\tau} = \frac{1}{S_1 \cdot (1 - \delta)} \cdot \frac{dV}{d\tau} = 1,791 \cdot \frac{1}{S_1 \cdot (1 - \delta)} \cdot \Delta V \cdot \sqrt[4]{v_{з.к.} \cdot v_{р.к.}^3} \quad (3)$$

где $h_{з.к.}$ – величина затвердевшей корки, м;

S_1 – площадь охлаждения отливки, м²;

$\delta = \frac{h_{з.к.}}{r_{от.}}$ – относительная или безразмерная величина затвердевшей корки, м;

$v_{з.к.}$ – скорость зарождения центров кристаллизации, шт./с;

$v_{р.к.}$ – скорость роста кристаллов, м³/с;

τ – время кристаллизации (затвердевания), с;

ΔV – элементарный объем кристаллизующегося металла, м³.

Реальный процесс затвердевания отливки в интервале температур $\Delta T_{кр.}$ в тепловом отношении заменим процессом затвердевания эквивалентной отливки при постоянной температуре $T_{кр.}$. При этом учитываем его характер согласно [5]:

$$- \text{последовательный} \left(Bi_1 \gg \frac{\Delta \dot{O}_{\dot{e}\dot{o}}}{\dot{O}_{\dot{e}\dot{o}} - \dot{O}_c} \right), \quad (4)$$

$$- \text{объемный} \quad \left(Bi_l \ll \frac{\Delta \dot{O}_{\bar{e}\delta.}}{\dot{O}_{\bar{e}\delta.} - \dot{O}_c} \right), \quad (5)$$

где Bi_l – критерий Био или интенсивность теплообмена для затвердевающей отливки;

$\Delta \dot{O}_{\bar{e}\delta.}$ - интервал температур кристаллизации чугуновой отливки, К;

$\dot{O}_{\bar{e}\delta.}$ - температура кристаллизации рассматриваемого изделия, К;

\dot{O}_c - температура среды, окружающей затвердевающую в массивном кокиле отливку, К.

Учитывая справочные и экспериментальные данные, получили, что для случая литья валков $Bi_l = 3,4 \gg \frac{\Delta \dot{O}_{\bar{e}\delta.}}{\dot{O}_{\bar{e}\delta.} - \dot{O}_c} = 0,44 \div 0,5$. Следовательно,

он характеризуется процессом последовательного затвердевания металла.

Твердая корка нарастает последовательно - начиная от поверхности охлаждения, находящейся у кокиля, и заканчивая серединой отливки (рис. 1).

Из условия эквивалентности сопоставили величины $h_{зк}$, h_c , $\Delta h_{кр}$. На основе сравнения таких величин определили размеры Δh_l и Δh_c . Такие величины определяли из выражений (6-7):

$$\Delta h_{\bar{e}} = \frac{\dot{O}_{\bar{e}} - \dot{O}_{\bar{e}\delta.}}{\dot{O}_{\bar{e}\delta.} - \dot{O}_c} \cdot \left(h_{\zeta.\bar{e}} + \frac{\lambda_l}{\alpha_l} \right). \quad (6)$$

$$\Delta h_{\bar{n}} = \frac{\dot{O}_{\bar{e}\delta.} - \dot{O}_{\zeta\bar{e}}}{\dot{O}_{\bar{e}\delta.} - \dot{O}_c} \cdot \left(h_{\zeta.\bar{e}} + \frac{\lambda_l}{\alpha_l} \right). \quad (7)$$

На основании формул (6-7) и рис. 1 определили величины h_l и h_c в зависимости от величины затвердевшей корки:

$$h_{\bar{e}} = h_{\zeta.\bar{e}} + \Delta h_{\bar{e}} \quad (8)$$

$$h_{\bar{n}} = h_{\zeta.\bar{e}} + \Delta h_{\bar{n}} \quad (9)$$

Следовательно, согласно формулам (3, 6-9) скорости продвижения фронта жидко-твердой зоны, где зарождаются и начинают расти кристаллы, u_l и твердой корки u_c :

$$u_{\ddot{e}} = \frac{dh_{\ddot{e}}}{d\tau} = \frac{1,791 \cdot \Delta V \cdot \sqrt[4]{v_{\zeta, \ddot{e}, \dot{e}} \cdot v_{\delta, \dot{e}}^3}}{S_I \cdot (1 - \delta)} \cdot \left(1 + \frac{\dot{O}_{\ddot{e}} - \dot{O}_{\dot{e}, \delta}}{\dot{O}_{\dot{e}, \delta} - \dot{O}_c}\right) \quad (10)$$

$$u_c = \frac{dh_c}{d\tau} = \frac{1,791 \cdot \Delta V \cdot \sqrt[4]{v_{\zeta, \delta, \dot{e}} \cdot v_{\delta, \dot{e}}^3}}{S_I \cdot (1 - \delta)} \cdot \left(1 - \frac{\dot{O}_{\dot{e}, \delta} - \dot{O}_{\ddot{e}}}{\dot{O}_{\dot{e}, \delta} - \dot{O}_c}\right) \quad (11)$$

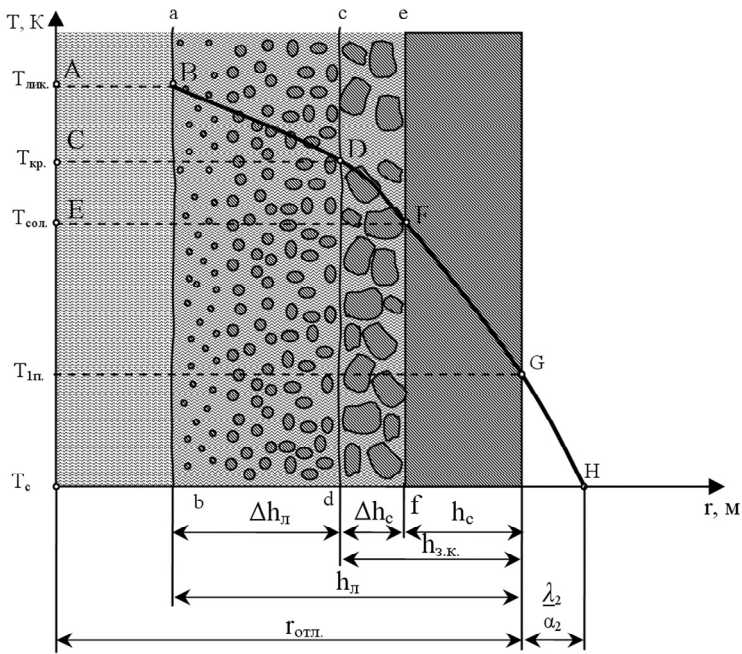


Рис. 1. Схематическое распределение температуры в сечениях реальной (линия ABDFG) и эквивалентной (линия CDFG) отливки: $r_{отл.}$ - радиус отливки; $h_{з.к.}$ - величина затвердевшей корки; h_c - величина твердой части затвердевшей корки; h_l - величина части корки, в которой происходит кристаллизация (величина затвердевающего слоя без учета жидкой фазы); Δh_c и Δh_l - ширина твердо-жидкой и жидко-твердой зон соответственно ($\Delta h_c + \Delta h_l = \Delta h_{кр.}$ - переходная зона образования и роста кристаллов)

Результаты исследований

Результаты исследований затвердевания рабочего слоя (рис. 1) показали, что движение неметаллических включений замедляется у

линии ab между жидкой и кристаллизующейся зонами, останавливается на линии cd и прекращается на линии ef. Следовательно, неметаллические включения беспрепятственно всплывают на свободную поверхность металла при условии, что их скорость v_{max} больше скорости u_n продвижения фронта кристаллизующейся зоны:

$$v_{max} > u_{\tilde{e}} = \frac{dh_{\tilde{e}}}{d\tau}. \quad (12)$$

При снижении скорости движения неметаллических включений до скорости продвижения фронта затвердевшей корки, всплытие неметаллических включений затрудняется:

$$v_{max} > u = \frac{dh_{\zeta.\tilde{e}}}{d\tau}. \quad (13)$$

Движение неметаллических включений прекращается, если их скорость меньше скорости продвижения твердой корки:

$$v_{max} > u_{\tilde{n}} = \frac{dh_{\tilde{n}}}{d\tau}. \quad (14)$$

Подставляя (1) и (10) в (12), получили выражение для определения минимального значения диаметра включения, которое беспрепятственно движется к свободной поверхности вращающегося металла рабочего слоя из кристаллизующейся зоны:

$$d_{\hat{a}\hat{e}\tilde{e}} > \sqrt{\frac{32,238 \cdot \eta \cdot \Delta V \cdot \sqrt[4]{v_{\zeta.\tilde{e}} \cdot v_{\tilde{e}}^3}}{k_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}\hat{a}\hat{e}\tilde{e}} \cdot S_I \cdot (1-\delta) \cdot g \cdot (\rho_{\tilde{\delta}\hat{a}\tilde{e}} - \rho_{\hat{a}\tilde{e}\tilde{e}})} \cdot \left(1 + \frac{\dot{O}_{\tilde{e}} - \dot{O}_{\tilde{e}\tilde{\delta}}}{\dot{O}_{\tilde{e}\tilde{\delta}} - \dot{O}_c}\right)} \quad (15)$$

Аналогично получили выражения для определения минимальных значений диаметров включений, которые соответственно затруднительно или невозможно удалить за счет действия центробежных сил:

$$d_{\hat{a}\hat{e}\tilde{e}} > \sqrt{\frac{32,238 \cdot \eta \cdot \Delta V \cdot \sqrt[4]{v_{\zeta.\tilde{e}} \cdot v_{\tilde{e}}^3}}{k_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}\hat{a}\hat{e}\tilde{e}} \cdot S_I \cdot (1-\delta) \cdot g \cdot (\rho_{\tilde{\delta}\hat{a}\tilde{e}} - \rho_{\hat{a}\tilde{e}\tilde{e}})} \quad (16)$$

и

$$d_{\text{аеє}} > \sqrt{\frac{32,238 \cdot \eta \cdot \Delta V \cdot \sqrt[4]{v_{\text{с.д.е.}} \cdot v_{\text{д.е.}}^3}}{k_{\text{аддддд}} \cdot S_1 \cdot (1 - \delta) \cdot g \cdot (\rho_{\text{ддддд}} \bar{e} - \rho_{\text{аеє}})}} \cdot \left(1 - \frac{\dot{O}_{\text{ед.}} - \dot{O}_{\text{нн.е.}}}{\dot{O}_{\text{ед.}} - \dot{O}_{\text{с}}}\right) \quad (17)$$

Выводы

В процессе затвердения массивных отливок в условиях вращения центробежные силы способствуют очищению горячего металла от неметаллических частиц. Показано, что удаление неметаллических включений из вращающегося металла рабочего слоя происходит при условии, что скорость их движения превышает линейную скорость продвижения фронта кристаллизации. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что такая характеристика зависит от геометрических, кристаллизационных и температурных параметров. Анализом движения неметаллических включений в затвердевающем слое определены предельные диаметры неметаллических включений, которые могут беспрепятственно двигаться в кристаллизующемся слое в условиях центробежного литья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будагянц Н.А. Центробежное литье валков для горячей прокатки / Н.А. Будагянц, Н.А. Жижкина, Ю.И. Гутько // Вісник Донбаської Державної Машинобудівної Академії. – Краматорськ: ДДМА, 2009. - № 1 (15). – С. 71-74.
2. Жижкина Н.А. Исследование процесса формирования массивных валков при центробежном литье / Н.А. Жижкина // Процессы литья, 2012. – №4(94). – С.44-50.
3. Жижкина Н.А. Центробежное литье как метод очистки металла валков / Н.А. Жижкина // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – Луганськ: СНУ ім.В.Даля, 2009. – С. 262–267.
4. Будагянц Н.А. Движение неметаллических включений в расплаве при центробежном литье массивных валков / Н.А. Будагянц, Н.А. Жижкина // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. - Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2010. – № 3, ч. 2. – С. 51–55.
5. Вейник А.И. Теория затвердевания отливок: монография / А.И. Вейник. – М.: Машгиз, 1960. – 435 с.

REFERENCES

1. Budag'janc N.A., Zhizhkina N.A., Gut'ko Ju.I. Centrobezhnoe lit'e valkov dlja gorjachej prokatki // Visnik Donbas'koï Derzhavnoï Mashinobudivnoï Akademii. – Kramators'k: DDMA, 2009. – P. 71–74.
2. Zhizhkina N.A. Issledovanie processa formirovaniya massivnyh valkov pri centrobezhnom lit'e // Processy lit'ja, 2012. – № 4 (94). – P. 44–50.
3. Zhizhkina N.A. Centrobezhnoe lit'e kak metod ochistki metalla valkov // Resursozberigaûchi tehnologii virobnictva ta obrobki tiskom materialiv u mašinobudu-

vanni: Book of scientific papers. Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Lugansk, 2009. – P. 262–267.

4. Budag'janc N.A., Zhizhkina N.A. Dvizhenie nemetallicheskih vključenij v rasplave pri cen-trobreznom lit'e massivnyh valkov // Visnik Shidnoukrains'kogo nacional'nogo universitetu im. V. Dalja. – Lugansk: SNU im. V. Dalja, 2010. – № 3, ch. 2. – P. 51–55.

5. Vejnik A.I. Teorija zatverdevanija otlivki.monografija. - M.: Mashgiz, 1960. – 435 p.

Жижкіна Н.О. Дослідження впливу відцентрових сил на рух неметалевих включень в сплаві, що кристалізується.

Робота присвячена процесу тверднення металу робочого шару масивних валків в умовах обертання. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що швидкість кристалізації такого сплаву залежить від геометричних, кристалізаційних та температурних параметрів виливку. Показано, що відцентрові сили сприяють очищенню гарячого металу від неметалевих часток. Визначені мінімально граничні діаметри неметалевих включень, що можуть вільно рухатися в шарі, що кристалізується, в умовах відцентрового лиття.

Ключові слова: валок, діаметр, неметалеve включення, швидкість, сплав, фронт кристалізації, відцентрове литво.

Zhizhkina N.A. The research of centrifugal forces' influence at non-metallic includes motion in crystallized alloy.

The aim of the paper is the research of influence of crystallization process of working layer of centrifugal casting rolls at refining it metal from non-metallic includes. Problems of the paper: to value the speed of motion of crystallization front of high-alloyed alloy; to determined minimum diameter of non-metallic includes, which rises from solidify metal at field centrifugal forces' action.

The design of this paper is solidifications process of working layers metal of massive rolls of rotated conditions. The theoretical researches are based at methodic of equivalent casting. The regress analyze is a base of experimental researches. The theoretical results are well concordant with the results of production experiments.

As a result of theoretical and experimental researches it has been established that crystallization speed of such alloy depends on geometrical, crystallized and temperature parameters of casting. It has been showed, that centrifugal forces promote to refining of hot metal from non-metallic corpuscles.

For the first time the formulas of determination of removed includes' sizes have been received. The quality of rolls has improved as a result of conducted researches.

Keywords: alloy, centrifugal casting, crystallization front, diameter, non-metallic inclusion, roll, speed.

Жижкіна Н. А. – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск
e-mail: litjo_snu@mail.ru