

перитектических сталей вопрос остается открытым.

Нами были проведены определения локального распределения фосфора рентгеномикроспектральным и структурным способом после горячей и холодной прокатки непрерывнолитых слябов (C = 0,03-0,08 %, P = 0,002-0,10 %). Признаки зернограницной сегрегации фосфора специально проверяли на второй – технологической стадии работы при освоении рефосфоризованной спокойной стали условной марки 08ЮП кислородно-конвертерной плавки (P = 0,02-0,10 %). После непрерывной разливки, горячей и холодной прокатки, травления и колпакового или непрерывного отжига при субкритических и межкритических температурах определяли механические и физико-химические свойства полос толщиной до 2 мм. Полученные результаты показали, что в основном исследуемый комплекс свойств был выше, чем у ферритных штампуемых сталей марки 08Ю категорий вытяжки СВ-0СВ.

Выводы

1. В железоуглеродистых базовых сплавах фосфор (в границах растворимости его в первичном δ-растворе) качественно не изменяет основные типы фазово-структурных превращений и процессы их реализации. Согласно опытным данным предложена схема типов превращений в связи с составом.

2. Неравномерное распределение фосфора, как растворной примеси в расплаве и в твердых фазах, создает два вида внутрифазовой концентрационной неоднородности: ликвацию при кристаллизации феррита и твердофазную микросегрегацию при полиморфных превращениях феррит↔аустенит.

3. Требованиям к свойствам конструкционных фосфористых сталей наиболее отвечают стали с однофазной ферритной первичной структурой и полным полиморфным превращением «феррит-аустенит».

Библиографический список

1. Яценко А.И., Хрычиков В.Е., Хохлова Т.С. и др. Кристаллизация и первичная структура конструкционных сталей. – Днепропетровск: Журфонд, 2010. – 225 с.
2. Яценко А.И., Федорова И.П., Хрычиков В.Е. и др. Особенности формирования микроструктуры при охлаждении сталей ферритного класса // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2012. - № 2. - С. 30-34.
3. Hashimoto M., Jshida J., Yamamoto M., Doyama R., Atomistic studies of grain boundary segregation in Fe-P and Fe-B alloys, I, II, III, *Asta Metallurgica*, 32, № 1, 1984, с. 1-11 .
4. Shimoda T, Treoretical estimates of phosphorus concentration profiles across grain boundaries, in Fe-P and Fe-Ni-P systems, *Asta Metallurgica*, 31, № 2, 1983, с. 2051-2062.
5. Ху Х. Упругие свойства холоднокатаных и отожженных листов фосфористой стали с высокой анизотропной пластичностью в третьем направлении. Новые методы исследования текстуры поликристаллических материалов. - М.: *Металлургия*, 1985. - С. 166-184.

Поступила 03.10.2013

УДК 621.74.042:621.746.6

Жижкина Н.А. /к.т.н./

Восточноукраинский НУ им. В. Даля

Наука

Удаление неметаллических включений из металла, затвердевающего в условиях вращения

Исследован процесс очищения валкового расплава от неметаллических включений. Показано, что скорость удаляемых частиц должна превышать линейную скорость продвижения фронта кристаллизации. Установлено, что такая характеристика определяется величиной теплоизоляционного покрытия формы. В работе получено выражение для определения размера удаляемых из вращающегося расплава неметаллических включений. Выявлено, что такая величина прямо пропорциональна скорости нарастания затвердевшей корки. Ил. 3. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: валковый расплав, вращение, неметаллическое включение, очищение, скорость кристаллизации

The process of rolls alloys cleaning of non-metallic inclusions had been researched at the paper. It has been showed that speed of removed particles must be higher linear speed of crystallizations fronts' motion. It has been established that such characteristic is determined by size of heat-insulating coating of form. The formula for determination of removed from rotated alloy non-metallic inclusions' size is received at the paper. The straight dependence of such value on speed of solidified crusts increase has been revealed

Keywords: cleaning, non-metallic inclusion, rolls alloy, rotation, speed of crystallization

Постановка проблемы и ее связь с важными научными и практическими заданиями

Валки относятся к числу ответственных деталей прокатного оборудования, которые испытывают зна-

чительные нагрузки: изгибающие, крутящие, динамические, температурные, а также силы трения. Поэтому изделие одновременно должно характеризоваться высокой твердостью, прочностью и пластичностью.

Большое значение для наработки имеет изменение свойств по глубине прокатного инструмента.

Известно [1], что наиболее эффективным способом изготовления таких массивных изделий является центробежное литье. Такой метод обеспечивает использование износостойких, но нетехнологичных в литье материалов, получение необходимой величины рабочего слоя и требуемого комплекса служебных свойств формирующего инструмента. Однако использование в качестве материала рабочего слоя сложнолегированных сплавов неизбежно сопровождается насыщением их неметаллическими включениями, которые способствуют развитию дефектов и неоднородностей в теле изделия. В связи с этим важным научно-практическим заданием является очищение металла от неметаллических включений.

Анализ последних исследований и публикаций

Центробежное литье характеризуется своеобразными гидростатическими и гидродинамическими явлениями, способствующими изменению траектории движения частиц, погруженных в расплаве. Исследования [2, 3] показали, что центробежные силы снижают загрязненность рабочей поверхности от неметаллических включений. В результате сравнения структуры образцов рабочего слоя от центробежнолитого вала и изделия, полученного традиционным методом (в стационарные формы), выявлено, что под действием сил вращения удаляются более мелкие включения.

Изучение движения неметаллических включений во вращающемся потоке жидкого металла [4] показало, что в таком случае относительная траектория всплывания частиц из металла рабочего слоя будет кривой. Полученная в работе [4] математическая модель показала, что центробежные силы способствуют увеличению скорости всплывания частиц. Вместе с тем, движению частиц препятствует фронт кристаллизации жидкого металла. Следовательно, для повышения качества валковых отливок, чистоты металла рабочего слоя значительный интерес представляет изучение процесса охлаждения и затвердевания валков, отливаемых центробежным методом.

Целью работы явилось изучение процесса очищения валкового расплава, затвердевающего в условиях вращения, от неметаллических включений. Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

- проанализировать продвижение фронта кристаллизации в валковом расплаве;
- оценить возможность удаления различных неметаллических включений из металла, затвердевающего во вращающейся форме.

Основной материал исследований

Скорость V_{max} всплывания частиц из вращающегося металла согласно [4] определяли по формуле (1)

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

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 возможно при условии, что скорость их движения V_{max} превышает скорость u продвижения фронта затвердевшей корки, где материал приобретает кристаллическое строение

$$V_{max} > u = \frac{dh_{з.к.}}{d\tau} \quad (2)$$

где $h_{з.к.}$ - величина затвердевшей корки рабочего слоя, м; τ - время затвердевания, с.

Описание продвижения фронта кристаллизации металла требует учета большого количества факторов, влияющих на процесс затвердевания реального вала. В связи с этим согласно [5] реальный валок заменили эквивалентной цилиндрической отливкой, затвердевающей снаружи. При этом учитывали только аккумулирующую способность кокиля и потери тепла в окружающую среду.

С другой стороны, установлено, что реальный процесс кристаллизации валковой отливки, происходящий в интервале температур $\Delta T_{кр.}$, является процессом последовательного затвердевания металла. В таком случае затвердевающая отливка характеризуется зонами, отвечающими трем состояниям металла - жидкого, переходного и полностью затвердевшего материала. Следовательно, скорость u продвижения фронта затвердевшей корки согласно [5] определяли по формуле (3)

$$u = \frac{dh_{з.к.}}{d\tau} = \frac{a_1}{r_{отл.}} \cdot \frac{1}{B_1' + 2 \cdot B_2' \cdot \delta + 3 \cdot B_3' \cdot \delta^2 + \frac{B_4'}{\delta + \frac{1}{B_1'}}} \quad (3)$$

где $a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}$ - коэффициент температуропроводности затвердевшей корки, м²/с; c_1 - удельная теплоемкость отливки, Дж/(кг·К); ρ_1 - плотность материала корки, кг/м³; $r_{отл.}$ - радиус отливки, м; $\delta = \frac{h_{з.к.}}{r_{отл.}}$ - относительная или безразмерная величина затвердевшей корки; B_1' - критерий Био интенсивности теплообмена затвердевающей отливки; $B_1'; B_2'; B_3'; B_4'$ - коэффициенты, рассчитанные согласно [5] по формулам (4-7)

$$B_1' = \frac{1}{B_1} \cdot (L + \frac{1}{6 \cdot B_1} + \frac{1}{2}) \quad (4)$$

$$B_2' = \frac{1}{2} \cdot (L + \frac{1}{2}) - \frac{1}{2 \cdot B_1} \cdot (L + \frac{1}{6}) \quad (5)$$

$$B_3' = -\frac{1}{3} \cdot (L + \frac{1}{3}) \quad (6)$$

$$B_4' = \frac{1}{2 \cdot B_1^2} \cdot (1 + \frac{1}{3 \cdot B_1}) \quad (7)$$

где L - относительная теплота кристаллизации, с помощью которой оцениваются процессы, сопровождающиеся фазовыми превращениями.

Результаты исследований группы валков одного типоразмера показали, что на скорость продвижения фронта затвердевшей корки наибольшее влияние оказывает аккумулирующая способность формы, выраженная через величину слоя теплоизоляционного покрытия кокиля (рис. 1).

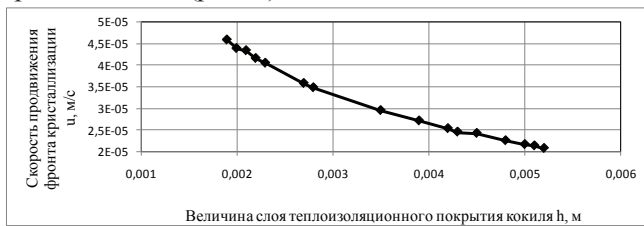


Рис. 1. Влияние величины h слоя теплоизоляционного покрытия кокиля на скорость u продвижения фронта кристаллизации металла рабочего слоя отливок одного типоразмера

На рис. 1 видно, что с увеличением слоя теплоизоляционного покрытия скорость продвижения фронта затвердевшей корки снижается.

Подставляя (1) и (3) в (2), получили выражение для определения минимальных значений диаметров включений, движение которых к свободной поверхности вращающегося металла рабочего слоя возможно под действием центробежных сил

$$d_{\text{вкл.}} \geq \sqrt{\frac{18 \cdot a_1 \cdot \eta}{k_{\text{равн}} \cdot g \cdot (\rho_{\text{распл}} - \rho_{\text{вкл}}) \cdot r_{\text{отл.}} \cdot B_1' + 2 \cdot B_2' \cdot \delta + 3 \cdot B_3' \cdot \delta^2 + \frac{B_4'}{\delta + \frac{1}{Bi_1}}} \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что диаметр удаляемых частиц зависит от физических характеристик материала затвердевающей корки, плотности включения, скорости вращения валковой формы и радиуса отливки.

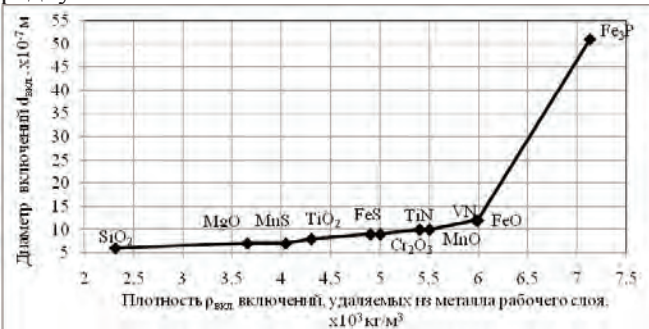


Рис. 2. Зависимость диаметра $d_{\text{вкл}}$ включений, удаляемых из металла рабочего слоя, от их плотности $\rho_{\text{вкл}}$ для отливок одного типоразмера

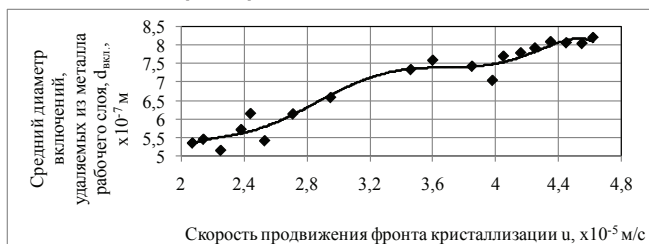


Рис. 3. Зависимость среднего значения диаметра $d_{\text{вкл}}$ включений сульфида марганца (MnS), удаляемых из металла рабочего слоя, от скорости u продвижения фронта кристаллизации для отливок одного типоразмера

Анализ результатов исследования диаметров частиц различных типов, удаляемых из затвердевающей

го рабочего слоя, показал, что сравниваемые включения отличаются величиной $d_{\text{вкл}}$ (рис. 2, 3).

При этом величина удаляемого включения возрастает прямо пропорционально его плотности (см. рис. 2). Сравнение размеров удаляемых включений одного типа (MnS) показало, что с увеличением скорости продвижения фронта кристаллизации возрастает их размер, что препятствует действию центробежных сил на очищение металла рабочего слоя от неметаллических включений (см. рис. 3).

Выводы

1. В результате исследований установлено, что очищение металла, затвердевающего в поле действия центробежных сил, от неметаллических включений возможно при условии превышения скорости движения частиц к свободной поверхности над продвижением фронта кристаллизации. Показано, что основной характеристикой последнего является линейная скорость нарастания затвердевшей корки, определяемая аккумулирующей способностью формы. Получено, что с увеличением слоя теплоизоляционного покрытия скорость продвижения фронта затвердевшей корки снижается.

2. В работе выведено уравнение для определения минимального значения диаметра неметаллического включения, удаляемого из вращающегося металла. Показано, что такая величина зависит от физических характеристик материала рабочего слоя, скорости вращения валковой формы, радиуса отливки и плотности включения. Установлено, что с увеличением последней возрастает минимальное значение диаметра удаляемой частицы. Вместе с тем, выявлено, что укрупнению удаляемых частиц способствует и увеличение скорости продвижения фронта кристаллизации.

Библиографический список

1. Литые прокатные валки / Н.А. Будагянц, В.Е. Карский. – М.: Металлургия, 1983. – 175 с.
2. Жижкина Н.А. Центробежное литье как метод очистки металла валков / Зб. наукових праць «Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні». – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2009. - С. 262-267.
3. Жижкина Н.А. Анализ загрязненности рабочего слоя валков, отлитых стационарным и центробежными методами / Зб. наукових праць «Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні». – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2010. - С. 82-87.
4. 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 отливки: монография / Вейник. – М.: Машгиз, 1960. – 435 с.

Поступила 07.08.2013