теретория и предоржение и предожение и п

www.rudmet.ru

• СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК •

115 лет

2014

Санкт-Петербургскому государственному политехническому университету



УДК 620.184.4

Характер распределения неметаллических включений в непрерывнолитых сортовых заготовках для рельсов и колес



А. А. Казаков Докт. техн. наук, профессор, СПбГПУ, kazakov@thixomet.ru



А.И.Житенев Инженер, СПбГПУ



А. В. Кушнарев Канд. техн. наук, управляющий директор, «Евраз НТМК», Нижний Тагил



Ю. П. Петренко Начальник Центральной лаборатории, «Евраз НТМК», Нижний Тагил



Е. А. Лаврова Начальник металлографической лаборатории, «Евраз НТМК», Нижний Тагил

Оренские свойства этих сталей [1–3], поэтому в готовых изделиях, рельсах и колесах предусмотрен выходной контроль по НВ в соответствии со стандартами [4–6].

Неметаллические включения образуются на всех этапах сталеплавильного передела от плавки и внепечной обработки до разливки и кристаллизации стали. При кристаллизации и затвердевании происходит перераспределение примесей между твердой и жидкой фазами, формируется структурная и химическая неоднородность по сечению заготовки. Образование включений в затвердевающей стали протекает одновременно с формированием ее дендритной структуры. Все эти взаимосвязанные

Изучено распределение неметаллических включений по сечению непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) для рельсов и колес с учетом особенностей дендритной структуры во всех структурных зонах. Максимальная загрязненность неметаллическими включениями обнаружена на стыках смежных структурных зон. Исследовано изменение расстояния между дендритными осями второго порядка λ₂, характеризующего размер дендритной ячейки, по сечению заготовки. В непрерывнолитых заготовках для колес λ₂ непрерывно растет от края к центру, в рельсовых заготовках увеличение λ_2 , можно наблюдать только в области столбчатых кристаллов, в то время как в центральной области разориентированных кристаллов λ_2 остается неизменным. Установлено влияние расстояния между дендритными осями второго порядка на размер третичных неметаллических включений, образующихся при затвердевании. В колесно-бандажной НЛЗ с увеличением λ_2 в области столбчатых и в области разориентированных кристаллов размер сульфидов увеличивается. В рельсовой НЛЗ такая зависимость размера сульфидов от размера дендритной ячейки обнаружена только для области столбчатых кристаллов, а в области разориентированных кристаллов размер сульфидов изменяется стохастически. Показано, что локальные объемы металла на стыках структурных зон, наиболее загрязненные неметаллическими включениями в непрерывнолитых заготовках для рельсов и колес, хорошо согласуются с местами пробоотбора для оценки неметаллических включений в готовых изделиях.

Ключевые слова: колесная сталь, рельсовая сталь, неметаллические включения, кристаллизация, дендритная структура, непрерывнолитая заготовка, методика пробоотбора.





о — рельсовая заготовка

процессы и определяют характер распределения включений по сечению заготовки.

Целью данной работы является изучение особенностей распределения неметаллических включений по сечению непрерывнолитой заготовки с учетом характера изменения дендритной структуры во всех ее структурных зонах.

Материал и методика исследований

В данной работе исследовали темплеты, вырезанные из непрерывнолитых сортовых заготовок из сталей 2-У и К76ФБ для колес и рельсов, полученные на установках непрерывной разливки стали (УНРС) комбинированного типа: колесная заготовка круглого сечения диам. 430 мм, рельсовая заготовка прямоугольного сечения 300×360 мм.

Шлифованные поверхности темплетов вываривали в 50%-ном водном растворе HCI при температуре 60–80 °C в течение 20 мин для выявления рельефной картины дендритных остовов. Для повышения четкости и контрастности поверхность темплетов обрабатывали 3%-ным спиртовым раствором HNO₃ в течение 40 с при комнатной температуре. Для удаления оксидов с поверхности образцов использовали концентрированную H₃PO₄.

На поверхности темплетов четко выявлены основные структурные зоны, образовавшиеся при кристаллизации и затвердевании: прикорковая зона мелких равноосных кристаллов, зона столбчатых кристаллов и зона разориентированных крупных кристаллов (**рис. 1**).

С каждой стороны колесной заготовки вырезали образцы таким образом, чтобы охватить все ее структурные зоны. Часть из этих образцов соответствовала тем областям в готовых колесах (по ГОСТ 10791-2004) [4] и бандажах (по ГОСТ 398-96) [5], в которых контролируются НВ на готовых изделиях. В рельсовой непрерывнолитой заготовке загрязненность неметаллическими включениями оценивали тотально по всему сечению темплета.

Исследование НВ проводили с помощью анализатора изображения Thixomet Pro нарастающим итогом от поля к полю в соответствии со стандартом ASTM E 1245.

В различных структурных зонах колесно-бандажных и рельсовых заготовок с помощью анализатора изображения определено расстояние между дендритными осями второго порядка λ₂, характеризующее дисперсность дендритной структуры. Для получения достоверных результатов измерения проводили тотально на всей площади образца с помощью панорамных исследований при увеличении ×50.

Обсуждение результатов

Анализ результатов исследования колесно-бандажной заготовки показал, что максимальная загрязненность по НВ соответствует переходной структурной зоне, где сопрягаются зона столбчатых кристаллов и зона разориентированных крупных кристаллов (**рис. 2, 3**).

Как известно, зона столбчатой кристаллизации образуется в условиях высокого градиента температуры при отсутствии концентрационного переохлаждения перед движущимся фронтом кристаллизации. Примеси накапливаются перед фронтом, образуя концентрационное уплотнение. Зона разориентированных кристаллов образуется в условиях концентрационного переохлаждения, возникающего в центре заготовки при небольшом температурном градиенте. Включения и примеси обогащают центральную часть блюма, что способствует зародышеобразованию при кристаллизации в условиях незначительного теплоотвода. Рост столбчатой области прекращается, когда перед движущимся фронтом двухфазной зоны концентрационное переохлаждение превосходит критическое значение, которое может выдержать сплав заданного состава. В результате последовательное затвердевание (зона столбчатых кристаллов) сменяется объемным затвердеванием (зоной разориентированных кристаллов). Именно в этой переходной области на стыке двух структурных зон концентрируется основная масса ликватов, провоцирующих образование неметаллических включений.

Максимальное содержание НВ находится, как правило, на расстоянии 40–80 мм от края заготовки. Такое большое колебание в положении максимума связано со смещением области разориентированных кристаллов относительно геометрического центра заготовки в условиях реального производства непрерывнолитой заготовки. Это смещение происходит из-за несимметричности подвода жидкой стали в кристаллизатор, тепловой работы кристаллизатора и вторичного охлаждения. При этом возможно частичное прилипание твердой корочки ме-



Рис. 2. Распределение неметаллических включений и межосного расстояния λ₂ по сечению колеснобандажной непрерывнолитой заготовки, темплет А

талла к стенкам кристаллизатора, что вызывает неравномерное образование воздушного зазора между стенками кристаллизатора и корочкой, приводящее к неравномерному отводу тепла, а следовательно, несимметричности температурных полей в металле по ходу затвердевания. Все это создает условия для несимметричного расположения структурных зон по сечению заготовки. На некоторых темплетах центральная зона разориентированных кристаллов располагалась на таком большом удалении от края темплета, что максимум неметаллических включений был обнаружен на расстоянии 100–120 мм от края заготовки (см. рис. 3).

Установлено, что в колесно-бандажной заготовке среднее межосное расстояние для осей дендритов второго порядка λ_2 , которое характеризует размер дендритной ячейки, непрерывно растет от края к центру (**рис. 4**). Вдоль столбчатых кристаллов от поверхности к центру λ_2 линейно увеличивается из-за снижения градиента температуры и уменьшения скорости продвижения фронта кристалли-



Рис. 4. Изменение межосного расстояния λ₂ по сечению колесной заготовки



Рис. 3. Распределение неметаллических включений и межосного расстояния λ₂ по сечению колеснобандажной непрерывнолитой заготовки, темплет Б

зации. В зоне разориентированных крупных кристаллов дендриты формируются при низком градиенте температуры, поэтому происходит увеличение расстояния между вторичными дендритными осями. Процесс огрубления осей в этой зоне связан также с процессами «оствальдовского созревания», когда толстые дендритные оси растут, а тонкие растворяются.

Сульфиды марганца, как третичные неметаллические включения, образуются в междендритных пространствах, поэтому их размер зависит от размера дендритной ячейки (**рис. 5**). От края к центру заготовки λ_2 увеличивается (см. рис. 4), и размер сульфидов также растет, так как с увеличением размера дендритной ячейки повышается время затвердевания, полнее проходят процессы разделительной диффузии, и увеличивается время роста третичных сульфидов.

Распределение оксидов и сульфидов по сечению рельсовой непрерывнолитой заготовки показано на рис. 6. Ярко выраженного максимума НВ на стыке зон



Рис. 5. Влияние межосного расстояния λ₂ на размер сульфидов





					a Call de la		
	0,0057	0,008 0,036	9,0128 0,02	0,0199 0,0228	0,0057 0,0357	0,0101 0,0281	
	0,0139 0,0391	0,0049 0,0251	0,0147 0,0228	0,0167 0,0278	0,0128 0,0293	0,0215 0,0295	
	0,004 0,022	0,003_ 0,02	0,0072 0,0168	0,0136 0,0218	0,0097 0,0239	0,0151 0,0274	
	0,002 0,022	0,0114 0,0443	0,0188 0,0236	0,015 0,0168	0,0108 0,023	0,0164 0,0325	
Carlos and	A Street	2 11 1121		A MARINE			25 мм
		0,0071	0,0068	0,006	0,0168	0,0218 0,0474	

Рис. 6. Распределение неметаллических включений по сечению рельсовой заготовки (верхняя строчка оксиды, нижняя строчка — сульфиды, % (об.))

столбчатых и крупных разориентированных дендритов обнаружено не было. В отличии от колесно-бандажной заготовки, имеющей круглое сечение, рельсовая заготовка имеет форму прямоугольника, что предопределяет более сложный характер теплофизических и гидродинамических процессов, протекающих в жидком и затвердевающем металле такой заготовки. В данном случае максимум загрязненности неметаллическими включениями был обнаружен на расстоянии 10-25 мм от края заготовки, т. е. в зоне сопряжения прикорковой зоны мелких равноосных кристаллов и зоны столбчатых кристаллов. Формирование этой сегрегационной области происходит в начальный период времени после попадания жидкого металла в кристаллизатор УНРС. В результате сильного термического переохлаждения образуется твердая корочка мелких равноосных кристаллов, а из-за усадки возникает воздушный зазор между кристаллизатором и заготовкой. Изза выделяющейся при этом скрытой теплоты кристаллизации и сниженного теплоотвода снимается термическое переохлаждение, и возникает пауза в кристаллизации. Отторгнутые в жидкий металл примеси скапливаются перед «застывшим» фронтом кристаллизации, провоцируя формирование неметаллических включений.



Рис. 7. Изменение межосного расстояния λ₂ по сечению рельсовой заготовки

Значительное количество сульфидных неметаллических включений в рельсовой заготовке было обнаружено в области так называемого конверта в углу заготовки, где встречаются зоны столбчатых кристаллов, растущих от взаимоперепендикулярных граней заготовки. Перед этими двумя фронтами кристаллизации скапливаются примеси, а при сопряжении фронтов объемы жидкого металла, обогащенные ликватами, «захлопываются», создавая предпочтительные условия для образования неметаллических включений.

Закономерностей в характере распределения оксидных НВ по сечению рельсовой заготовки обнаружено не было, что связано с высокотемпературной природой первичных и вторичных оксидов алюминия, образующихся при раскислении этой стали. Данные включения, образуясь задолго до кристаллизации в жидком металле, распределены по его объему неравномерно, а при затвердевании эта неравномерность усиливается из-за захвата или отторжения включений движущимся фронтом.

Параметр дендритной структуры, характеризуемый расстоянием между дендритными осями второго порядка в рельсовой заготовке, увеличивается линейно только в области столбчатых кристаллов (**рис. 7**). В области крупных разориентированных кристаллов межосное расстояние практически не меняется, что связано с одинаково медленным затвердеванием всей сердцевины заготовки.

Размер сульфидов линейно возрастает при увеличении размера дендритной ячейки, которая растет по длине столбчатых кристаллов от поверхности к центру (**рис. 8**). В области разориентированных кристаллов зависимость размера включений от размера дендритной ячейки не выявлена. Вероятно, в этой зоне сульфиды образуются в соответствии с зональными сегрегациями, характер распределения которых стохастический.

Далее рассмотрено соотношение обнаруженных выше мест максимальных загрязнений неметаллическими включениями в непрерывнолитой заготовке с местами пробоотбора в рельсах и колесах. Для этого воспользовались результатами моделирования деформации заготовки при производстве железнодорожных колес, бандажей



Рис. 8. Влияние межосного расстояния λ_2 на размер сульфидов

и рельсов, полученными с помощью штыревых моделей [8–10] и САПР [7]. На **рис. 9** представлена схема течения при деформации металла в процессе изготовления колес (*a*) и рельсов (*б*). Точка 2 в литой колесной заготовке на рис. 9, *a* отвечает стыку зоны столбчатых кристаллов с областью разориентированных кристаллов. Результаты моделирования показывают, что этот объем металла при деформации переходит в обод колеса. На рис. 9, *б* показаны результаты работы [10], согласно которым в рельсовой заготовке стыки структурных зон литой заготовки, наиболее загрязненные неметаллическими включениями, при деформации переходят в головку рельса.

Принимая во внимание результаты моделирования течения металла при производстве колес [7–9] можно заключить, что зона стыка столбчатых кристаллов с крупными разориентированными кристаллами при деформации переходит в обод колеса, который контролируется на содержание неметаллических включений в соответствии со стандартом [4]. Аналогичные исследования течения металла при производстве рельсов [10] позволяют сделать вывод, что стыки структурных зон литой заготовки, наиболее загрязненные HB, при деформации переходят в головку рельса, откуда и отбираются образцы для контроля неметаллических включений по стандарту [6].

Выводы

1. Установлено, что литая сортовая заготовка наиболее загрязнена неметаллическими включениями на стыках смежных структурных зон:

• зоны столбчатых кристаллов с зоной разориентированных кристаллов НЛЗ для колес;

• зоны мелких равноосных прикорковых кристаллов с зоной столбчатых кристаллов, а также области сопряжения зон столбчатых кристаллов в углах «конверта» НЛЗ для рельсов.

2. Показано, что в колесно-бандажной НЛЗ расстояние между дендритными осями второго порядка λ₂ увеличивается от поверхности к центру заготовки, что хорошо коррелирует с известными расчетными данными. Для рельсовой НЛЗ такой характер обнаружен только в области столбчатых кристаллов. В центральной зоне разориентированных кристаллов НЛЗ для рельсов λ₂ остается неизменным.

3. Установлена зависимость размера сульфидов от расстояния между дендритными осями второго порядка λ_2 . В колесно-бандажной НЛЗ с увеличением λ_2 в области столбчатых и в области разориентированных кристаллов размер сульфидов увеличивается. В рельсовой НЛЗ такая зависимость размера сульфидов от размера дендритной ячейки обнаружена только в области столбчатых кристаллов, а в области разориентированных кристаллов размер сульфидов изменяется стохастически.

4. Установлено, что наиболее загрязненные неметаллическими включениями области НЛЗ, найденные в настоящей работе, хорошо согласуются с местами пробоотбора для оценки НВ в готовых изделиях, рельсах и колесах.



Рис. 9. Линии течения металла при деформации при производстве колес (*a*) [7] и рельсов (*б*) [8]

Библиографический список

- Губенко С. И., Парусов В. В., Деревянченко И. В. Неметаллические включения в стали. — Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2005. — 536 с.
- Moema J. S., Semenya S. M., Jones C. Qualitative and quantitative determination of inclusions in high-carbon steel alloy (Class B) for rail wheel application by SEM/EDS analysis // The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2013.
- Харрис У. Дж., Захаров С. М., Ландгрен Дж. и др. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса : пер. с англ., 1-е изд. — М. : Интекст, 2002. — 408 с.
- 4. ГОСТ 10791-2004. Колеса цельнокатанные. Технические условия. Введ. 2005.07.01.
- ГОСТ 398-96. Бандажи из углеродистой стали для подвижного состава железных дорог широкой колеи и метрополитена. Технические условия. — Введ. 1998.01.01.
- ГОСТ Р 51685-2000. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. Введ. 2010.11.01.
- Голышков Р., Латаев А., Харламов А. Оптимизация технологических процессов колесопрокатного производства с помощью программного комплекса DEFORM // САПР и графика. 2006. № 7.
- Кушнарев А. В., Петренко Ю. П., Тимофеев В. В., Киричков А. А., Шестак В. Д. Исследование течения металла при деформации заготовок колес 957 мм на ППЛ КБЦ ОАО «НТМК» // Материалы Третьей междунар. конф. «Трансмет-2007». — Екатеринбург : УГТУ — УПИ, 2008. — 395 с.
- Тимофеев В. В., Хоменко Д. Ю., Петренко Ю. П. Исследование течения металла при производстве локомотивных бандажей // Бюллетень научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. 2010. № 4.
- 10. *Нестеров Д. К., Глав А. Я.* Производство железнодорожных рельсов из непрерывнолитых заготовок // Сталь. 1995. № 8.



DISTRIBUTION PATTERN OF NONMETALLIC INCLUSIONS IN CONTINUOUS-CAST STEEL BILLETS FOR RAILS AND WHEELS

Kazakov A. A.¹, Dr. Eng., Prof. Zhitenev A. I.¹, Engineer Kushnarev A. V.², Cand. Eng., Managing Director Petrenko Yu. P.², Head of the Central Works Laboratory

Lavrova E. A.², Head of Metallograhic Laboratory

- ¹ St. Petersburg State Polytechnic University (St. Petersburg, Russia)
- ² EVRAZ Nizhniy Tagil Iron & Steel Works (EVRAZ NTMK) (Nizhniy Tagil, Russia)

E-mail: kazakov@thixomet.ru

Abstract: The distribution pattern of nonmetallic inclusions on the cross section of continuous-cast steel billets for rails and wheels has been studied in consideration of dendritic parameters in all crystal structure zones. Maximum nonmetallic impurity rating has been detected at the boundary intersection of adjacent crystal structure zones. The secondary dendrite arm spacing $\lambda_{2'}$, which characterizes the size of dendritic cell, has been examined on the cross section of a billet. For wheel continuous-cast steel billet $\boldsymbol{\lambda}_2$ goes constantly up from a billet's edge to it's center, but for the rail continuous-cast steel billet there is λ_2 increase only for the columnar crystal zone while for the equiaxial zone it is unaffected. The effects of secondary dendrite arm spacing upon the dimensions of tertiary nonmetallic inclusions appeared during solidification have been determined. That is available for a wheel continuous-cast steel billet, that size of sulfides grows with λ_2 increase both for a columnar crystal zone and for an equiaxial zone, but for rail continuous-cast steel billet such relationship has been found only for a columnar crystal zone, when in the region of equiaxial zone the size of sulfides varies stochastically. The method of sampling for the control of nonmetallic inclusions in continuouscast steel billets for rails and wheels has been developed based upon revealed relationships which correlates good with a sampling for end products: wheels and rails.

Key words: steel for rails, steel for wheels, nonmetallic inclusions, solidification, dendritic structure, continuous-cast steel billets, crystal structure zones.

References:

 Gubenko S. I., Parusov V. V., Derevyanchenko I. V. Nemetallicheskie vklyucheniya v stali (Non-metallic inclusions in steel). Dnepropetrovsk: ART-PRESS, 2005. 536 p.

- 2. *Moema J. S., Semenya S. M., Jones C.* Qualitative and quantitative determination of inclusions in high-carbon steel alloy (Class B) for rail wheel application by SEM/EDS analysis. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2013.
- Harris William J., Zakharov S. M., Lundgren James et al. Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya kolesa i relsa (Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues). Translated from English. First Edition. Moscow: Intekst, 2002. 408 p.
- GOST 10791-2004. Kolesa tselnokatannye. Tekhnicheskie usloviya (State Standard 10791-2004. All-rolled wheels. Technical requirements). Introduced: July 01, 2005.
- GOST 398-96. Bandazhi iz uglerodistoy stali dlya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog shirokoy kolei i metropolitena. Tekhnicheskie usloviya (State Standard 398-96. Carbon steel supports for rolling-stock of railways of broad gauge and underground. Technical requirements). Introduced: January 01, 1998.
- GOST R 51685-2000T. Relsy zheleznodorozhnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya (State Standard R 51685-2000T. Railway rails. General technical requirements). Introduced: November 01, 2010.
- Golyshkov R., Lataev A., Kharlamov A. Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov kolesoprokatnogo proizvodstva s pomoshchyu programmnogo kompleksa DEFORM (Optimization of technological processes of wheel-rolling production with the help of software system DEFORM). SAPR i grafika — SAPR and graphics. 2006. No. 7.
- Kushnarev A. V., Petrenko Yu. P., Timofeev V. V. et al. Issledovanie techeniya metalla pri deformatsii zagotovok koles 957 mm na pressoprokatnoy linii kolesobandazhnogo tsekha Otkrytogo Aktsionernogo Obshchestva «NTMK» (Research of metal flow with deformation of 957 mm wheel blanks on press-rolling line of wheel-tire shop of "Nizhniy Tagil Iron and Steel Works" JSC). Materialy Tretey mezhdunarodnoy konferentsii "Transmet-2007" (Materials of the Third International Conference "Transmet-2007"). Ekaterinburg : Ural State Technical University — Ural Polytechnic Institute, 2008. 395 p.
- Timofeev V. V., Khomenko D. Yu., Petrenko Yu. P. Issledovanie techeniya metalla pri proizvodstve lokomotivnykh bandazhey (Research of metal flow in the time of production of locomotive bandages). Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii "Chernaya metallurgiya" — Bulletin of scientific-technical and economic information "Ferrous metallurgy". 2010. No. 4.
- Nesterov D. K., Glav A. Ya. Proizvodstvo zheleznodorozhnykh relsov iz nepreryvnolitykh zagotovok (Production of railway rails from concast billets). Stal — Steel in Translation. 1995. No. 8.

