

УДК 669.181:620.192.3

С. И. Губенко, Ю. И. Балева

ЛОКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТОЙ СТАЛИ ВБЛИЗИ ВКЛЮЧЕНИЙ

Обсуждены основные виды неметаллических включений в центробежнолитой стали «40X25H20C2» и их влияние на локальную структуру и образование вторичных границ и трещин. Установлено, что повышенное содержание таких включений вызывает, при одинаковом характере макроструктуры заготовки, снижение механических свойств этой стали. Показано, что включения являются источниками внутренних напряжений и способствуют образованию дефектов (микротрещин), а, кроме того, вызывают локальные процессы структурных изменений в аустенитной матрице, связанные с расцеплением межфазных границ включение–матрица и полигонизационными процессами вблизи включений, способствуя образованию вторичных границ. Механические испытания показали, что при одинаковой макроструктуре отливки неметаллические включения оказывают существенное негативное влияние на уровень прочности и пластические характеристики. Так, в зонах вблизи внутренней поверхности со столбчатой макроструктурой увеличение уровня загрязненности стали из-за включений привело к снижению прочности на 15...18, а пластичности – на 18...21 %.

Ключевые слова: центробежнолитая сталь, трещины, неметаллические включения.

Введение

Качество центробежнолитых заготовок и труб во многом зависит от наличия неметаллических включений, которые являются источниками внутренних напряжений. Включения могут оказывать влияние на локальные процессы формирования структуры стали, но также могут быть причиной образования различного рода дефектов, снижающих качество центробежнолитых заготовок и труб. Разработка эффективных мер по устранению причин межкристаллитного разрушения центробежнолитых отливок требует всестороннего изучения их природы и механизмов возникновения. Неметаллические включения в центробежнолитых сталях изучены недостаточно [1], поэтому необходимо исследовать основные виды неметаллических включений в центробежнолитой стали «40X25H20C2» и показать их влияние на локальные процессы формирования микроструктуры стали, а также дефектов вблизи включений, что и явилось целью настоящей работы.

Материалы и методики исследований. Результаты исследований и их обсуждение

Исследованы неметаллические включения в трубных заготовках из стали «40X25H20C2». Идентификацию неметаллических включений проводили несколькими методами: металлографический («Neophot-21») – светлое и темное поле, поляризованный свет; петрографический; микрорентгеноспектральный («MS-46», «Самеса», «Nanolab-7»); рентгеноструктурный («ДРОН-2,0») [2].

© Губенко Светлана Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения Национальной металлургической академии Украины (КМ НМАУ), тел. раб. +38 (0562) 41-03-57; e-mail: sgubenko@email.dp.ua; идентификационный номер (ID) в Едином международном реестре ученых (ORCID) (ID): 0000-0001-5427-1154; Балева Юлия Игоревна, аспирант КМ НМАУ; тел. моб. +38 (063) 449-67-57, +38 (097) 441-63-06; ID в ORCID: 0000-0002-4065-7467; просп. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр, Украина

Комплексные исследования показали, что присутствуют включения различных типов: оксиды и шпинели Al_2O_3 , Cr_2O_3 , $MnO \cdot Al_2O_3$, $(MnFe)O$, $(Ce,Al)_2O_3$, силикаты – глобулярные SiO_2 и $FeO \cdot SiO_2$, $MnO \cdot SiO_2$, карбонитриды и оксиды титана $TiCN$, а также железо-марганцевые сульфиды с различным соотношением железа и марганца $(Mn,Fe)S$, а также сульфиды с церием $(Mn,Ce)S$. Согласно работе [3], церий в зависимости от его содержания образует в сталях как самостоятельные оксиды и сульфиды, так и твердые растворы типа $(Ce,Al)_2O_3$ и $(Mn,Ce)S$, что и наблюдали в настоящих исследованиях. Кроме того обнаружены гетерофазные оксисульфидные и оксисиликатные включения.

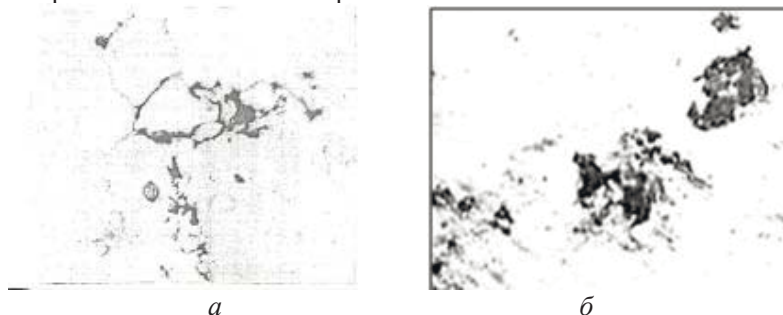
Неметаллические включения неравномерно распределены в стали. При этом можно различать два типа этой неравномерности: в объеме отливки и в пределах дендритной структуры. Неравномерное распределение включений в пределах дендритной структуры связано с возникновением турбулентных потоков, которые обусловлены движением расплава в тангенциальном и осевом направлениях, что в результате образует сложный характер его перемещения относительно формы по винтовой траектории [1, 4]. Гидравлические явления, происходящие в расплаве, способствуют локальным турбулентным процессам, что способствует изгибу дендритов либо отдельных их ветвей в процессе роста и как следствие, к перераспределению включений. Неоднородному распределению включений способствуют ликвационные явления в расплаве, а также образование включений вследствие локальных многофазных превращений в процессе многофазной кристаллизации, например, при эвтектическом либо монотектическом превращении [2, 5]. Следует отметить, что по сечению отливки изменяется не только общее содержание неметаллических включений, но также их количественное соотношение по типам. Неравномерное распределение неметаллических включений по сечению отливки определяется моментом их образования в стали, а также способностью к всплыванию во вращающемся расплаве.

Для внутренних зон отливок в местах скопления неметаллических включений характерно образование дефектов - трещин, которые связаны с присутствием грубых шлаковых включений. Зона присутствия таких трещин на внутренних поверхностях заготовок (т.н. рыхлость) имеет глубину до 3 мм. Кроме того, в этих же участках отливок возникают микротрещины в местах скопления эндогенных включений, которые имеют термическое происхождение и связаны с концентрацией значительных напряжений при кристаллизации и охлаждении стали вследствие различия коэффициентов термического сжатия (расширения) включений и стальной матрицы (рис. 1, а) [3]. Чем больше содержание включений, тем больше глубина залегания этих дефектов. В то же время, поскольку в пределах заготовки эндогенные включения распределены неравномерно и поэтому в местах их скопления также возникают микротрещины (рис. 1, б).

Вполне очевидно, возникновение термических напряжений вблизи включений в процессе кристаллизации и охлаждения должно приводить к сложно-напряженному состоянию стальной матрицы (аустенита) в центробежнолитой стали (рис. 2, а, б), о чем свидетельствует наличие вблизи включений изгибных экстинкционных контуров в тонких фольгах, наблюдаемые при электронно-микроскопических исследованиях (рис. 2, в).

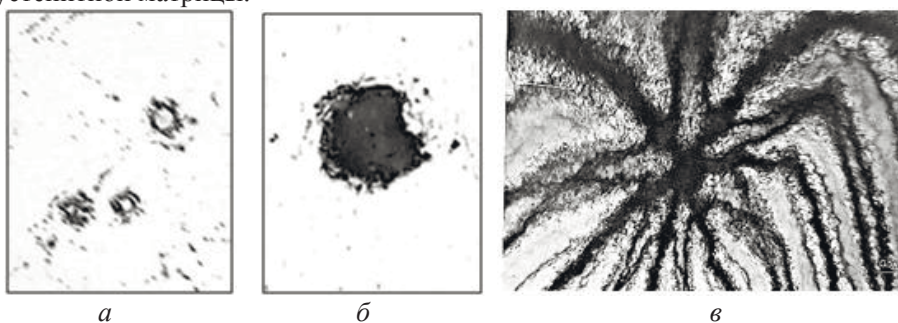
Характер этих контуров свидетельствует о возникновении вблизи включения изгиба кристаллической решетки аустенита, порождающего дальнедействующие поля напряжений [2]. Методики определения дальнедействующих

полей напряжений по изгибным экстинкционным контурам изложены в работе [2]. Образовавшаяся структура имеет на электронномикроскопических снимках своеобразный пятнистый контраст.



a – внутренняя поверхность заготовки; *б* – скопление эндогенных включений
 Рис. 1. Трещины вблизи включений в различных участках заготовки (x500)

Каждое пятно представляет собой область, ограниченную границами с плавными и дискретными разориентировками. В структуре наблюдается множество новых прерывистых границ различных разориентировок. Вблизи включений присутствует набор разориентировок, соседние области разориентированы на несколько градусов. О наличии разориентировок на субграницах свидетельствуют скачки на них экстинкционных контуров, а также расщепление рефлексов на электронограммах. Неоднородности плотности дислокаций вблизи включений в процессе кристаллизации сильно искривляют решетку аустенитной матрицы.



a *б* *в*
a, б – x900; *в* – x20000
 Рис. 2. Напряженные участки (*a, б*) и экстинкционные контуры (*в*) вблизи неметаллического включения

Для анализа таких искажений используют такой параметр как избыточная плотность дислокаций ρ_{\pm} [2, 6, 7]. При пластическом изгибе ее определяют по градиенту разориентировки $\partial\varphi/\partial\ell$. Появление избыточной плотности дислокаций свидетельствует о развитии процессов аннигиляции дислокаций, активированных поперечным скольжением и приводящих к снижению скорости накопления скалярной плотности дислокаций. При этом сохраняется избыток дислокаций одного знака и появляются субграницы различного типа [2, 6, 7].

Следует отметить, что избыточная плотность дислокаций не является достаточно информативным параметром, поэтому используют тензор изгиба-кручения или тензор плотности дислокаций [2, 6, 7]. Измерения в настоящем исследовании проводили на краях экстинкционных контуров, где обеспечена наилучшая видимость дислокаций. Избыточную плотность дислокаций измеряли по градиенту разориентировки в локальных областях $\rho_{\pm} = 1/v \partial\varphi/\partial\ell$. Величину

$\partial\varphi/\partial\ell$ определяли путем измерения смещения ℓ экстинкционного контура при контролируемом угле наклона фольги с помощью гониометра. Необходимо, чтобы вектор действующего отражения был перпендикулярен оси наклона гониометра, поэтому использовали электронный микроскоп, снабженный гониометром с прецессией [7]. Исследуемые экстинкционные контуры предварительно проиндицировали и расположили ось наклона гониометра перпендикулярно действующему отражению. Участки с контурами не содержали границы раздела или разориентировки, чтобы изгиб фольги был непрерывным.

Исследования проводили на фольгах из центробежнолитой стали «40X25H20C2» путем расчета тензоров изгиба-кручения по методикам, изложенным в работах [6, 7]. Анализ показал, что в тензорах изгиба-кручения отлична от нуля одна компонента, измеренная на расстоянии 0,5 мкм от включения.

С удалением от включения поле дальнедействующих напряжений спадает. Следует отметить, что в деформированных сталях локально отличны от нуля одна-две компоненты тензора изгиба-кручения (плотности дислокаций), а амплитуды их возрастают с увеличением степени деформации, что свидетельствует о более значительном изгибе кристаллической решетки стальной матрицы вблизи включений [2]. Чем больше размер включения, тем больше величина максимального напряжения для всех типов изучаемых включений, и тип включения также оказывает влияние на уровень напряжений в стальной матрице (табл. 1):

Таблица 1

Значения максимальных напряжений σ_d вблизи включений в центробежнолитой стали «40X25H20C2»

Тип включения	Размер включения D_v , мкм	σ_d , МПа
MnO·Al ₂ O ₃	6	790
	16	850
TiCN	5	610
	20	680
Cr ₂ O ₃	6	715
	20	780
MnO·SiO ₂	8	765
	21	820
(Fe, Mn)S	10	530
	24	570

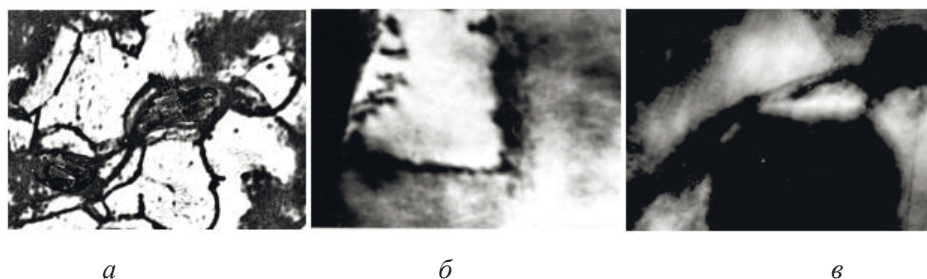
Дальнедействующие поля напряжений вблизи включений вносят заметный вклад в напряжение течения. Их нельзя классифицировать как элемент субструктуры, но они являются характерным фактором упрочнения. Включения оказывают локальное влияние на микроструктуру центробежнолитой стали «40X25H20C2». Накопление термических напряжений в аустенитной матрице вблизи включений способствует возникновению напряжений в межфазных границах включение-матрица, которые провоцируют различные перестройки дефектной структуры этих границ [2]. Эти перестройки структуры границы включение-матрица сводятся к различным элементарным актам перераспределения граничных (межфазных) дислокаций и точечных дефектов, что приводит к размножению, аннигиляции, скольжению и переползанию дислокаций, а также реакциям между ними.

Если перечисленные процессы носят массовый характер, они определяют характер изменения строения границы включение-матрица и особенности эволюции ее дислокационной структуры в результате коррелированного сме-

щения многих разнородных атомов. Перестройки дислокаций в границах включение–матрица диктуются геометрическими условиями, когда дислокации стремятся распределиться так, чтобы области с напряжениями в решетке разных знаков расположились упорядоченно. Дислокации, вакансии, атомы примесей, находящиеся в межфазных границах, как и сами границы, являются электронными дефектами, так как дальнедействующие поля их напряжений создают локальные нарушения распределения зарядов, создавая неоднородности в распределении электронной плотности [2].

Сами дислокации обладают электрическим зарядом и взаимодействуют друг с другом. Образование группировок дефектов, создающих разные по величине и знаку электрические поля, способствует перераспределению самих дефектов (это как бы «внутренне электростимулированный» процесс) [2]. Перераспределение заряженных дефектов приводит, в свою очередь, к возникновению электрических полей. Различие знаков и величин зарядов обуславливает характерные особенности взаимодействия дислокаций на границах включение–матрица. Высокая температура кристаллизации стали активирует взаимодействие дислокаций в границах. Следует учитывать также дополнительную активацию процессов перестройки в межфазных границах, обусловленную сгущением теплопроводности [2], а значит и локальным повышением температуры в этих областях. Перестройки дефектной структуры границ включение–матрица связаны с механизмом групповых переходов атомов в новые положения. Если такой переход имеет кооперативный характер, его результатом является расщепление изучаемых границ на межфазную границу включение–матрица с меньшей энергией и зеренные больше-, средне- и малоугловую границы (рис. 3, *а, б*) [3].

Расщеплению границы включение–матрица предшествует групповой кооперативный процесс, когда атомы согласованно смещаются в новое положение, соответствующее более низкому уровню свободной или граничной (межфазной) энергии. В результате образуется новый граничный слой, смещенный на некоторое расстояние относительно первоначального положения атомов или несколько слоев. Изменение поверхностной энергии Δw получается за счет появления внутри межфазной границы участков иного атомного строения, соответствующего строению специальных границ с меньшей энергией [2]. Следует отметить, что перестройки дефектной структуры межфазных границ включение–матрица происходят в условиях непрерывного охлаждения стали после кристаллизации. Поэтому для прохождения описанных процессов в изучаемых границах необходимо, чтобы скорость охлаждения обеспечивала временные условия, достаточные для перераспределения дефектов.



а *б* *в*
 $a - \times 900; б, в - \times 20000$
 Рис. 3. Расщепление границ включение–матрица (*а, б*) и образование полигональных вторичных границ вблизи включения (*в*)

Обнаруженный процесс расщепления межфазных границ включение-матрица в центробежнолитой стали «40X25H20C2» является одним из механизмов образования вторичных границ вблизи включений. Еще одним источником формирования вторичных границ связан с неметаллическими включениями. Напряжения, которые возникают вблизи неметаллических включений в процессе кристаллизации и охлаждения стали при центробежном литье имеют термическую природу.

Многочисленные расчеты показали, что величина термических напряжений вблизи включений превышает предел текучести стали [2, 8], поэтому должна развиваться пластическая их релаксация в зонах матрицы, прилегающих к включениям, что способствует уменьшению напряжений. Вокруг включений создаются «пластические» зоны с повышенной плотностью дислокаций. В процессе охлаждения стали термические напряжения непрерывно возрастают до определенного уровня (критического значения, равного пределу текучести матрицы), а затем релаксируют путем пластических сдвигов или ротаций в области, прилегающей к включению. Релаксация идет непосредственно от межфазной границы включение-матрица, которая может выступать в качестве источника дислокаций [2], или на некотором расстоянии от нее. При этом происходит взаимодействие дислокаций и их перестройка с образованием новых вторичных мало- и среднеугловых границ (рис. 4, в). Поскольку появление термических напряжений связано с охлаждением стали от довольно высокой температуры, в релаксационных процессах большую роль играют точечные дефекты, имеющиеся на межфазных границах включение-матрица [2, 8]. Повышенное количество вакансий способствует переползанию дислокаций, что облегчает полигонизационные процессы вблизи включений.

А, в свою очередь, механические испытания показали, что при одинаковой макроструктуре отливки вблизи ее внутренней либо наружной поверхности неметаллические включения оказывают существенное негативное влияние на уровень прочностных и пластических характеристик (табл. 2):

Таблица 2

Механические свойства центробежнолитой стали «40X25H20C2»

Место вырезки образца	Макроструктура, содержание включений, балл по ГОСТ 1778	Механические свойства			
		σ_b , МПа	σ_t , МПа	δ , %	Ψ , %
Внутренняя поверхность заготовки	столбчатая структура, 2 балл	535	310	18,5	19,3
Внутренняя поверхность заготовки	столбчатая структура, 3...4 балл	455	265	15,2	15,3
Наружная поверхность заготовки	смешанная (равноосные и столбчатые кристаллы), 0,5 балла	570	365	15,5	14,5

В зонах заготовки вблизи ее внутренней поверхности со столбчатой макроструктурой увеличение загрязненности стали эндогенными включениями привело к снижению прочностных свойств на 15...18, а пластических – на 18...21 %.

Выводы

Повышенное содержание включений вызывает снижение механических свойств центробежнолитой стали «40X25H20C2» при одинаковом характере макроструктуры заготовки.

Включения являются источниками внутренних напряжений, что способствует образованию дефектов (микротрещин).

Кроме того, они вызывают локальные процессы структурных изменений в аустенитной матрице, связанные с расщеплением межфазных границ включение–матрица и полигонизационными процессами вблизи включений, что способствует образованию вторичных границ.

Обговорено основні види неметалевих включень у відцентроволитій сталі «40Х25Н20С2» та їхній вплив на локальну структуру й утворення вторинних меж і тріщин. Встановлено, що підвищений вміст таких включень викликає, за однакового характеру макроструктури заготовки, зниження механічних властивостей цієї сталі. Показано, що включення є джерелами внутрішніх напруг і сприяють утворенню дефектів (мікротріщин), а, крім того, викликають локальні процеси структурних змін в аустенитній матриці, пов'язані з розщепленням міжфазних меж включення–матриця і полігонізаційними процесами поблизу включень, сприяючи утворенню вторинних меж. Механічні випробування показали, що за однакової макроструктури вилівка неметалеві включення чинять істотний негативний вплив на рівень міцності та пластичні характеристики. Так, у зонах поблизу внутрішньої поверхні зі стовпчастою макроструктурою збільшення рівня забрудненості сталі через включення призвело до зниження міцності на 15...18, а пластичності – на 18...21 %.

Ключові слова: відцентроволита сталь, тріщини, неметалеві включення.

The main types of non-metallic inclusions in centrifugal «40H25N20S2» cast steel as well as their effect on the local structure and formation of secondary boundaries and cracks have been discussed. It was found that a higher content of such inclusions causes the reduction of mechanical properties of this steel at the same character of the workpiece macrostructure. It is shown that the inclusions are sources of internal stresses and promote the defect formation (microcracks). Moreover, they cause the local structural changes in austenitic matrix connecting with splitting of interphase inclusion–matrix boundaries and polygonization processes near inclusions promoting the formation of secondary boundaries. Mechanical tests have shown that at the same macrostructure of casting non-metallic inclusions have a significant negative influence on the level of strength and plastic characteristics. In the areas near to its inner surface with a columnar macrostructure the increase of inclusions content in steel has led to reduction of strength by 15...18%, and ductility – by 18...21%.

Keywords: centrifugal cast steel, cracks, non-metallic inclusions.

1. Юдин С. Б. Центробежное литье / С. Б. Юдин, М. М. Левин, С. Е. Розенфельд. – М.: Машиностроение, 1972. – 415 с.
2. Губенко С. И. Неметаллические включения в стали / С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.
3. Малиночка Я. Н. Сульфиды в сталях и чугунах / Я. Н. Малиночка, Г. З. Ковальчук. – М.: Металлургия, 1988. – 248 с.
4. Идельчик И. Е. Гидравлическое сопротивление. – Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 221 с.
5. Эллиот Д. Ф. Термохимия сталеплавильных процессов / Д. Ф. Эллиот, М. Глейзер, В. Рамакришна. – М.: Металлургия, 1969. – 252 с.
6. Козлов Э. В. Дальнействующие поля напряжений и их роль в деформации структурно-неоднородных материалов / Э. В. Козлов, Д. В. Лычагин, Н. А. Попова // Физика прочности и пластичности гетерогенных материалов: сб. научных трудов Ленинградского физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН (ЛФТИ). – Л.: ЛФТИ, 1988. – С. 3–13.
7. Конева Н. А. Эволюция дислокационной структуры и стадии пластического течения поликристаллического железоникелевого сплава / Н. А. Конева, Д. В. Лычагин, С. П. Жуковский // Физика металлов и металловедение. – 1985. – Т. 60, № 1. – С. 171–179.
8. Губенко С. И. Трансформация неметаллических включений в стали. – М.: Металлургия, 1991. – 225 с.