

Лекция 47

Тема: Дефекты при разливке заготовок

План лекции:

Дефекты при разливке заготовок

1. Горячие и холодные трещины

Из поверхностных дефектов наиболее сложными по своему происхождению и трудными по предотвращению являются горячие трещины, возникающие при температурах, близких к температурам кристаллизации. В прямоугольных слябах и заготовках такие трещины могут располагаться на их гранях и ребрах (углах). Угловые трещины в основном продольные, а трещины на гранях могут быть и продольные и поперечные. Круглые заготовки поражены, как правило, продольными трещинами.

Длина горячих трещин различна (0,1 — 1 м и более). Они имеют прерывистую и зигзагообразную (иногда с окисленными кромками) поверхность. Металл вблизи трещин обычно обезуглерожен. Эти признаки являются основными внешними отличиями горячих трещин от других видов трещин.

Механические свойства стали при высоких температурах определяют способность ее сопротивляться трещинообразованию. У большинства углеродистых марок стали хрупкое разрушение со значениями относительного удлинения, близкими к нулю, наблюдается в области температур $> 1623—1673$ К, а заметная пластичность наступает при последующем охлаждении. Низкоуглеродистые стали и стали с высоким содержанием углерода приобретают пластичность в области температур, расположенных ниже линии солидуса. Наименьшая пластичность наблюдается у сталей, содержащих 0,19-0,21 % С.

Напряжения от ферростатического давления в корке слитка возникают только тогда, когда она в результате усадки начнет сокращаться и отходить от стенок. Эти напряжения достигнут максимального значения при полном отходе корки от стенок. Усадочные напряжения в корке образуются с появлением сил, препятствующих сокращению ее линейных размеров.

В результате перепада температур по толщине корки и различной усадки, отдельных ее слоев участки, охладившиеся до более низкой температуры, сокращаются значительно сильнее, что приводит к возникновению изгибающих моментов, стремящихся прогнуть корку. Если под действием внешних сил корка будет прижата к стенке изложницы или кристаллизатора, то в ней возникнут термические напряжения, при которых могут образовываться горячие трещины.

Холодные трещины возникают при низких температурах в металле со значительно выраженными упругими свойствами. Различают два вида холодных

трещин: от температурных напряжений (наиболее распространенный вид) и от фазовых превращений (перекристаллизация).

В слитках углеродистой стали фазовые превращения происходят обычно выше 973 К, когда металл обладает значительной пластичностью и ползучестью, что препятствует развитию напряжений. В таких слитках в обычных условиях холодные трещины образуются только от температурных напряжений.

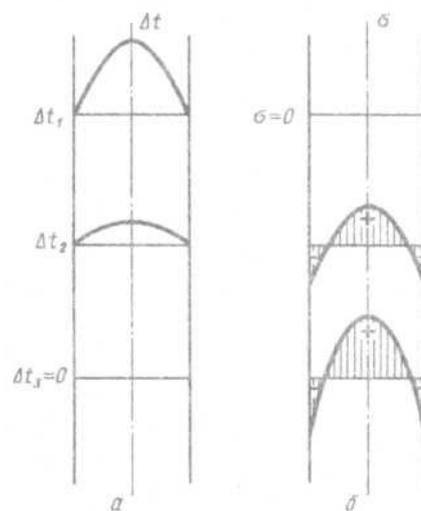


Схема изменений градиента температур Δt (а) и напряжений σ (б) в слитке при его охлаждении

Трещины от температурных напряжений являются результатом разрядки внутренних напряжений, возникающих в слитке в процессе охлаждения и нагрева. Охлаждение слитка после разливки и затвердевания вызывает изменение в нем температурного перепада по сечению, вследствие чего в слитке возникают непрерывно изменяющиеся температурные напряжения (сжимающие на поверхности и растягивающие внутри). Это объясняется тем, что остывающие медленнее внешние слои слитка тормозят усадку внутренних слоев. Температурные напряжения периода охлаждения достигают максимального значения к моменту полного остывания слитка. При повышенных температурах (> 873 К) упругие свойства стали выражены незначительно, в ней интенсивно развивается температурное разупрочнение, обуславливающее снятие напряжений, т.е. явление ползучести (пластическая деформация без роста напряжений). По мере снижения температуры металла он теряет способность к температурному разупрочнению и приобретает упругие свойства. Наиболее резкий переход из области ползучести в область упругих деформаций происходит при температуре поверхности заготовок $\sim 823\text{—}923$ К ($T_{кр}$). Образующийся к этому моменту перепад температур между поверхностью и сердцевиной заготовки определяет величину возникающих при дальнейшем ее охлаждении остаточных напряжений.

В отличие от горячих холодные трещины чаще появляются в углеродистых спокойных сталях, чем в кипящих и низкоуглеродистых. Это связано с большей пластичностью последних и округлостью усадочных дефектов в них. Повышение содержания углерода в стали приводит к росту модуля упругости, коэффициента линейного теплового расширения и увеличивает вероятность образования холодных трещин.

Ввод в металл легирующих элементов, способствующих росту температуры перехода из области ползучести в область упругих деформаций, уменьшению теплопроводности стали, увеличению коэффициента линейного расширения, модуля упругости, приводит к росту напряжений в слитке и вероятности его разрушения. Весьма склонны к образованию холодных трещин легированные, хромистые, хромоникелевые, хромоникелемолибденовые стали. Во многих легированных сталях $T_{кр}$ выше, чем в углеродистых на 100-150 К. В связи с

ростом напряжений в малотеплопроводных сталях трещины в них могут образовываться и при охлаждении заготовок даже после длительного выдерживания на складе. С целью исключения образования трещин непрерывнолитые слябы (заготовки) подвергают отжигу в специальных печах в течение 8—16 ч или охлаждают в стопе под специальными теплоизолирующими колпаками. Наиболее предпочтительной является прокатка слябов (заготовок) с горячего посада. Это сокращает энергозатраты и время от конца разливки до получения готового металлопроката, а также способствует получению продукции без холодных трещин.

2. Шлаковые включения и газовые пузыри

При применении защитных шлаковых смесей для непрерывной разливки может повышаться загрязненность металла крупными шлаковыми включениями. Шлаковые включения, встречающиеся на поверхности и проникающие внутрь металла, являются многофазными, преимущественно силикатного характера. В состав экзогенных включений, обнаруженных в непрерывных слитках коррозионно-стойкой стали X23H18, входит CaF_2 , что подтверждает шлаковое происхождение включений. В стали OX23H28M3Д3Т встречаются крупные шлаковые включения глобулярной формы. В их состав входят соединения $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ и $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$. В сортовых заготовках крупные шлаковые включения встречаются чаще в районе ребер, в слябовых — в районе узких граней. Часто шлаковые включения обнаруживают в районе складок, возникающих на поверхности в результате возвратно-поступательного движения кристаллизатора. Загрязненность непрерывных слитков крупными шлаковыми включениями зависит от состава применяемых шлаковых смесей и может быть уменьшена при соблюдении определенных условий технологии непрерывной разливки (разливке металла под уровень и правильно выбранной амплитуде качания кристаллизатора). При неудачном подборе составляющих шлаковых смесей может значительно повышаться загрязненность крупными (> 40 мкм) шлаковыми включениями. Наибольшую загрязненность имеют плавки, разлитые с применением защитных смесей открытой струей, значительно меньше загрязненность плавов, разлитых с применением шлаковых смесей с подводом металла под уровень. Практически такая же загрязненность включениями наблюдается у плавов, разлитых под жидким парафином, однако в этом случае не обеспечивается достаточно хорошее качество поверхности.

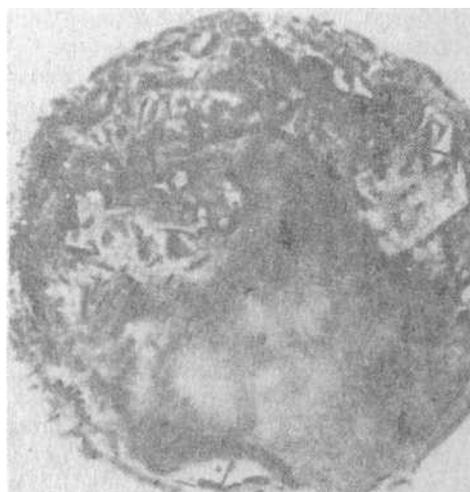
При разливке под шлаком загрязненность очень крупными шлаковыми включениями (> 200 мкм) снижается по сравнению с разливкой без защитного шлака.

При деформации стали с повышенным содержанием алюминия и титана групповые включения образуют в макроструктуре горячекатаного металла дефекты в виде полосок повышенной травимости протяженностью $(0,5-1,0) \cdot 10^{-3}$ м. При испытании цилиндрических образцов на осадку эти дефекты раскрываются

в овальные трещины глубиной $(2-3) \cdot 10^{-3}$ м. На поверхности листа крупные шлаковые включения могут образовывать грубые плены и надрывы.



Грубые шлаковые включения алюмосиликатов у поверхности



Грубые силикатные шлаковые включения

Загрязнение непрерывных слитков крупными шлаковыми включениями происходит из-за нарушения Технологии раскисления стали, прожигания стаканов промежуточных ковшей, затягивания шлака из промежуточных ковшей в кристаллизаторы, низкого уровня металла в промежуточном ковше, недостаточной глубины погружения стакана для подвода металла под уровень, некачественной шлаковой смеси, колебаний уровня металла в кристаллизаторе.

Основные меры, позволяющие уменьшить загрязненность непрерывнолитых заготовок крупными шлаковыми включениями: соблюдение порядка подачи раскислителей в ковши температурного режима; применение более стойких огнеупорных материалов в разливочном припасе; тщательная подготовка промежуточных и сталеразливочных ковшей; обеспечение необходимого погружения стакана в металл, находящийся в кристаллизаторе; правильный подбор и применение качественной шлакообразующей смеси и равномерная подача ее в

кристаллизатор, поддержание постоянного уровня металла в промежуточном ковше и кристаллизаторе.

Для уменьшения загрязненности групповыми включениями необходимо обеспечить защиту металла (при раскислении его легкоокисляющимися элементами) от вторичного окисления на пути промежуточный ковш — кристаллизатор.

Уменьшение загрязненности металла групповыми включениями так же может быть достигнуто усовершенствованием технологии выплавки и раскисления. Количество групповых включений в стали с повышенным содержанием алюминия значительно снижается при предварительном раскислении металла в сталеплавильном агрегате и в ковше жидким алюминием или алюминием в виде проволоки по сравнению с раскислением кусковым алюминием. Уменьшение загрязненности коррозионностойкой стали, содержащей титан, групповыми включениями достигается снижением содержания углерода, а, следовательно, и возможностью снижения в стали содержания титана, а также продувкой металла в ковше аргоном. Крупные шлаковые включения с поверхности заготовки устраняют зачисткой на допустимую глубину.

Газовые пузыри, иногда называемые подкорковыми — дефект макро-структуры поверхностной зоны слитка в виде единичных или групповых пор и небольших пустот округлой или вытянутой формы, заполненных газом, иногда выходящих на поверхность.

Пузыри располагаются по периметру

непрерывных слитков в нахоложенных участках. Наибольшее количество пузырей наблюдается в районе узких граней и углов, а также на стыке кристаллитов, растущих от узких и широких граней.

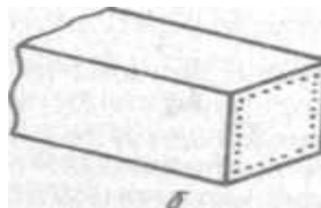
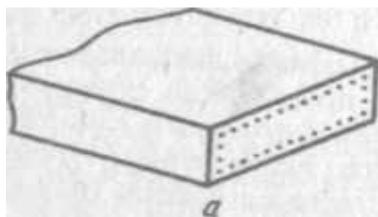


Схема расположения подкорковых пузырей: а - листовая заготовка; б - сортовая заготовка

При деформации пузыри, близко расположенные к поверхности, в результате окисления при нагреве слитков могут не свариваться и

вызывать образование волосовин, плен (в случае единичных пузырей) или рванин (в случае группового расположения крупных пузырей).

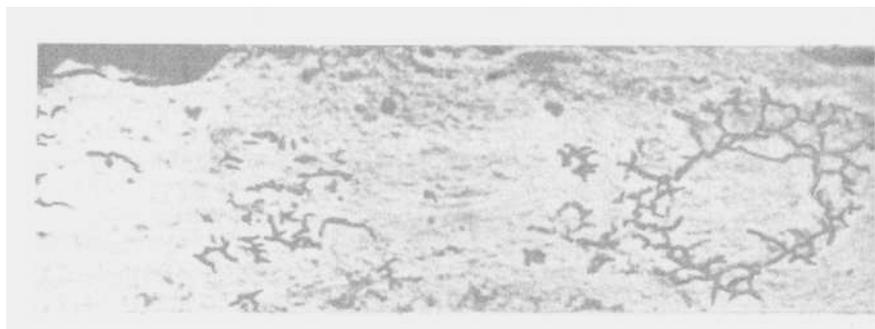
Возникновение подкорковых пузырей в непрерывных слитках, как и в обычных, связано чаще всего недостаточным раскислением металла. К образованию подкорковых пузырей так же может привести повышенное содержание влаги в защитной шлакообразующей смеси, прожигание стакана промежуточного ковша, завороты окисленной корки.

Подкорковый пузырь может возникнуть практически в непрерывнолитых заготовках стали всех марок.

3. Паукообразные и сетчатые трещины

Наружные паукообразные или сетчатые трещины в непрерывнолитых заготовках относятся к дефектам, которые преимущественно выявляются после горячего травления или после огневой зачистки. При прокате они трансформируются в плену. Плены стали предметом пристального внимания специалистов в области непрерывной разливки лишь в последнее десятилетие. Это можно объяснить тем, что в последнее время металл непрерывной разливки широко используют для изготовления ответственных изделий, например газопроводных труб высокого давления.

Сетчатые трещины зарождаются преимущественно по впадинам рельефа поверхности, например, по складкам от возвратно-поступательного движения кристаллизатора или по ужиминам, т.е. по наиболее перегретым участкам поверхности сляба. Наибольшее количество сетчатых трещин наблюдается по вертикали, соответствующей району подвода струи. Травление поперечных темплетов с сетчатыми трещинами реактивом Стенда показало, что трещины могут располагаться между столбчатыми дендритами или пересекать их. Металл стенок трещин обезуглерожен и окислен. Глубина залегания сетчатых трещин достигает $(5—8) \cdot 10^{-3}$ м, а в отдельных случаях $(12—15) \cdot 10^{-3}$ м. Количество трещин уменьшается при снижении температуры разливаемой стали, удалении струи металла от оболочки слитка и увеличении отношения содержания марганца к содержанию серы > 50 . Их количество уменьшается также при снижении интенсивности вторичного охлаждения с 1,1—3,2 до 0,6—1,0 л/кг. Отмечено влияние раздутия широких граней сляба на образование сетчатых трещин. Так, при увеличении раздутия по широким граням с 5 до 6—17 мм пораженность сетчатыми трещинами возростала примерно в два-три раза. Механизм их образования имеет промежуточный характер между механизмами образования горячих и термических трещин. Сетчатые трещины зарождаются в наиболее перегретых участках поверхности сляба, где теплоотвод по каким-либо причинам замедлен. Поверхностные слои металла из-за наличия включений, диффузии меди или других особенностей химического состава значительно ослаблены. Сильный термический удар при попадании



Паукообразные трещины

слитка в зону вторичного водяного охлаждения способствует росту сетчатых трещин.

Образование сетчатых трещин на поверхности непрерывнолитых заготовок объясняется тем, что действующие напряжения превышают прочность границ первичных зерен, ослабленных неметаллическими включениями. Наряду с термическими и усадочными напряжениями важная роль отводится локальным напряжениям, возникающим в результате выделения водорода из твердого раствора. При выделении водорода из твердого раствора локальные напряжения могут достигать $1/4$ предела прочности металла при рассматриваемых температурах. При концентрации водорода в жидком металле $> 5 \cdot 10^{-4} \%$ суммарное напряжение может быть разрушающим. Зависимость числа сетчатых трещин n и глубины их залегания L от содержания водорода в жидком металле характеризуется следующими данными:

H- $10^{-4}, \%$	5,0	6,2	7,0	7,8	8,1	
n , шт/дм ² !.....	4	Нет	8	26	18	32
L , мм.....	2 – 4	-	2 – 4	2 – 6	2 – 12	3 – 13

Обращает на себя внимание значительная разница в пораженности заготовок различных плавок сетчатыми и паукообразными трещинами. Это объясняется нестабильностью физических свойств шлакового гарнисажа, образующегося в кристаллизаторе и изменяющегося под действием металлодобавок. Подобное объяснение связано с тем, что с изменением физических свойств гарнисажа при замене экзотермических защитных смесей теплоизолирующими пораженность заготовок паукообразными трещинами уменьшилась примерно на порядок. Повышение чистоты границ первичных зерен, прочности и пластичности металла при высоких температурах должно менее эффективно сказываться на возникновении паукообразных трещин, связанных с появлением жидких прослоек меди по границам зерен.

Сетчатые трещины образуются ниже температур солидуса, так как они проходят по твердым границам, ослабленным неметаллическими включениями. Образование местных участков с крупными зернами связано с местным разогревом поверхностных слоев оболочки слитка в результате нарушения ее контакта с кристаллизатором. Паукообразные трещины возникают при температурах ликвидуса и проходят по границам первичных зерен, ослабленным жидкими пленками цветных металлов или их легкоплавкими оксидами. По этому признаку

трещины разделяют на сетчатые и паукообразные. Трещины обоих типов могут расти одинаково под действием термических напряжений, поэтому способы их устранения или уменьшения пораженности ими непрерывнолитых заготовок часто совпадают. Например, к таким общим способам можно отнести снижение фонда растягивающих напряжений в кристаллизаторе и уменьшение интенсивности вторичного охлаждения. Если же рассматривать только паукообразные трещины, то для предупреждения их появления необходимо устранить истирание медных стенок кристаллизатора, а также ограничить в составе шихты присутствие цветных металлов, плохо растворимых в твердой стали (медь, цинк и др.).

На практике для предупреждения паукообразных и сетчатых трещин применяют защитные смеси, образующие шлаковый гарнисаж на всей поверхности гладких рабочих стенок кристаллизатора.

Устранение сетчатых трещин неразрывно связано с мерами по ликвидации ужимин и грубой складчатости на поверхности оболочки слитка в кристаллизаторе. Практически это достигается всеми технологическими приемами, которые обеспечивают формирование равнотолщинной оболочки слитка по периметру кристаллизатора. Эффективными приемами являются также модифицирование и микролегирование поверхностных слоев заготовок в процессе разливки.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите причины образования холодных и горячих трещин.
2. Каково влияние температурных напряжений на образование трещин?
3. Назовите причины образования шлаковых включений в заготовках.
4. Расскажите о месте расположения шлаковых включений при разливке металла на вертикальных и криволинейных МНЛЗ.
5. Расскажите об образовании газовых пузырей.
6. Какова длина горячих трещин?
7. Чем обычно проложены круглые заготовки ?
8. Назовите причины образования горячих трещин?
9. Когда возникает подкорковый пузырь ?

Использованная литература:

Попандопуло «Непрерывная разливка стали» стр. 201 – 210

