

А. Н. Смирнов, Д. В. Спиридонов*, А. П. Верзилов, В. А. Головатый**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

* ПАО «Артемковский завод по обработке цветных металлов», Артемовск

** Донецкий национальный технический университет, Донецк

Влияние условий формирования круглого медного слитка в кристаллизаторе МПНЛЗ на трещинообразование при затвердевании

Формирование тонких продольных трещин, формирующихся в поверхностных и подповерхностных слоях, обусловлено концентрацией по границам кристаллов легкоплавких элементов или соединений, входящих в состав рафинированной меди. Установлено, что слиток, отлитый в условиях возвратно-поступательного движения кристаллизатора, имеет более плотную и мелкозернистую структуру, а поверхность его более чистая и ровная без характерных бугорков (ликваты фосфора) и ужимин.

Ключевые слова: слиток, кристаллизатор, рафинированная медь, продольные трещины, кристаллическая структура, полунепрерывная разливка

В практике металлургического производства основной тенденцией развития современных технологий непрерывной разливки металла является стремление повышения их производительности (в том числе за счет увеличения скорости вытяжки) при обеспечении регламентируемого техническими условиями качества поверхностных и подповерхностных слоев заготовки. Эта проблематика становится еще более актуальной в случае реализации процессов литья для металлов и сплавов, имеющих повышенную теплопроводность (например, меди и медных сплавов) [1-4].

В настоящей работе рассмотрены особенности затвердевания круглого медного слитка, разливаемого на машинах полунепрерывного литья заготовок (МПНЛЗ), которые получили широкое распространение в металлургической практике [1, 3, 5]. Известно, что при разливке меди на МПНЛЗ затвердевание слитка практически полностью происходит непосредственно в кристаллизаторе, что обеспечивает крайне высокую интенсивность отвода тепла в ходе затвердевания. При этом интенсивность отвода тепла от локальных участков заготовки может варьироваться в значительных пределах, что обусловлено многими факторами, в том числе состоянием рабочей поверхности кристаллизатора, величиной зазора между стенкой кристаллизатора и поверхностью заготовки, деформацией твердого каркаса вследствие развития высокого уровня внутренних напряжений (особенно при несимметричном затвердевании) и пр.

Исследования выполнялись в условиях ПАО «Артемковский завод по обработке цветных металлов» (АЗОЦМ) при разливке рафинированной меди (содержание меди в

пределах 99,85-99,93%) в виде круглых слитков диаметром 250 мм на вертикальной МПНЛЗ. При этом во внимание принимался тот факт, что медь огневого рафинирования имеет ряд специфических особенностей в сравнении с электролитической медью. В частности такая медь содержит в своем составе примеси следующих элементов: свинец, железо олово, хром, никель, цинк, фосфор, серебро. Часть из этих примесей при определенных условиях может образовывать легкоплавкие вещества, соединения, которые, располагаясь по границам кристаллов, ослабляют их границы [6, 7].

В ходе выполненных металлографических исследований установлено, что поверхность слитков поражена весьма характерными продольными трещинами, расположенными на различных участках. Эти трещины имеют длину преимущественно до 300 мм, ширину 0,05-0,50 мм и распространяются по границам кристаллов на глубину 20-30 мм (рис. 1).

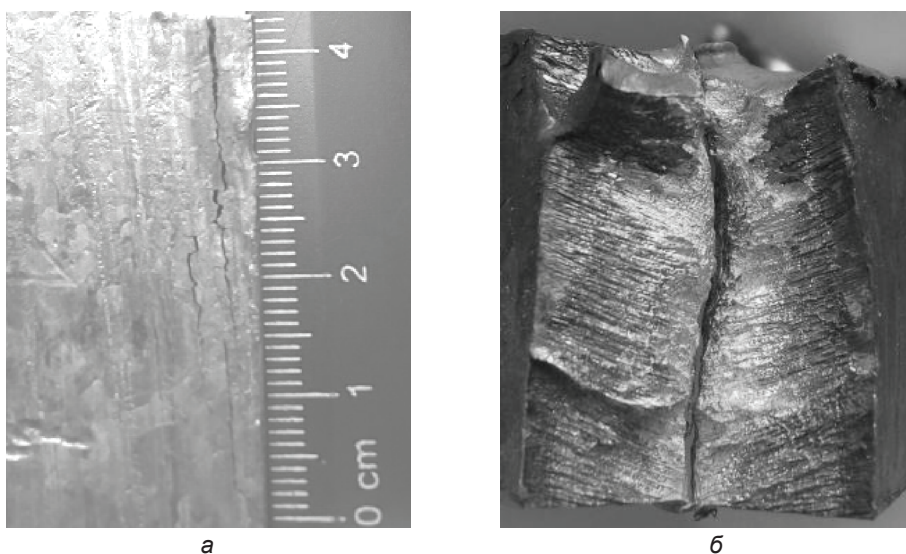


Рис. 1. Внешний вид продольной трещины круглого медного слитка: а – вид на поверхности; б – вид поверхности излома по трещине (две половинки)

При этом малая ширина трещин затрудняет их визуальную идентификацию и удаление, либо выбраковку дефекта при порезке слитков. Между тем при нагреве слитков, пораженных подобными трещинами, их поверхность окисляется, что затрудняет последующее заваривание при прессовании или обработке давлением. В случае использования слитков, пораженных продольными трещинами, для изготовления заготовок, например, типа рылец фурм методомковки, трещины раскрываются, что приводит к окончательному браку полуфабрикатов.

Наблюдение динамики процесса затвердевания слитков выполнялось по оценкам конфигурации жидкой лунки слитка. Все слитки были отлиты в кристаллизаторы, которые не совершали возвратно-поступательных движений. При этом в конце разливки после закрытия стопора в кристаллизатор заливали 2 кг жидкого свинца при температуре 400 °С. При этом жидкий свинец в силу его более высокой плотности стекал вниз к границе фронта затвердевания. Промежуток между завершением процесса литья и заливкой свинца составлял во всех случаях 15 с, что в пересчете дает поправку на глубину лунки – 23 мм при скорости разливки 5,7 м/ч.

Конфигурацию лунки определяли на продольных сечениях, вырезанных вдоль оси слитков. Для каждого слитка получали два перпендикулярных сечения, что позволяло достаточно объективно судить о толщине твердой корочки для любого горизонтального сечения. На рис. 2 приведены характерные результаты, полученные для различных условий разливки (таблица).

Обобщая представленные на рис. 2 результаты, следует прежде всего обратить внимание, что твердая корочка имеет различную толщину по периметру горизонтальных сечений. Эта разнотолщинность проявляется уже в верхней половине жидкой лунки, то есть в период формирования быстрого продвижения фронта затвердевания. На наш взгляд, наиболее вероятной причиной появления разнотолщинности, видимо, является коробление твердой оболочки слитка, вследствие чего отдельные его участки отходят от поверхности кристаллизатора, что соответственно существенно уменьшает интенсивность отвода тепла и снижает интенсивность наращивания твердой корочки. В наших исследованиях наиболее харак-

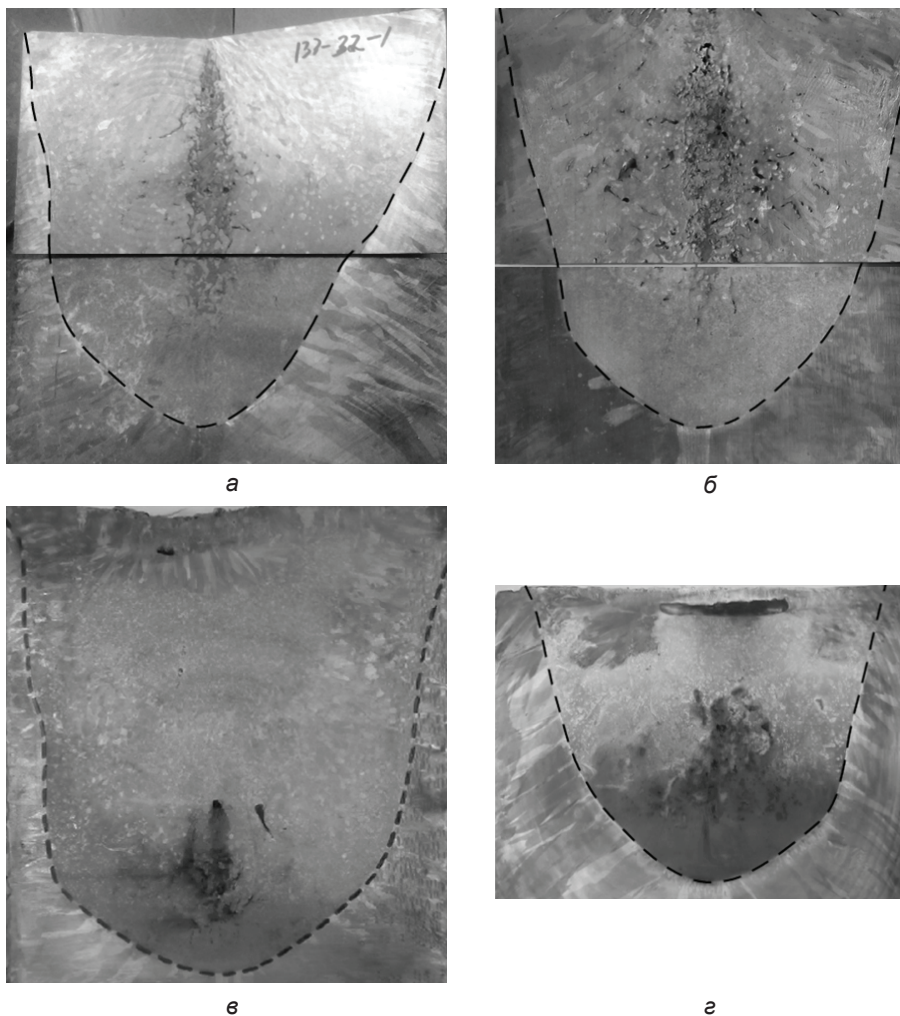


Рис. 2. Конфигурация жидкой лунки для различных режимов разливки круглого слитка

Параметры разливки экспериментальных слитков

Параметр	Слиток (рис. 2)			
	а	б	в	г
Длина кристаллизатора, мм	300	300	300	200
Материал рабочей стенки кристаллизатора	медь	графит	медь	медь
Температура металла в кристаллизаторе, °С	1093	1098	1095	1085
Скорость разливки, м/ч	6,6	6,5	5,7	5,7
Температура входящей воды, °С	19,7	19,5	22	22
Температура выходящей воды, °С	37	40	28,7	27,2
Расход воды, м³/ч	12,6	12,3	20,6	22,7
Давление охлаждающей воды, МПа	0,05	0,05	0,06	0,06
Глубина жидкой лунки, мм	240	265	293	180

терно она проявилась в слитке, представленном на рис. 2, а. Следует при этом отметить, что в слитке, отлитом в кристаллизатор с графитовой вставкой, разнотолщинность твердой корочки оказалась значительно меньше, чем в сравнительном (рис. 2, а-б). Принимая во внимание, что интенсивность отвода тепла через графитовые стенки несколько ниже, чем через медные, можно предположить, что условия охлаждения слитка являются весьма важными при его формировании. Это предположение подтверждается результатами разливки слитков, лунки которых представлены на рис. 2, в-г.

Между тем, поскольку кристаллизация медного слитка начинается в перегретом расплаве, перемещаемом конвективными потоками, которые образуются вследствие инерционного движения металла, вызванного падением струи металла из промежуточного ковша в кристаллизатор, первичное зарождение и рост кристаллов оказываются возможны только на холодных стенках кристаллизатора, а наращивание твердой корочки в условиях направленного теплоотвода носит последовательный характер.

На начальной стадии затвердевания кристаллы медного слитка зарождаются на поверхности кристаллизатора и растут вдоль его периметра с образованием тонкого твердого слоя. Этот рост прекращается вследствие образования сплошного твердого каркаса, в котором внешние поверхности соседних кристаллов соприкасаются и «свариваются» между собой. Затем этот твердый слой начинает расти по направлению к центральной области слитка, образуя крупные кристаллиты (рис. 3, а). Известно, что для чистых металлов поверхность фронта затвердевания выглядит как гладкая и плоская на макрокопическом уровне. Между тем поверхность фронта затвердевания все же является микроскопически шероховатой [8-10]. При этом фронт затвердевания оттесняет примеси, растворенные в расплаве меди.

Так как оттесненное растворенное вещество не может быть распределено однородно вдоль всего фронта кристаллизации, то неравномерное распределение растворенных веществ в жидкости у межфазной поверхности раздела твердой и жидкой фаз в некоторой степени препятствует равномерному росту кристаллов. При этом необходимо отметить, что растворенные в меди примеси могут образовывать легкоплавкие соединения. По мере увеличения концентрации растворенных примесей в металле конфигурация межфазной поверхности между твердой и жидкой фазами изменяется от плоской и гладкой до ячеистой. Микровкрапления примесей могут располагаться по границам кристаллов в виде пленок и сохраняться в жидком состоянии внутри твердой фазы уже после прохождения фронта затвердевания.

Отметим, что вследствие высокой скорости продвижения фронта затвердевания (порядка 0,5-1,2 мм/с) в периферийных зонах слитка вероятность захвата легкоплавких компонентов внутрь твердого каркаса представляется вполне высокой. Поскольку скорость продвижения фронта затвердевания в подповерхностных слоях слитка оказывается наиболее высокой (порядка 0,5-1,2 мм/с), то легкоплавкие компоненты могут располагаться в виде пленок по границам кристаллов. Наличие в твердом каркасе микроучастков с незатвердевшими веществами фактически снижает его прочность и может служить источником возникновения первичных трещин.

В ходе наращивания твердой корочки происходит накопление в ней внутренних растягивающих напряжений, которые обуславливаются процессами усадки подповерхностных слоев и неравномерностью наращивания твердой фазы по периметру слитка. При достижении определенного уровня внутренних напряжений в местах ослабления твердой корочки легкоплавкими пленками возникают внутренние продольные микротрещины. В совокупности с другими факторами (например, износ рабочей поверхности кристаллизатора) эти микротрещины снижают прочность твердой корочки на локальных участках, что может приводить к короблению. Дальнейшее развитие этих трещин происходит в более низких горизонтах слитка и особенно после его выхода из кристаллизатора в зону вторичного охлаждения, где интенсивность отвода тепла возрастает за счет орошения водой.

На основании полученных результатов и выводов для повышения качества слитка (в части радикального снижения количества трещин) было предложено снизить скорость вытяжки слитка с 5,8-6,5 до 5,0 м/ч. При такой скорости отлито 2,5 м слитка в неподвижный кристаллизатор. Остальную его часть отливали в условиях возвратно-поступательного движения первичного формообразователя (амплитуда – 6 мм; частота – 1,5 Гц). Сравнение кристаллической структуры слитка для этих условий разливки приведено на рис. 3. Установлено, что слиток, отлитый в условиях возвратно-поступательного движения кристаллизатора,



а



б

Рис. 3. Характерные примеры макроструктуры слитков (поперечное сечение) с макрокристаллами (черными линиями отмечены положения трещин) отлитых в кристаллизатор длиной 300 мм: а – без его качания; б – с качанием

имеет более плотную и мелкозернистую структуру, а поверхность более чистая и ровная без характерных бугорков (ликваты фосфора).

Такое изменение структуры слитка следует объяснить с позиции того, что качание кристаллизатора можно рассматривать как вибрационное воздействие на расплав, которое имеет большое значение именно при формировании первичных участков твердой корочки [11, 12]. При этом она движется вдоль поверхности кристаллизатора, что позволяет сформироваться большому количеству зародышей твердой фазы. Дополнительным фактором в этом случае является волнообразование на зеркале металлической ванны, что также может способствовать развитию процесса зародышеобразования.

В целом слитки, отлитые с возвратно-поступательным движением кристаллизатора, имели в 3-5 раз меньше подповерхностных и внутренних трещин. Около 50 % опытных слитков трещин вообще не имели. Обнаруженные трещины были извилистыми, имели меньшую протяженность, чем в сравнительных слитках, и располагались преимущественно вдоль одной продольной линии, что следует связывать с состоянием рабочей поверхности кристаллизатора. Однако этот факт требует дополнительных исследований.

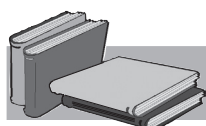
Выводы

Исследование процесса полунепрерывной разливки круглых слитков из меди огневого рафинирования, выплавляемой в условиях ПАО «АЗОЦМ», позволило установить, что такие заготовки имеют склонность к образованию тонких поверхностных и подповерхностных трещин, которые при дальнейшей переработке приводят к браку металлопродук-

ции. Установлено, что поверхность слитков поражена весьма характерными тонкими продольными трещинами, расположенными на различных их участках. Эти трещины имеют длину преимущественно до 300 мм, ширину 0,05-0,5 мм и распространяются по границам кристаллов на глубину 20-30 мм.

Исследование динамики процесса затвердевания выполнялось по оценкам конфигурации жидкой лунки слитка, которую получали путем заливки жидкого свинца. Показано, что твердая корочка имеет различную толщину по периметру горизонтальных сечений. Эта разнотолщинность проявляется уже в верхней половине жидкой лунки и зависит от условий затвердевания, в том числе и от интенсивности отвода тепла и скорости вытяжки заготовки. При этом наличие в твердом каркасе микро участков с незатвердевшими веществами фактически снижает прочность твердого каркаса и может служить источником возникновения первичных трещин. Дальнейшее развитие этих трещин происходит в более низких горизонтах слитка и особенно после его выхода из кристаллизатора в зону вторичного охлаждения.

Для повышения качества слитка в части радикального снижения количества трещин предложено снизить скорость вытяжки слитка с 5,8-6,5 м/ч до 5,0 м/ч и осуществлять разливку с возвратно-поступательным движением кристаллизатора. Установлено, что слиток, отлитый в таких условиях, имеет более плотную и мелкозернистую структуру, а поверхность его более чистая и ровная без характерных бугорков (ликваты фосфора) и ужимин. В целом слитки, отлитые с возвратно-поступательным движением кристаллизатора, имели в 3-5 раз меньше подповерхностных и внутренних трещин.



ЛИТЕРАТУРА

1. Кац А. М., Шадек А. Г. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов. - М.: Металлургия, 1983. - 208 с.
2. Уткин Н. И. Производство цветных металлов / Н.И. Уткин. - М.: Интермет Инжиниринг, 2004. - 442 с.
3. Никерова Л. Ф., Чернова Л. И. Непрерывные способы получения литых заготовок для производства полуфабрикатов из цветных металлов. - М.: Цветметинформация, 1973. - 112 с.
4. Габидуллин Р. М., Ливанов В. А., Шипилов В. С. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. - М.: Металлургия, 1977. - 168 с.
5. Смирнов А. Н., Макуров С. Л., Сафоносов В. М. Производство слитков стали и промышленных сплавов. - Донецк: Изд-во «Ноулидж», 2013. - 436 с.
6. Медные сплавы. Марки, свойства, применение: Справочник / Ю. Н. Райков, Г. В. Ашихмин, В. П. Полухин, А. С. Гуляев. Под общей ред. Ю. Н. Райкова. - М.: ОАО «Институт Цветметобработка», 2011. - 456 с.
7. Осинцев О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Справочник / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров. - М.: Машиностроение, 2004. - 336 с.
8. Kurs W., Fisher D. J. Fundamentals of Solidification / W.Kurs, D.J. Fisher - Switherland-Germany-UK-USA: CRS Press, 1998. - P. 305.
9. Процессы затвердевания / М. Флеминг М. - М.: Мир. 1977. - 423 с.
10. Чалмерс Б. Теория затвердевания / Б.Чалмерс. - М.: Металлургия, 1968. - 288 с.
11. Смирнов А. Н. О влиянии виброимпульсных воздействий на процессы, сопровождающие затвердевание слитков и отливки // Процессы литья. - № 3. - 1999. - С. 17-29.
12. Скребцов А. М. О некоторых возможностях измельчения зерна металла отливки при внешнем воздействии на затвердевающий расплав / А. М. Скребцов, Л. Д. Дан. А. О. Секачев и др. // Металл и литье Украины. -1996. - № 1-2. - С. 30-34.

Анотація

Смірнов О. М., Спиридонов Д. В., Верзилов О. П., Головатый В. А.
Вплив умов формування круглого мідного зливка
в кристалізаторі МНБЛЗ на тріщиноутворення при твердінні

Формування тонких поздовжніх тріщин, що формуються в поверхневих та підповерхневих шарах, обумовлено концентрацією по межах кристалів легкоплавких елементів або сполук, що входять до складу рафінованої міді. Встановлено, що зливки, відлиті в умовах зворотно-поступального руху кристалізатора, має більш щільну і дрібнозернисту структуру, а поверхня його більш чиста і рівна без характерних горбків (ліквати фосфору) та ужимин.

Ключові слова

злиток, кристалізатор, рафінована мідь, поздовжні тріщини, кристалічна структура, напівбезперервне розливання

Summary

Smirnov A. , Spiridonov D., Verzilov A., Golovaty V.
Influence conditions of round copper formation in the mold SCCM
on cracking process during solidification

Formation of thin longitudinal cracks which formed in the surface and subsurface layers due to the concentration at the crystal boundaries fusible elements or compounds that the refined copper content. It was found that the ingot cast in conditions oscilating motion of the mold has a fine-grained and more dense structure, and its surface is smooth and cleaner characteristic without hillocks and veining.

Keywords

ingot, mold, refined copper, longitudinal cracks, crystal structure, semi-continuous casting

Поступила 26.01.2015

Телефон редакції журналів
«Металл и литьё Украины» и «Процессы литья»
(044) 424-04-10
Інформація о журналах на сайте:
www.ptima.kiev.ua