

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЗЛИВОЧНОГО КОЛЕСА РОТОРНОЙ МНЛЗ НА КАЧЕСТВО МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

© 2017 г. **Е.Н. Смирнов, А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, О.Е. Смирнов**

Старооскольский технологический институт (СТИ) им. А.А. Угарова,
филиал Национального исследовательского технологического университета (НИТУ) «МИСиС»,
г. Старый Оскол

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина

Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина

Czestochowa University of Technology, г. Ченстохова, Польша

Статья поступила в редакцию 04.04.17 г., доработана 26.05.17 г., подписана в печать 02.06.17 г.

Представлены результаты изучения влияния состояния рабочей поверхности разливочного колеса роторной машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на качество медной металлопродукции в условиях современной высокотехнологичной линии непрерывного литья и прокатки производства фирмы «Southwire» в ПАО «Артемовский завод по обработке цветных металлов». В ходе промышленных исследований выявлены основные дефекты рабочей поверхности разливочного колеса, образующиеся в процессе его эксплуатации: поперечные трещины, располагающиеся на рабочей поверхности в плоскостях, перпендикулярных направлению разлива, — как на основании трапеции, так и боковых гранях (длина трещин составляет 10–45 мм с расстоянием между ними 7–40 мм); выбоины, продольные углубления и царапины, наблюдаемые вдоль направления движения заготовки преимущественно в тупых углах трапеции и областях, прилегающих к ним; деформация профиля колеса в углах рабочего канала, обусловленная, прежде всего, износом вследствие трения. Установлено, что основными причинами формирования поверхностных и внутренних трещин в колесе являются сложные температурные режимы работы, связанные с технологией разлива меди на МНЛЗ роторного типа. Чередующиеся циклы нагрева и охлаждения отдельных участков разливочного колеса приводят к возникновению двумерных растягивающих напряжений в его внутренних слоях, вследствие чего образуются трещины. Не менее важным фактором появления трещин следует считать последующее чрезмерное вторичное охлаждение колеса водой, поскольку за ним следует повторный нагрев поверхности заготовки. Вместе с тем снижение градиента температур поверхности колеса между зонами охлаждения будет способствовать уменьшению степени деформации его поверхности и увеличению срока эксплуатации, а также повышению качества непрерывнолитой заготовки и готового проката.

Ключевые слова: разливочное колесо, кристаллическая структура, скорость разлива, дефекты поверхности, поперечные трещины, внутренние напряжения, конечно-элементное моделирование, тепловое состояние, интенсивность деформаций, напряжения.

Смирнов Е.Н. — докт. техн. наук., профессор кафедры металлургии и металловедения СТИ (филиал) НИТУ «МИСиС» (309516, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42). E-mail: en_smirnov@i.ua.

Смирнов А.Н. — докт. техн. наук., проф., вед. науч. сотр. отдела магнитодинамических воздействий Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины (03142, Украина, г. Киев, б-р акад. Вернадского, 34/1). E-mail: stalevoz@i.ua.

Куберский С.В. — канд. техн. наук, профессор кафедры металлургии черных металлов Донбасского государственного технического университета (94204, Украина, г. Алчевск, пр-т Ленина, 16). E-mail: Skuberskiy@yandex.ru.

Смирнов О.Е. — магистр, магистрант факультета механики и компьютерных наук Ченстоховского политехнического университета (42-201, Польша, г. Ченстохова, ул. Домбровского, 69). E-mail: olegsmirnoff1@yandex.ua.

Для цитирования: Смирнов Е.Н., Смирнов А.Н., Куберский С.В., Смирнов О.Е. Влияние состояния рабочей поверхности разливочного колеса роторной МНЛЗ на качество металлопродукции // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 5. С. 50–59. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-5-50-59.

Smyrnov Y.N., Smirnov A.N., Kuberskiy S.V., Smyrnov O.Y.

Influence of rotary CCM casting wheel working surface condition on steel product quality

The paper presents the results obtained when studying how the condition of the casting wheel working surface in the rotary continuous casting machine (CCM) influences the quality of copper metal products on the Southwire modern high-tech continuous casting and

rolling line at PJSC «Artemovsk Non-Ferrous Metals Processing Works». Industrial research identified the main defects occurred on the casting wheel working surface during its operation: transverse cracks located on the working surface in planes perpendicular to the casting direction – both at the trapezoid base and on its side faces (10–45 mm long cracks located 7–40 mm apart); dents, longitudinal dimples and scratches along the direction of billet movement mainly in the obtuse angles of the trapezoid and in areas adjacent thereto; deformed wheel profile in the corners of the working channel, primarily due to friction wear. It was found that the main causes of surface and internal cracks in the wheel are challenging temperature modes of operation associated with the technology of copper casting on the rotary CCM. Alternating cycles of heating and cooling of individual sections of the casting wheel cause two-dimensional tensile stresses in its internal layers resulting in cracks. An equally important factor in crack formation is further excessive secondary cooling of the wheel with water as it is followed by reheating of the billet surface. However, a lowered temperature gradient of the wheel surface between the cooling areas will reduce the degree of surface deformation, increase the service life and improve the quality of continuously cast billets and finished steel.

Keywords: casting wheel, crystal structure, casting rate, surface defects, transverse cracks, internal stresses, finite element modeling, thermal state, deformation intensity, stresses.

Smyrnov Y.N. – Dr. Sci. (Tech.), prof. of the Department «Metallurgy and metal science», Stary Oskol Technological Institute (branch) of National University of Science and Technology «MISIS» (309516, Russia, Stary Oskol, microdistrict Makarenko, 42). E-mail: en_smyrnov@i.ua.

Smirnov A.N. – Dr. Sci. (Tech.), prof., leading researcher of the magneto-hydrodynamics Department of Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine (03412, Ukraine, Kiev, Acad. Vernadsky boul., 34/1). E-mail: mgd@ptima.kiev.ua.

Kuberskiy S.V. – Cand. Sci. (Tech.), prof. of the Department «Ferrous Metallurgy», Donbass State Technical University (94204, Ukraine, Alchevsk, Lenin av., 16). E-mail: Skuberskiy@yandex.ru.

Smyrnov O.Y. – master of technical sciences, undergraduate Faculty of mechanical engineering and computer science, Czestochowa University of Technology (42-201, Poland, Czestochowa, Dabrowskiego, 69). E-mail: olegsmirnoff1@yandex.ua.

Citation: Smyrnov Y.N., Smirnov A.N., Kuberskiy S.V., Smyrnov O.Y. Vliyanie sostoyaniya rabochei poverkhnosti razlivochnogo koleasa rotornoj MNLZ na kachestvo metalloproduksii. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 5. P. 50–59.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-5-50-59.

Введение

Медную катанку в последние годы преимущественно получают на высокопроизводительном оборудовании непрерывного литья и прокатки (НЛП), которое изготавливают ведущие мировые компании «Southwire» (США) [1], «SMS Meer» (Германия) [2], «Properzi» (Италия) [3]. Метод непрерывной вытяжки из расплава успешно используют ведущие мировые производители медной катанки [4]. При получении медной катанки на линиях НЛП с шахтной печью [5] наряду с катодной медью допускается применение в шихте качественного медного лома в количестве до 25–30 %. Вместе с тем все большее распространение получают технологии, позволяющие использовать 100 % медного лома в составе металлозавалки [6]. Структура мирового производства медной катанки по типу применяемой технологии в 2010 г. представлена на рис. 1 [7].

Для рециклинга медных отходов с последующим получением катанки, обладающей высокой электропроводностью, на линиях НЛП наиболее часто используют как технологию немецкой фирмы «Maerz» [8] (метод огневого рафинирования — FRHC), так и технологии компаний «La Farga Lacambra» (Испания) и «Properzi» (Италия),

основанные на применении отражательной поворотной печи, в которой осуществляют рафинирование медного расплава свинецсодержащими флюсами [9].

Для разлива меди в ПАО «Артемовский завод по обработке цветных металлов» (АЗОЦМ) в составе высокотехнологичной линии НЛП производства фирмы «Southwire» [10, 11] используют принцип разлива на вращающееся колесо «Continuus-Properzi» (рис. 2, а).

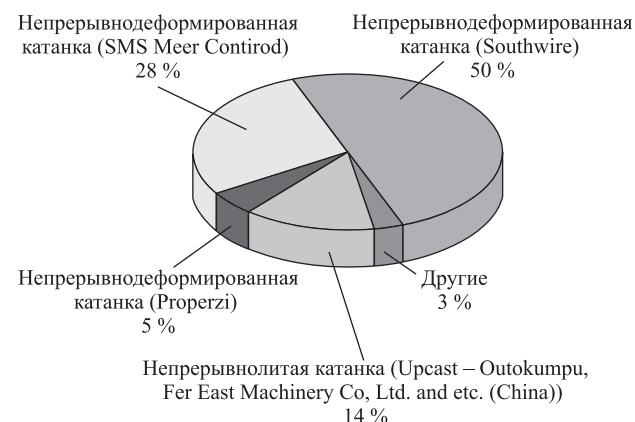


Рис. 1. Доля различных технологий и типов оборудования в мировом производстве медной катанки [7]

По существующей технологии полученная в печи огневого рафинирования медь по системе подогреваемых желобов направляется в миксер, расположенный в непосредственной близости от роторной машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Из миксера по специальному желобу расплав непрерывно подается в промежуточный ковш, из которого с заданным расходом поступает компактной струей в зазор между внутренней полостью колеса и стальной лентой, прижимающейся с помощью системы роликов к поверхности ребер колеса. Литейная форма в кристаллизаторе образуется трапециевидальной выточкой во вращающемся бандаже и прилегающей к нему стальной лентой, оставляя верх колеса свободным для выхода затвердевшей заготовки к прокатным клетям. Процесс формирования заготовки происходит в рабочей полости вращающегося колеса, которую можно рассматривать как кристаллизатор открытого типа. Как правило, заготовка полностью затвердевает на участке колеса длиной 1,5–2,0 м.

При этом наибольшее влияние на формирова-

ние кристаллической структуры заготовки оказывает длительность контакта заготовки с рабочей поверхностью колеса. Так, при минимально допустимых по требованиям технологии скоростях разливки наблюдается получение заготовки с транскристаллитной структурой (см. рис. 2, б). Производство катанки, соответствующей техническим условиям, из такой заготовки, как правило, оказывается невозможным.

Формирование мелкозернистой кристаллической структуры обеспечивают повышением скорости теплоотвода при увеличении скорости вращения колеса, что обуславливает рост протяженности зоны жидкой фазы. Однако при этом повышается количество внутренних дефектов типа «усадочная пористость», располагающихся по всей плоскости поперечного сечения заготовки (см. рис. 2, в–е).

Анализ внутренней структуры непрерывнолитого металла позволил установить, что наиболее эффективен (с точки зрения производительности и качества заготовки) диапазон скорости враще-

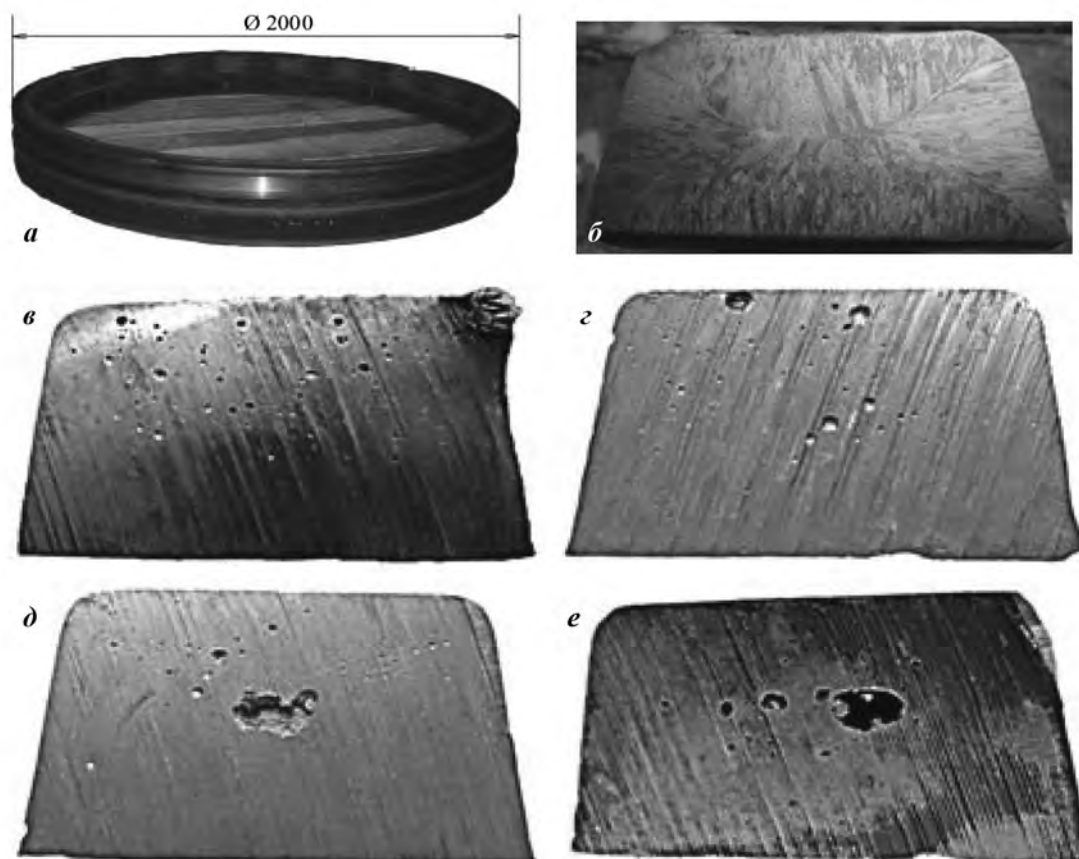


Рис. 2. Разливочное колесо (а), кристаллическая макроструктура (б) и вид внутренних дефектов (в–е) медной непрерывнолитой заготовки роторной МНЛЗ, разлитой при различных скоростях вращения колеса v , об/ч – 1450 (в); 1550 (г); 1750 (д); 1850 (е)

ния колеса 1450—1600 об/ч. В этом случае затвердевание заготовки завершается в нижней области колеса в зоне интенсивного охлаждения ее водой, что позитивно влияет на размеры, характер расположения и количество внутренних дефектов (рис. 3).

Основным элементом кристаллизатора роторной МНЛЗ является разливочное колесо, в значительной степени определяющее технологические параметры работы литейно-прокатного модуля [11—13]. Установлено, что в ходе длительной эксплуатации внутренняя (рабочая) поверхность ко-

леса может разрушаться под действием механических и температурных напряжений, что негативно сказывается на качестве получаемой непрерывнолитой заготовки и медного проката. При этом на поверхности заготовки наблюдается появление различного рода наплывов, трещин, вмятин, деформаций профиля и т.п. (см. рис. 3, *а*), которые закатываются в проволоку (рис. 3, *б*) [14] и ухудшают ее электротехнические характеристики.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что анализ особенностей эксплуатации колеса-кристаллизатора представляется вполне актуальным в свете последующего использования установленных теоретических закономерностей и зависимостей, а также практических результатов при разработке технологий совмещенной разливки и прокатки для получения металлопродукции [13].

Целью работы являлся анализ причин возникновения дефектов на рабочей поверхности разливочного колеса роторной МНЛЗ и их влияния на качество металлопродукции.

Методика исследований

Для проведения исследований, которые выполнялись в промышленных условиях линии непрерывного литья и прокатки ПАО АЗОЦМ, были отобраны 3 разливочных колеса, выведенных из эксплуатации (длительностью 1200—1350 раб. ч) по причине разрушений их рабочей поверхности. Для визуального выявления характера возникших разрушений рабочую поверхность колеса очищали от сажистых отложений и следов графитовой смазки. Выбирался условный «нуль», относительно которого строилась развертка его рабочей длины, на которой отмечались дефекты (расстояние от условного «нуля», вид дефекта, его описание и т.д.), а также определялось сечение рабочей поверхности колеса в плоскости, условно проходящей через дефект, методом получения пластилинового слепка.

В дальнейшем из рабочего колеса вырезались темплеты для более детального изучения выявленных дефектов. Характер залегания трещин внутри тела колеса выявляли на изломах последнего по плоскости залегания трещины. Изломы фотографировались с масштабной линейкой, затем цифровые изображения обмерялись в компьютере.

Трансформация поверхностных дефектов непрерывнолитой заготовки, а именно «наплывов» и «вырываний» объемов металла, оценивалась посредством временной и массовой идентификации.

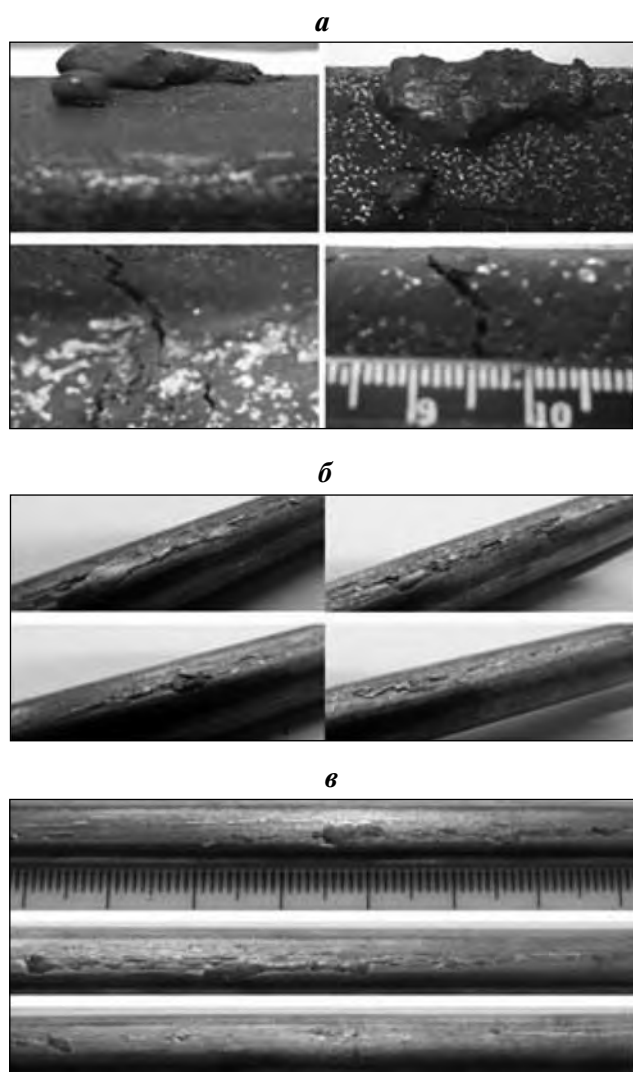


Рис. 3. Внешний вид дефектов на поверхности непрерывнолитой заготовки и катанки

а — наплывы меди, обусловленные ее вытеканием при растрескивании оболочки заготовки или выбоинами на рабочей поверхности, и поперечные трещины;
б — дефекты поверхности катанки, связанные с раскаткой наплывов;
в — дефекты поверхности, возникающие из-за нарушения геометрии заготовки

При обнаружении в ходе визуального контроля качества поверхности заготовки или проката вышеуказанного дефекта (точка контроля в районе ножиц зачистки кромок) фиксировались номер бухты и масса на данный момент времени. В дальнейшем бухта выводилась из технологического потока и «распушивалась», производился поиск дефектного участка на катанке путем взвешивания. Из дефектных участков катанки вырезались темплеты для последующего изучения.

Для выявления причин образования трещин в колесе был выполнен анализ его теплового и напряженно-деформированного состояния при разливке с помощью разработанной математической модели [15], решаемой методом конечных элементов. В качестве объекта исследований использовалось полноразмерное колесо [16], разделенное по плоскости симметрии. Твердотельная модель колеса разбивалась на сетку конечных элементов с размером ячейки 3 мм.

При моделировании теплового состояния в качестве граничных условий принимали температуру колеса [17]: в зоне контакта с металлом заготовки (нижняя часть) — $170 \div 160$ °С и в зоне охлаждения (верхняя часть) — $80 \div 100$ °С. В местах контакта с

охлаждающей водой задавались условия конвективного теплообмена ($\alpha = 500$ Вт/(м²·К), $t = 30$ °С), а по остальным плоскостям — свободного теплообмена ($\alpha = 50$ Вт/(м²·К), $t = 30$ °С) [18, 19]. На плоскости симметрии плотность теплового потока предполагалась равной нулю. После стационарного теплового анализа расчетные данные по модели передавались в модель напряженно-деформированного состояния.

В качестве граничных условий в модели напряженно-деформированного состояния принимались условия симметрии, жесткая фиксация внутренней поверхности колеса и тепловое поле из предыдущей задачи [20, 21].

Результаты и их обсуждение

Установлено, что основными дефектами рабочей поверхности разливочного колеса, образующимися в процессе его эксплуатации, являются (рис. 4):

— поперечные трещины, располагающиеся на рабочей поверхности в плоскостях, перпендикулярных направлению разливки, — как на основании трапеции, так и на боковых гранях (длина

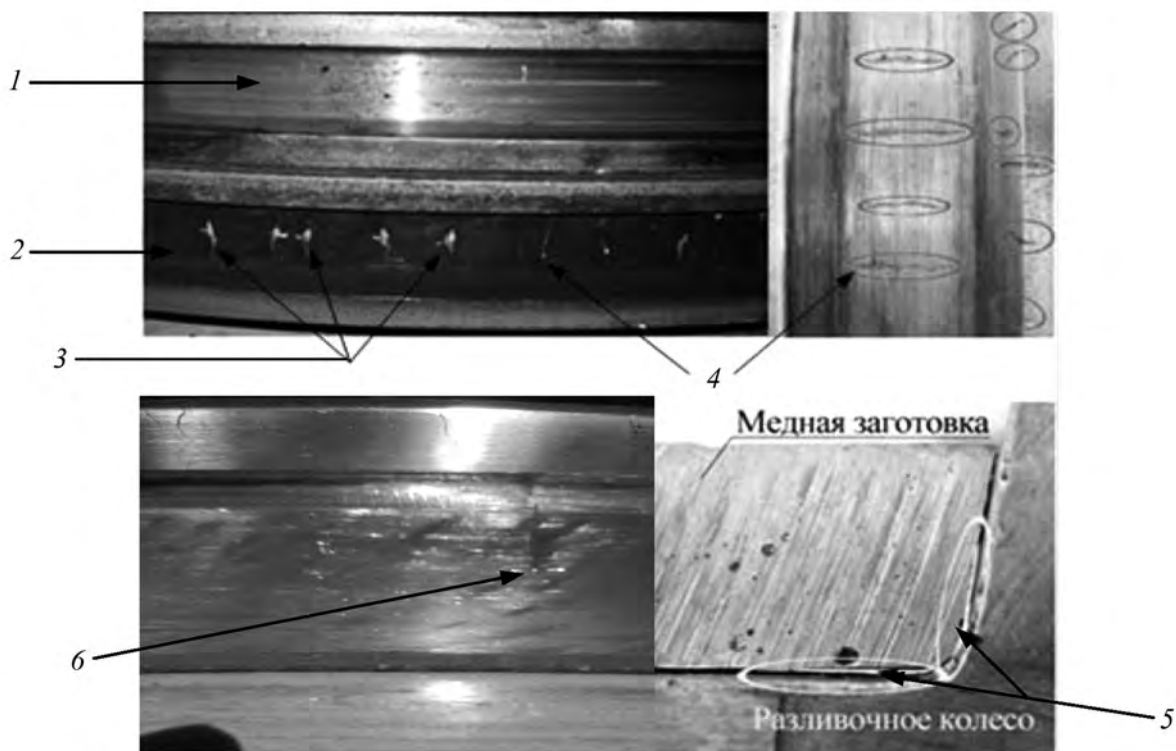


Рис. 4. Дефекты рабочей поверхности разливочных колес

1, 2 — отработанные колеса; 3 — фрагменты медной непрерывнолитой заготовки; 4 — трещины на рабочей поверхности колеса; 5 — деформация профиля колеса в углах рабочего канала; 6 — выбоины на рабочей поверхности колеса

трещин составляет 10—45 мм, а расстояние между ними 7—40 мм);

— продольные углубления и царапины, расположенные вдоль направления движения заготовки преимущественно в тупых углах трапеции и в областях, прилегающих к ним;

— деформация профиля колеса в углах рабочего канала, обусловленная, прежде всего, износом вследствие трения;

— выбоины на рабочей поверхности колеса.

Образование большого количества поперечных трещин на рабочей поверхности колеса следует рассматривать как свидетельство его сложного напряженного состояния в процессе эксплуатации. В зависимости от величины и динамики развития эти напряжения могут отдельно либо в совокупности превысить прочность поверхностных слоев колеса, что ведет к появлению трещин [22].

Природа продольных углублений и царапин, по нашему мнению, обусловлена систематическим проскальзыванием медной заготовки относительно рабочей поверхности колеса в процессе разлива. При этом интенсивный износ рабочей поверхности колеса в районе тупых углов объясняется, прежде всего, абразивным ее разрушением вследствие контакта с каркасом формирующейся заготовки, имеющим более высокую прочность в этой области на ранних этапах затвердевания. Такая картина обусловлена высокой скоростью кристаллизации заготовки в тупых углах ввиду наличия здесь двумерного теплового потока. Возникновение различного рода продольных царапин следует связывать с возможностью попадания твердых частиц шлака в зазор между колесом и формирующейся непрерывнолитой заготовкой. Изменение вследствие износа геометрических размеров и качества контактирующей с металлом поверхности разливочного колеса вызывает образование локальных участков, на которых ухудшаются условия теплоотвода ввиду увеличения толщины газового зазора между поверхностями заготовки и разливочного колеса. Все вышеизложенное затрудняет получение трапециевидной заготовки заданных размеров и медной катанки требуемого качества.

Для изучения природы образования поперечных трещин из дефектных фрагментов разливочного колеса были вырезаны секции, соответствующие малому основанию трапеции, с последующим разрушением по плоскости, совпадающей с плоскостью внедрения трещины (рис. 5).

Анализ дефектной поверхности позволил установить, что внутренняя поверхность трещины покрыта тонким слоем графитовой смазки, что свидетельствует о ее появлении до вывода кристаллизатора из эксплуатации. Глубина проникновения трещин увеличивается прямо пропорционально от периферии малого основания трапеции к ее центру и может достигать 5—10 мм.

Характер распространения и конфигурация исследуемых трещин позволяют сделать вывод о том, что они образуются под влиянием значительных растягивающих напряжений, формирующихся в рабочем слое колеса в момент нахождения рассматриваемого его участка в зоне высоких температур (область подачи жидкого расплава).

Не менее важным фактором появления трещин следует считать последующее интенсивное вторичное охлаждение колеса водой, поскольку за ним следует повторный нагрев поверхности заготовки. В таком режиме работы поверхностные слои колеса периодически растягиваются, что приводит к распространению растягивающих напряжений в нижележащих слоях. Эти напряжения ориентированы параллельно поверхности и перпендикулярно оси заготовки.

Трещины, образующиеся на поверхности колеса, оказывают большое влияние на качество поверхности заготовки. По мере развития трещин жидкий расплав может проникать в них на глубину 2,0—4,0 мм, вызывать приваривание формирующейся заготовки к поверхности колеса и последующий отрыв ее фрагментов массой 0,5—4,0 г при отделении заготовки от охлаждающей поверхности, что приводит к появлению грубых поверхностных дефектов заготовки, значительно снижающих качество получаемой катанки.

Оценка полей напряжений и деформаций, формирующихся в теле колеса в процессе разлива, выполненная с использованием математической модели [15], показала, что максимальные деформации возникают в зоне контакта рабочей поверхности колеса с горячим металлом, причем их максимум приходится на «дно» кристаллизатора, деформация же боковых стенок заметно меньше. Это объясняется стремительным ростом температуры колеса после контакта с жидким металлом и повышенным тепловым расширением. Минимальная деформация колеса наблюдается в зоне охлаждения, так как условия теплообмена здесь более «мягкие». Распределение напряжений носит

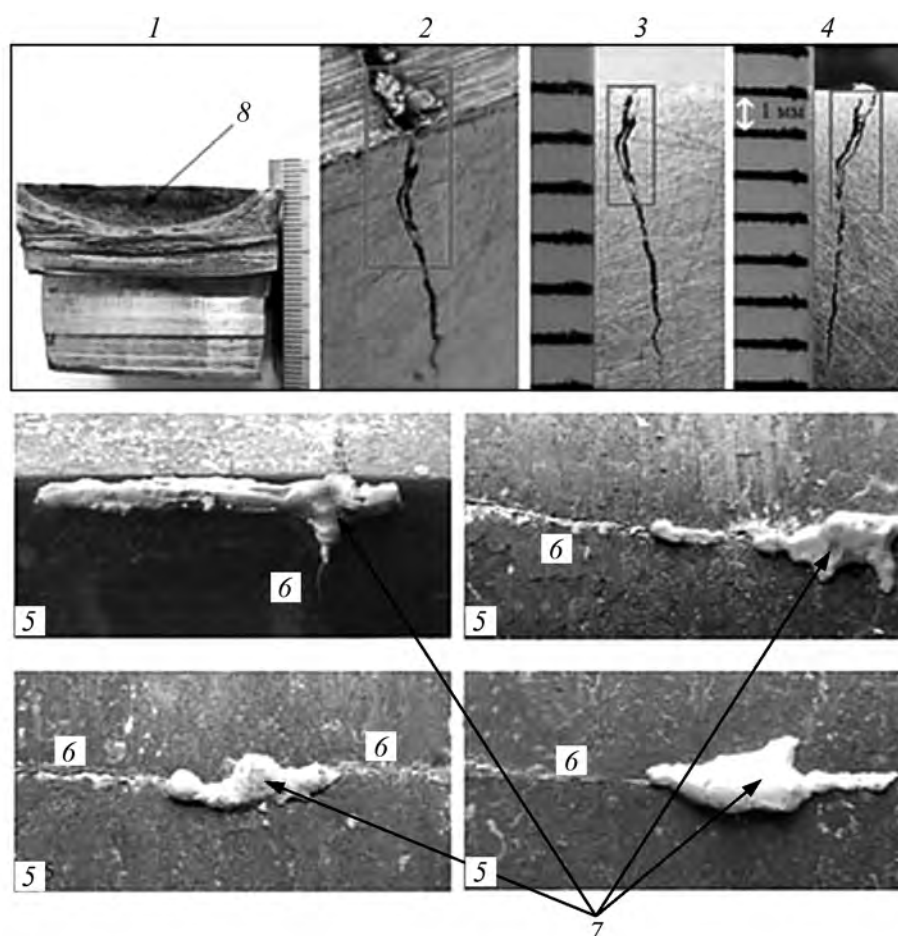


Рис. 5. Характер расположения и внедрения поперечных трещин, образующихся на рабочей поверхности разливочного колеса, с фрагментами непрерывнолитой медной заготовки

1 – излом колеса по поперечной трещине; 2–4 – глубина проникновения трещин; 5 – рабочая поверхность разливочного колеса; 6 – трещины; 7 – оторвавшиеся фрагменты медной непрерывнолитой заготовки; 8 – характер проникновения графитовой смазки по поверхности трещины

аналогичный характер. Следовательно, наибольший риск возникновения трещин имеется именно по «дну» кристаллизатора.

Следует отметить наличие значительных растягивающих напряжений в той четверти колеса, которая соответствует непосредственно началу зоны разливки (контакта с металлом). В то же время в четверти колеса, на которую приходится конец зоны разливки (отделение заготовки от колеса), наблюдаются высокие сжимающие напряжения. В зонах охлаждения распределение этих напряжений носит зеркальный характер, однако величина их в 2–3 раза меньше. Таким образом, за один цикл оборота колеса в нем происходит циклическая смена знаков напряжений в радиальном направлении. При этом указанные напряжения имеются как по дну кристаллизатора, так и по боковым стенкам. Однако ввиду большой толщины

металла боковых стенок в данном направлении их деформация ниже и вероятность появления трещин меньше.

Что касается распределения внутренних напряжений в других направлениях, то оно выглядит несколько иначе. Так, распределение напряжений по оси, направленной вверх по вертикали, свидетельствует о наличии зоны растягивающих напряжений в нижней части зоны разливки и в верхней части зоны охлаждения. В то же время в местах перехода из одной зоны в другую наблюдаются максимальные сжимающие напряжения. Такой характер распределения напряжений обусловлен тепловым профилем колеса, которое вытягивается по вертикали, что обусловлено его нагревом в зоне разливки. Распределение же напряжений по оси, направленной вправо по горизонтали, носит обратный характер. В нижней части напряжения

Трансформация дефектов рабочей поверхности разливочного колеса в дефекты непрерывнолитой трапецеидальной медной заготовки, подката при прокатке и готовой катанки

Дефект рабочей поверхности разливочного колеса	Дефект непрерывнолитой заготовки	Технологичность прокатки непрерывнолитой заготовки с дефектом	Дефект поверхности подката или катанки	Внешний вид
Деформация профиля колеса в углах рабочего канала, обусловленная в основном износом вследствие трения	Искажение трапецеидальной формы непрерывнолитой заготовки	Возможна потеря устойчивости при деформировании в первом ящичном калибре	Скручивание подката, одно- или двусторонний лампас на подкате, плавно переходящий в закат	Рис. 4 (поз. 5) и рис. 6, а
Трещины на рабочей поверхности колеса	Выбоины, обусловленные защемлением в трещинах фрагментов медной непрерывнолитой заготовки	Локальное неравномерное обжатие, недозаполнение профиля калибра	Периодическая плена, трещины, визуально не наблюдаемые	Рис. 4 (поз. 3, 4), рис. 3, б, в и рис. 6, б
Продольные углубления и царапины, расположенные вдоль направления движения заготовки преимущественно в тупых углах трапеции и в областях, прилегающих к ним	Продольные углубления и царапины	Не влияет	Корочки – липкая прокатная плена продольной ориентации, расположенная с большим шагом	Рис. 4 (поз. 1), рис. 3, б, в
Выбоины на рабочей поверхности колеса	Наплывы меди (схожи с вытеканием меди при растрескивании оболочки заготовки)	Локальное неравномерное обжатие, перезаполнение профиля калибра с образованием «лампаса» или «рыбы»	Периодическая плена или закат	Рис. 4 (поз. б), рис. 7

сжимающие, а в местах перехода из одной зоны в другую — растягивающие.

Необходимо обратить внимание на факт наличия внутренних напряжений именно в месте перехода из зоны охлаждения в зону разливки меди, так как на этом участке концентрируются напряжения по нескольким направлениям, что создает риск возникновения трещин. Поэтому на практике рекомендуется уменьшать разницу температур между вышеупомянутыми зонами, т.е. не допускать существенного снижения температуры колеса в зоне охлаждения.

При исследовании трансформации дефектов медной трапецеидальной непрерывнолитой заготовки в дефекты готовой катанки рассматривались только генетические признаки [23]: периодичность и длина их распространения по поверхности, а также форма полости дефекта в поперечном сечении проката. Признаки, обусловленные физико-химическими процессами производства меди, в данной работе не затрагивались.

Такой подход позволил предложить наиболее

вероятную схему трансформации ряда подпадающих контролю в горячем состоянии дефектов непрерывнолитой заготовки, обусловленных состоянием рабочей поверхности разливочного колеса, в дефекты подката и катанки, а также выявить их влияние на технологию прокатки (см. таблицу, рис. 6 и 7).

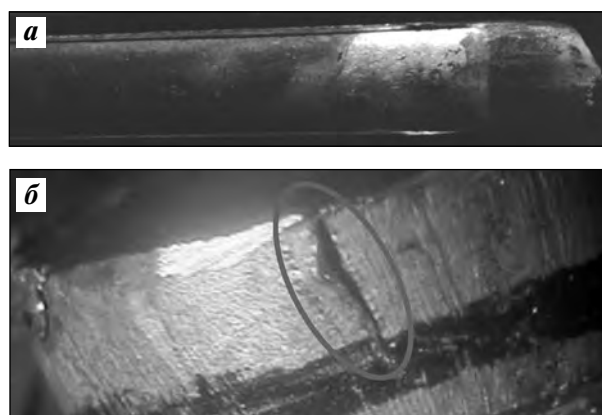


Рис. 6. Двусторонний лампас после первой клетки (а) и трещина после испытаний на «расклев» (б)

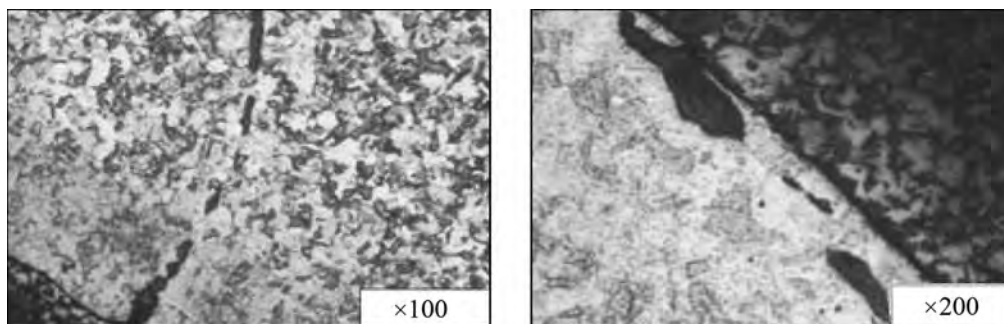


Рис. 7. Фото «заката» толщиной 0,45–0,5 мм

Заключение

На основе проведенного анализа можно утверждать, что основными причинами образования поверхностных и внутренних трещин в колесе являются сложные температурные режимы работы, связанные с технологией разлива меди на МНЛЗ роторного типа. Чередующиеся циклы нагрева и охлаждения отдельных участков разливочного колеса приводят к возникновению двумерных растягивающих напряжений в его внутренних слоях, вследствие чего появляются трещины. В то же время не менее важным фактором образования трещин следует считать последующее чрезмерное вторичное охлаждение колеса водой, поскольку за ним следует повторный нагрев поверхности заготовки. Вследствие этого снижение градиента температур по поверхности колеса между зонами охлаждения будет способствовать уменьшению степени его деформации и увеличению срока эксплуатации, а также повышению качества непрерывнолитой заготовки и готового проката.

Для повышения эксплуатационной стойкости разливочного колеса целесообразно осуществлять постоянный контроль профиля его рабочей полости, не допуская отклонений, превышающих предельно допустимые значения. Отклонение размеров и конфигурации профиля от номинальных значений будет вызывать неравномерный контакт затвердевающей корочки со стенкой колеса, что может стать причиной возникновения дефектов геометрической формы заготовки и ее поверхности, негативно влияющих на качество получаемой катанки.

Литература

- Southwire copper rod systems. URL: <http://www.southwire.com/scr/scr-copper-rod-systems.htm/> (дата обращения: 20.05.2017).
- SMS-MEER. URL: <http://www.sms-group.com/> (дата обращения: 20.05.2017).
- Continuus-Properzi. URL: <http://www.properzi.com/> (дата обращения: 20.05.2017).
- Hazelett copper bar casters produce one-third of the world's copper rod, which is coiled for drawing into wire. URL: <http://www.hazelett.com/copper-bar/> (дата обращения: 20.05.2017).
- American smelting and refining company — ASARCO. URL: <http://www.asarco.com/about-us/> (дата обращения: 21.05.2017).
- Arderiu O.G., Properzi G. Continuous copper rod production from 100 % scrap // Proc. 65th Annual Convention of the Wire Association International (Atlanta, Georgia, USA, March 1995). Wire Journal International, 1996. P. 75–82.
- CRU Semins Market Service. Sept. 2010.
- Lux T., Köhlhote J., Maerz A., Wenzl C. Maerz direct-to-wire technology — optimized FRHC copper production // Wai's first-ever Global Continuous Casting Forum (Atlanta, USA, 2–5 May 2011). P. 321–329.
- Garcia M. Scrap melting technology // Wai's first-ever Global Continuous Casting Forum (Atlanta, USA, 2–5 May 2011). P. 506–512.
- Смирнов А.Н., Шутков И.В., Куберский С.В., Волков С.М. Применение литейно-прокатного модуля в комплексной технологии получения качественной продукции из медного лома // Электromеталлургия. 2012. No. 1. С. 8–12.
- Shutov I.V., Smirnov A.N., Kuberskiy S.V. Casting and rolling module for obtaining rolled wire from refined copper // Metall. Mining Industry. 2011. Vol. 3. No. 6. P. 269–273.
- Кац А.М., Шадек Е.Г. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов. М.: Metallургия, 1983.
- Aizawa T., Niyama E., Kodama H., Horiguchi M., Kimura T., Endo M. Investigation of steel billets produced by a rotary type continuous caster // Trans. ISIJ. 1984. Vol. 24. P. 992–998.
- Smyrnov Y.N., Skliar V.A., Belevitin V.A., Shmyglya R.A., Smyrnov O.Y. Defect healing in the axial zone of continuous-cast billet // Steel in Transl. 2016. Vol. 46. No. 5. P. 325–328.
- Смирнов А.Н., Шутков И.В., Куберский С.В., Редько Г.А. Оценка влияния параметров непрерывной разлив-

- ки на характер затвердевания медной заготовки, отливаемой на колесо // Тр. Донбасского гос. технич. ун-та. Алчевск: ДонГТУ, 2012. Вып. 36. С. 186—196.
16. *Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г.* Оборудование промышленных предприятий. Т. 1. Развитие цветной металлургии. Тяжелые цветные металлы. М.: Теплотехник, 2010.
 17. *Davenport W.G., King M., Schlesinger M., Biswas A.K.* Extractive metallurgy of cooper. Oxford: Elsevier Science Ltd., 2002.
 18. *Бровман М.Я.* Кристаллизаторы установок непрерывного литья металлов. М.: Теплотехник, 2011.
 19. *Kumar A.A., Mehrotra S.P.* Mathematical model of single roll strip caster based on macroscopic enthalpy balances // *Steel Res.* 1991. Vol. 62. P. 164—170.
 20. *Thomas B.G.* The importance of numerical simulations for further improvements of the CC process // *Innovation Session (Linz, Austria, June 2000)*. 2000. No. 7. P. 1—11.
 21. *Takeshita K., Shingu P.H.* Thermal contact during the cooling by the single roller chill block casting // *Trans. Jap. Inst. Met.* 1986. Vol. 27. No. 6. P. 454—462.
 22. *Li G., Thomas B.G.* Transient thermal model of the continuous single-wheel thin-strip casting process // *Metall. Mater. Trans. B.* 1996. Vol. 27B. No. 3. P. 509—525.
 23. *Sychkov A.B., Sychkov M.A., Perchatnik A.V.* The transformation of defects in continuous-cast semifinished products into surface defects on rolled products // *Metallurgist.* 2006. Vol. 50. Iss. 1. P. 83—90.
 10. *Smirnov A.N., Shutov I.V., Kuberskiy S.V., Volkov S.M.* Primenenie liteino-prokatnogo modulya v kompleksnoi tekhnologii polucheniya kachestvennoi produktsii iz mednogo loma [The use of casting and rolling module in a complex technology for high-quality products from copper scrap]. *Elektrometallurgiya.* 2012. No. 1. P. 8—12.
 11. *Shutov I.V., Smirnov A.N., Kuberskiy S.V.* Casting and rolling module for obtaining rolled wire from refined copper. *Metall. Mining Industry.* 2011. Vol. 3. No. 6. P. 269—273.
 12. *Kats A.M., Shadek E.G.* Teplofizicheskie osnovy nepreryvnogo lit'ya slitkov tsvetnykh metallov [The thermophysical foundations of continuous casting of ingots of nonferrous metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983.
 13. *Aizawa T., Niyama E., Kodama H., Horiguchi M., Kimura T., Endo M.* Investigation of steel billets produced by a rotary type continuous caster. *Trans. ISIJ.* 1984. Vol. 24. P. 992—998.
 14. *Smyrnov Y.N., Skliar V.A., Belevitin V.A., Shmyglya R.A., Smyrnov O.Y.* Defect healing in the axial zone of continuous-cast billet. *Steel in Transl.* 2016. Vol. 46. No. 5. P. 325—328.
 15. *Smirnov A.N., Shutov I.V., Kuberskiy S.V., Red'ko G.A.* Otsenka vliyaniya parametrov nepreryvnoi razlivki na kharakter zatverdevaniya mednoi zagotovki, otlivamoim na koleso [Evaluation of influence of parameters of continuous casting on the character of solidification of the copper billet, casted on the wheel]. In: *Trudy Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [In: *Works of the Donbass State Technical University*]. Alchevsk: DonGTU, 2012. Iss. 36. P. 186—196.
 16. *Lisienko V.G., Shchelokov Ya.M., Ladygichev M.G.* Oborudovanie promyshlennykh predpriyatii. T. 1. Razvitie tsvetnoi metallurgii. Tyazhelye tsvetnye metally [Equipment of industrial enterprises. Vol. 1. The development of non-ferrous metallurgy. Heavy non-ferrous metals]. Moscow: Teplotekhnika, 2010.
 17. *Davenport W.G., King M., Schlesinger M., Biswas A.K.* Extractive metallurgy of cooper. Oxford: Elsevier Science Ltd., 2002.
 18. *Brovman M.Ya.* Kristallizatory ustanovok nepreryvnogo lit'ya metallov [The mold equipment of continuous casting of metals]. Moscow: Teplotekhnika, 2011.
 19. *Kumar A.A., Mehrotra S.P.* Mathematical model of single roll strip caster based on macroscopic enthalpy balances. *Steel Res.* 1991. Vol. 62. P. 164—170.
 20. *Thomas B.G.* The importance of numerical simulations for further improvements of the CC process. In: *Innovation Session (Linz, Austria, June 2000)*. No. 7. P. 1—11.
 21. *Takeshita K., Shingu P.H.* Thermal contact during the cooling by the single roller chill block casting. *Trans. Jap. Inst. Met.* 1986. Vol. 27. No. 6. P. 454—462.
 22. *Li G., Thomas B.G.* Transient thermal model of the continuous single-wheel thin-strip casting process. *Metall. Mater. Trans. B.* 1996. Vol. 27B. No. 3. P. 509—525.
 23. *Sychkov A.B., Sychkov M.A., Perchatnik A.V.* The transformation of defects in continuous-cast semifinished products into surface defects on rolled products. *Metallurgist.* 2006. Vol. 50. Iss. 1. P. 83—90.

References

1. Southwire copper rod systems. URL: <http://www.southwire.com/scr/scr-copper-rod-systems.htm/> (accessed: 20.05.2017).
2. SMS-MEER. URL: <http://www.sms-group.com/> (accessed: 20.05.2017).
3. Continuus-Properzi. URL: <http://www.properzi.com/> (accessed: 20.05.2017).
4. Hazelett copper bar casters produce one-third of the world's copper rod, which is coiled for drawing into wire. URL: <http://www.hazelett.com/copper-bar/> (accessed: 20.05.2017).
5. American smelting and refining company — ASARCO. URL: <http://www.asarco.com/about-us/> (accessed: 21.05.2017).
6. *Arderiu O.G., Properzi G.* Continuous copper rod production from 100 % scrap. In: Proc. 65th Annual Convention of the Wire Association International (Atlanta, Georgia, USA, March 1995). *Wire Journal International.* 1996. P. 75—82.
7. CRU Semins Market Service. Sept. 2010.
8. *Lux T., Köhlhötter J., Maerz A., Wenzl C.* Maerz direct-to-wire technology — optimized FRHC copper production. In: *Wai's first-ever Global Continuous Casting Forum (Atlanta, USA, 2—5 May 2011)*. P. 321—329.
9. *Garcia M.* Scrap melting technology. In: *Wai's first-ever Global Continuous Casting Forum (Atlanta, USA, 2—5 May 2011)*. P. 506—512.