

Причини деформації і руйнування робочої поверхні розливального колеса роторної МБЛЗ

О. М. Смірнов, доктор технічних наук, професор

С. В. Куберський*, кандидат технічних наук, професор

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ
*Донбаський державний технічний університет, Лисичанськ

Проведено аналіз умов експлуатації розливального колеса роторної МБЛЗ та показано, що основними причинами утворення дефектів на його робочій поверхні є складні температурні режими роботи, які викликають виникнення локальних теплових і деформаційних напружень за переходу із зони охолодження до зони розливання. Показано, що зниження різниці температур колеса між цими зонами буде сприяти зменшенню деформації колеса, а також збільшенню терміну його експлуатації та підвищенню якості металопродукції.

В останні роки спостерігається значний прогрес в конструкційному оснащенні і технологічному оформленні машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Це розширило кількість типів МБЛЗ і дозволило адаптувати процес безперервного лиття до різних технологічних схем і видів продукції, які максимально враховують кон'юнктуру ринку [1].

Досягнення в області теорії і практики безперервного розливання металу сприяли суттєвій трансформації технологічної схеми отримання металопродукції, що передбачає відмову від отримання традиційної безперервнолитої заготовки. В останні десятиріччя з метою енерго- і ресурсозбереження, зниження питомих капітальних витрат і площ з основним технологічним обладнанням на зміну радіальним і криволінійним МБЛЗ передовими світовими виробниками металопродукції впроваджуються ливарно-прокатні агрегати (ЛПА) для виробництва тонкого сляба з подальшою гарячою прокаткою його на лист в єдиній технологічній лінії, що об'єднує МБЛЗ і прокатний стан [1 – 3]. Ще більші переваги забезпечують комплекси, які виробляють безпосередньо тонкий лист з використанням в якості розливального агрегату двовалкових МБЛЗ типу «Castrip» [1]. Енерговитрати на отримання тонкого листа з використанням ЛПА і валкових МБЛЗ знижуються в 3-7 разів, а довжина технологічної лінії від 1000 – 1400 м за традиційної схеми виробництва листа на ширококутних станах гарячої прокатки до 200 – 500 м при використанні ЛПА і 50 м для комплексів з двовалковою МБЛЗ. Можна стверджувати, що в найближчій перспективі найбільш ефективним технологічним агрегатом для розливання металів будуть саме ливарно-прокатні модулі з мінімальною технологічною довжини.

Структура, зношування, руйнування

В Україні для розливання чорних металів зазначені вище високотехнологічні та ефективні комплекси не використовуються, зважаючи на різні технологічні і організаційні причини. Аналог двовалкової МБЛЗ – роторна, в якій розливання здійснюється на колесо, що обертається (рис. 1), використовується в Україні лише для розливання міді на ПАТ «Артемівський завод обробки кольорових металів» (ПАТ АЗОКМ) в складі високотехнологічної лінії безперервного лиття і прокатки виробництва фірми «SOUTHWIRE» [4 – 6]. Аналіз особливостей роботи колеса-кристалізатора видається цілком доцільним в світлі подальшого використання встановлених теоретичних закономірностей і залежностей, а також практичних результатів під час розробки технологій суміщеного розливання та прокатки для отримання металопродукції з чорних металів.

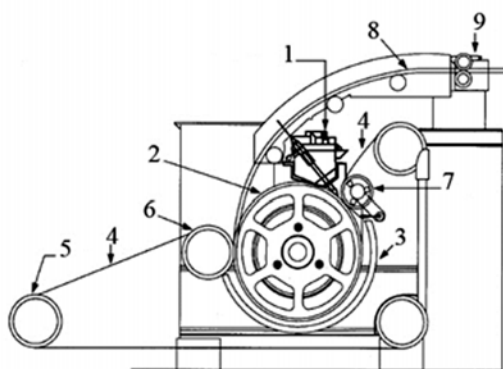


Рис. 1. Схема розливання на колесо. 1 – проміжний ківш; 2 – розливальне колесо; 3 – система водяного охолодження; 4 – сталеві стрічки; 5 – натяжний ролик; 6 – направляючий ролик; 7 – притисний ролик; 8 – заготовка; 9 – прокатна кліть.

За існуючою на ПАТ АЗОКМ технологією, отримана в печі вогневого рафінування, мідь по системі жолобів з підігрівом надходить до міксера, розташованого в безпосередній близькості від МБЛЗ. З міксера по спеціальному жолобу розплав безперервно подається в проміжний ківш, з якого із заданою витратою надходить компактним струменем в зазор між внутрішньою порожниною колеса і сталеву стрічку, яка притискується за допомогою системи роликів до поверхні ребер колеса. Ливарна форма в кристалізаторі утворюється виточенням в обертовому бандажі у вигляді трапеції та прилеглою до нього сталеву стрічку, залишаючи верх колеса вільним для виходу заготовки до прокатних клітей. Процес формування заготовки здійснюється в робочій порожнині обертового колеса, яку можна розглядати як кристалізатор відкритого типу. Як правило, заготовка повністю твердне на ділянці колеса довжиною 1,5 – 2,0 м.

Після виходу з порожнини колеса тверда заготовка по сталевому дугоподібному спрямовуючому жолобу надходить до тягучих роликів прокатної кліті.

Основним елементом кристалізатора роторної МБЛЗ є розливальне колесо, яке в значній мірі визначає параметри роботи ливарно-прокатного модуля [4, 7, 8]. Встановлено, що в ході тривалої експлуатації внутрішня

Структура, зношування, руйнування

(робоча) поверхня колеса може руйнуватися під дією механічних і температурних напружень, що негативно позначається на якості безперервнолитої заготовки та мідного прокату. За цих умов на поверхні заготовки спостерігається утворення напливів, тріщин, вм'ятин, деформацій профілю, які закатуються в дріт і погіршують його електротехнічні характеристики.

Тому основна мета даної роботи полягала в аналізі причин виникнення дефектів на робочій поверхні розливального колеса роторної МБЛЗ і їх впливу на якість металопродукції.

Для досліджень відібрані три виведених з експлуатації через руйнування робочої поверхні розливних колеса, тривалість експлуатації яких склала 1200 – 1350 робочих годин.

Основними дефектами робочої поверхні розливального колеса, які утворюються в процесі його експлуатації, є (рис. 2):

– поперечні тріщини, розташовані на робочій поверхні в площинах перпендикулярних напрямку розливання, як в нижній частині трапеції, так і на бічних її гранях (довжина тріщин 10 – 45 мм, а відстань між ними 7 – 40 мм);

– повздовжні заглиблення і подряпини, розташовані вздовж напрямку руху заготовки переважно в тупих кутах трапеції і в областях, прилеглих до них;

– деформація профілю колеса в кутах робочого каналу, зумовлена зношуванням внаслідок тертя.

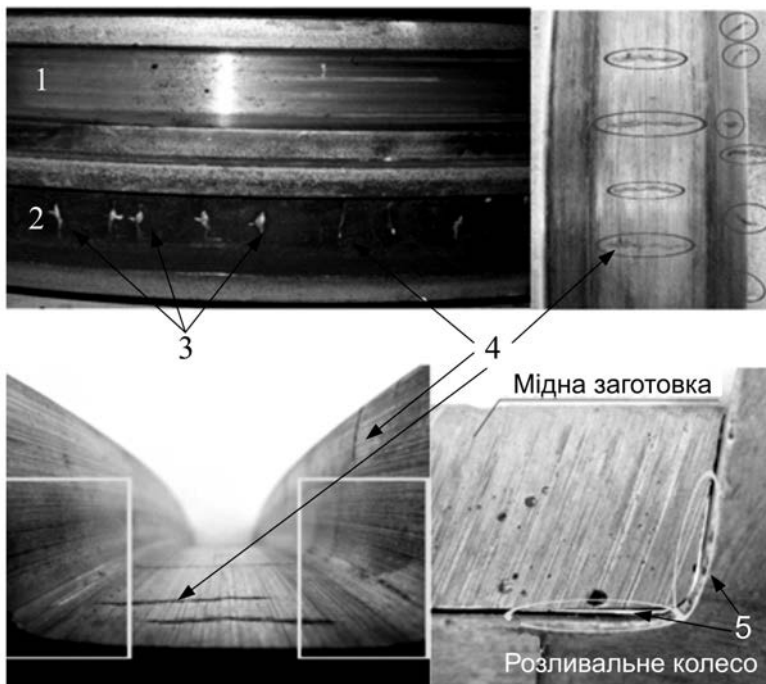


Рис. 2. Дефекти робочої поверхні розливальних коліс: 1, 2 – відпрацьовані колеса; 3 – фрагменти мідної безперервнолитої заготовки; 4 – тріщини на робочій поверхні колеса; 5 – деформація профілю колеса в кутах робочого каналу.

Утворення великої кількості поперечних тріщин на робочій поверхні колеса слід розглядати як свідчення складного напруженого стану в процесі експлуатації, що супроводжується деформаціями, викликаними термічними і термоциклічними напруженнями, тягучими зусиллями, вигином колеса і заготовки, тертям заготовки по стінках колеса тощо. Залежно від величини і динаміки розвитку ці напруження можуть окремо або в сукупності перевищити міцність поверхневих шарів колеса і викликати утворення тріщин.

Природа повздожніх заглиблень і подряпин, на нашу думку, зумовлена систематичним проковзуванням мідної заготовки щодо робочої поверхні колеса в процесі розливання. За цих умов інтенсивне зношування робочої поверхні колеса в районі тупих кутів пояснюється, перш за все, абразивним її руйнуванням внаслідок контакту з каркасом утворюваної заготовки, який має більш високу міцність в цій області на ранніх етапах тверднення. Це пояснюється високою швидкістю кристалізації заготовки в тупих кутах, зважаючи на наявність тут двовимірного теплового потоку. Утворення різного роду повздожніх подряпин слід пов'язувати з можливістю попадання твердих частинок шлаку в зазор між колесом і поверхнею безперервної заготовки.

Зміна геометричних розмірів і якості поверхні розливального колеса, яке контактує з металом, викликає утворення локальних ділянок, на яких погіршуються умови тепловідведення через збільшення товщини газового зазору між поверхнею заготовки та розливального колеса. У свою чергу нерівномірне тепловідведення і відхилення геометричних розмірів заготовки внаслідок зносу робочої порожнини розливального колеса в значній мірі впливають на стан поверхні і внутрішньої структури мідної катанки, що ускладнює отримання трапецієподібної міцної заготовки заданих розмірів і катанки необхідної якості.

Найбільш грубими дефектами робочої поверхні розливального колеса є поперечні тріщини. Для вивчення природи їх утворення з дефектних фрагментів розливального колеса були вирізані секції, в напрямку, що збігається з площиною поширення тріщини вглиб заготовки (рис. 3). Встановлено, що внутрішня поверхня тріщини вкрита тонким шаром графітового мастила, що свідчить про її утворення до виведення кристалізатора з експлуатації. Глибина проникнення тріщин збільшується від периферії меншої основи трапеції до її центру і може досягати максимальної величини 5 – 10 мм.

Характер поширення і конфігурація тріщин дозволяє зробити висновок про те, що вони утворюються під впливом значних напружень розтягування, які формуються в робочому шарі колеса в момент знаходження даної його ділянки в зоні високих температур (область подачі рідкого розплаву).

Не менш важливим фактором утворення тріщин слід вважати подальше інтенсивне вторинне охолодження колеса водою, оскільки за ним відбувається повторне нагрівання поверхні заготовки. У такому режимі роботи поверхневі шари колеса періодично розтягуються, що призводить до

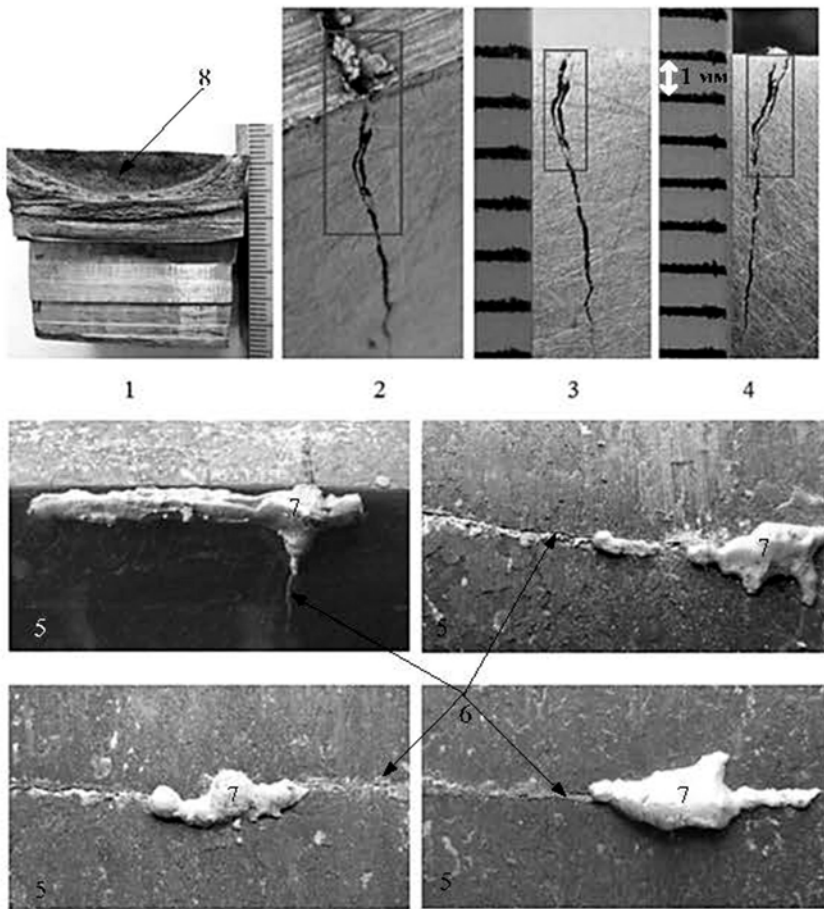


Рис. 3. Характер розташування поперечних тріщин, що утворюються на робочій поверхні розливального колеса та фрагменти безперервнолитої мідної заготовки. 1 – розріз колеса в місці утворення поперечної тріщини; 2 – 4 – глибина проникнення тріщин; 5 – робоча поверхня розливального колеса; 6 – тріщини; 7 – фрагменти відірваної безперервнолитої мідної заготовки; 8 – графітове мастило на поверхні тріщини.

поширення напружень розтягування в нижчих шарах. Ці напруження орієнтовані паралельно поверхні і перпендикулярно до осі заготовки. Відповідно тріщини поширюються на тих ділянках колеса, які ще знаходяться в зоні високих температур.

Тріщини, які утворюються на поверхні колеса, суттєво впливають на якість поверхні заготовки. По мірі розвитку тріщин розплав може проникати в них на глибину 2 – 4 мм, викликати зварювання заготовки до поверхні колеса і подальший відрив її фрагментів масою 0,5 – 4,0 г при відділенні заготовки від охолоджуючої поверхні. Це призводить до появи грубих поверхневих дефектів заготовки, які значно знижують якість одержуваної катанки. Тому розливання на такому колесі припиняють і замінюють його на нове.

При визначенні причин утворення тріщин в колесі враховувалися внутрішні напруження, що виникають, механічні властивості матеріалу колеса, умови розливання та охолодження заготовки. Аналіз причин

виникнення внутрішніх напружень високого рівня показує, що в робочому колесі циклічно виникають внутрішні розтягувальні напруження. Це зумовлено тим, що по мірі обертання колеса воно проходить різні за інтенсивністю відведення тепла області. Перепад температур в робочому шарі колеса зазвичай викликає розвиток в ньому розтягувальних напружень, а в більш глибоких шарах колеса формуються області стискаючих напружень.

В результаті зміни умов охолодження, особливо в зоні вторинного охолодження, де можливе локальне зниження температур поверхні, напруження можуть змінюватися на зворотні за значенням.

Для аналізу теплового і напружено-деформованого стану розливального колеса, під час розливання, було розроблено математичну модель, яка розв'язується методом кінцевих елементів. Як об'єкт досліджень використовували модель повнорозмірного колеса, розділеного за площиною симетрії на сітку кінцевих елементів з розміром осередку 3 мм.

При моделюванні теплового стану в якості граничних умов задавали температуру колеса: в зоні контакту з металом заготовки (нижня частина) – 170 – 160 °С, в зоні охолодження (верхня частина) – 80 – 100 °С. У місцях контакту з охолоджуючою водою задавали умови конвективного теплообміну ($\alpha = 500 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, $t = 30 \text{ °С}$), а для інших площин вільний теплообмін ($\alpha = 50 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, $t = 30 \text{ °С}$). На площині симетрії щільність теплового потоку приймали рівною нулю. Після стаціонарного теплового аналізу розрахункові дані моделі передавали в модель напружено-деформованого стану.

В якості граничних умов в моделі напружено-деформованого стану приймали умови симетрії, жорстку фіксацію внутрішньої поверхні колеса і теплове поле з попередньої задачі. Отримували поля деформацій і напружень за всіма координатними осями. Розподіл інтенсивності деформацій і напружень по перерізу розливального колеса представлено на рис. 4.

Встановлено, що максимальні деформації (рис. 4 а) виникають в зоні контакту колеса з гарячим металом, причому їх максимум припадає на «дно» кристалізатора, деформація ж бічних стінок виявляється меншою. Це пояснюється стрімким зростанням температури колеса після контакту з рідким металом і підвищеним тепловим розширенням. Мінімальна деформація колеса спостерігається в зоні охолодження, так як умови теплообміну тут більш «м'які». Розподіл напружень носить аналогічний характер. Таким чином, найбільший ризик виникнення тріщин має місце саме в донній частині кристалізатора.

Аналіз рис. 4 б свідчить про наявність значних напружень розтягування в тій чверті колеса, яка відповідає безпосередньо початку зони розливання. У той же час в чверті колеса, яка відповідає кінцю зони розливання, спостерігаються високі стискаючі напруження. У зонах охолодження розподіл цих напружень носить дзеркальний характер, проте величина їх в 2 – 3 рази менша. Таким чином, за один цикл обертання колеса в ньому відбувається циклічна зміна знаків напружень в радіальному напрямку. За цих умов дані напружень є як в донній частині кристалізатора, так і на бічних його стінках. Однак з огляду на велику товщину металу

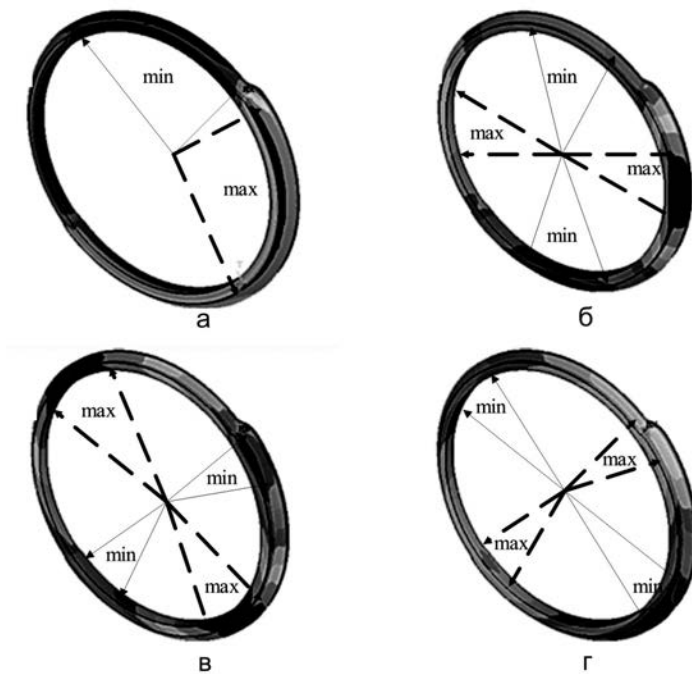


Рис. 4. Розподіл інтенсивності деформацій за перерізом розливної колеса (а), радіальних напружень в площині YZ (б), за віссю Y (спрямована вгору рисунка) (в) і за віссю Z (г).

бічних стінок в даному напрямку їх деформація значно нижча і ймовірність утворення тріщин менша. Відповідно, виникнення внутрішніх напружень може призводити до утворення тріщин переважно в донній частині кристалізатора, які будуть розкриватися в зоні початку розливання і закриватися ближче до її закінчення.

Що ж стосується розподілу внутрішніх напружень в інших напрямках, то їх розподіл виглядає дещо інакше. Так, розподіл напружень за віссю Y (спрямована вгору рисунка) свідчить про наявність зони напружень розтягування в нижній частині зони розливання і в верхній частині зони охолодження (рис. 4 в). У той же час, в місцях переходу від однієї зони в іншу спостерігаються максимальні напруження стискування. Такий розподіл напружень зумовлений тепловим профілем колеса, яке витягується за вертикаллю внаслідок його нагрівання в зоні розливання. Розподіл же напружень за віссю Z (рис. 4 г) носить зворотній характер. У нижній частині напруження стискування, а в місцях переходу від однієї зони в іншу – розтягування.

Слід зазначити наявність внутрішніх напружень саме в місці переходу із зони охолодження в зону розливання, тому що саме тут концентруються напруження відразу в кількох напрямках, що підвищує вірогідність виникнення тріщин. Тому слід зменшувати різницю температур між зонами, тобто не допускати істотного зниження температури колеса в зоні охолодження, а збільшувати інтенсивність його охолодження в зоні розливання.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу можна стверджувати, що основними причинами виникнення поверхневих і внутрішніх тріщин в колесі є складні температурні режими роботи, пов'язані з технологією розливання міді на МБЛЗ роторного типу. Чергування циклів нагрівання й охолодження окремих ділянок розливального колеса призводить до виникнення двомірних напружень розтягування в його внутрішніх шарах, наслідком чого є утворення тріщин. Не менш важливим фактором утворення тріщин слід вважати подальше надмірне вторинне охолодження колеса водою, оскільки за ним відбувається повторне нагрівання поверхні заготовки. Зниження різниці температур колеса між зонами охолодження та розливання буде сприяти зменшенню деформації його поверхні, а також збільшенню терміну експлуатації та підвищенню якості металопродукції.

Крім того, для підвищення експлуатаційної стійкості розливального колеса доцільно здійснювати постійний контроль профілю його робочої порожнини, не допускаючи відхилень, що перевищують гранично допустимі значення. Відхилення розмірів і конфігурації профілю від номінальних значень буде викликати нерівномірний контакт утворюваної оболонки заготовки зі стінкою колеса, що може стати причиною виникнення дефектів її геометричної форми і поверхні, а також буде негативно впливати на якість катанки.

Література

1. Смирнов О.М., Куберський С.В., Штепан Є.В. Безперервне розливання сталі. – Алчевск: ДонГТУ, ТВО „Ладо”. – 2011. – 518 с.
2. Дубоделов В.И., Смирнов А.Н., Куберский С.В. Инновационное развитие малых металлургических заводов как ключевое направление модернизации сталеплавильного комплекса Украины // Вісн. НАН України. – 2015. – № 12. – С. 33 – 45.
3. Матвеев Б.Н. Компактные литейно-прокатные агрегаты для производства особо тонких горячекатаных полос (аналитический обзор) // Бюллетень научно-технической информации «Черная металлургия». – 2016. – № 7. – С. 80 – 82.
4. Смирнов А.Н., Шутов И.В., Куберский С.В. Применение литейно-прокатного модуля в комплексной технологии получения качественной продукции из медного лома // Электрометаллургия. – 2012. – № 1. – С. 8 – 12.
5. Шутов И.В., Смирнов А.Н., Куберский С.В. Литейно-прокатный модуль для получения катанки из рафинированной меди // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 6. – С. 44 – 46.
6. Shutov I.V., Smirnov A.N., Kuberskiy S.V. Casting and Rolling Module for Obtaining Rolled Wire from Refintd Copper // Metallurgical and Mining Industry, 2011. – 3, No. 6. – P. 269 – 273.
7. Кац А.М., Шадек Е.Г. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов. “ М.: Металлургия, 1983. – 207 с.
8. Aizawa T., Niyama E., Kodama H. Investigation of Steel Billets Produced by a Rotary Type Continuous Caster // Transaction ISIJ. – 1984. – 24. – P. 992 – 998.

References

1. Smirnov, O.M., Kuberskiy, S.V., & Shtepan, Ye.V. (2011). *Bezpererovne rozlyvannia stali [Continuous casting]*. Alchevsk: DonHTU, TVO „Lado” [in Ukrainian].
2. Dubodelov, V.I., Smirnov, A.N., Kuberskiy, S.V., & Goriuk M.S. *Innovacionnoe razvitie malyh metallurgicheskikh zavodov kak kliuchevoe napravlenie modernizacii staleplavilnogo kompleksa Ukrainy [Innovative development of small steel plants as a key area of modernization of the steelmaking complex of Ukraine]*. Visnik NAN Ukrainy [in Russian].
3. Matveev, B.N. (2016). Kompaktnye liteino-prokatnye agregaty dlia proizvodstva osobo tonkih goriachekatanyh polos (analiticheskii obzor) [Compact casting-rolling units for the production of very thin hot rolled strips (Analytical Review)]. *Bulleten nauchno-tehnicheskoi informacii «Chernaia metallurgii» – Bulletin of scientific and technical information “Ferrous metallurgy”*, 7, 80-82 [in Russian].
4. Smirnov, A.N., Shutov, I.V., Kuberskiy, S.V., & Volkov S.M. (2012). Primenenie liteino-prokatnogo modulia v kompleksnoi tehnologii polucheniia kachestvennoi produkcii iz mednogo loma [The use of the casting-rolling unit in the complex technology of high-quality products from copper]. *Elektrometallurgii – Electrometallurgy*, 1, 8 – 12 [in Russian].
5. Shutov, I.V., Smirnov, A.N., & Kuberskiy, S.V. (2011). Liteino-prokatnyi modul dlia polucheniia katanki iz rafinirovannoi medi [Casting-rolling unit for rod of refined copper]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost – Metallurgical and Mining Industry*, 6, 44-46 [in Russian].
6. Shutov, I.V., Smirnov, A.N., Kuberskiy, S.V. (2011). Casting and Rolling Module for Obtaining Rolled Wire from Refintd Copper. *Metallurgical and Mining Industry, Vol. 3, No. 6*. p. 269 – 273 [in English].
7. Kats, A.M., & Shadek E.G. (1983). *Teplofizicheskie osnovy nepreryvnogo litia slitkov tsvetnykh metallov [Thermal foundations of continuous casting of non-ferrous metal ingots]*. Moskva: Metallurgiiia [in Russian].
8. Aizawa, T., Niyama, E., Kodama, H. (1984). Investigation of Steel Billets Produced by a Rotary Type Continuous Caster. *Transaction ISIJ*, 24, p. 992 – 998. [in English].

Одержано 22.09.16

А. Н. Смирнов, С. В. Куберский

Причины деформации и разрушения рабочей поверхности разливочного колеса роторной МНЛЗ

Резюме

Проведен анализ условий эксплуатации разливочных колес роторной МНЛЗ и показано, что основными причинами образования дефектов на их рабочей поверхности являются сложные температурные режимы работы, которые вызывают возникновение локальных тепловых и деформационных напряжений при переходе из зоны охлаждения в зону разливки. Показано, что снижение разницы температур колеса между этими зонами будет способствовать уменьшению его деформации и увеличению срока эксплуатации, а также повышению качества металлопродукции.

A. N. Smirnov, S. V. Kuberskyi

The reasons of deformation and fracture of the working surface of the casting wheel of continuous rotary caster

Summary

The analysis of the operating conditions of the casting wheel of continuous rotary casters is done and it is shown that the main reasons of the formation of defects on the working surface are complex operating temperature modes, which causes the appearance of the local thermal stresses and deformation during the transition from the cooling zone to the casting zone. It is shown that reducing the difference in temperature between the wheels in these areas will help to reduce the strain and increase its service life, as well as improve the quality of steel.

УДК:669.01

Зносостійкість титанових сплавів

О. М. Соловар, В. І. Вейс, Л. І. Олянич

Національний технічний університет України «КПІ», Київ

Досліджено вплив нітроцементзації на структуру та зносостійкість титанового сплаву ВТ6. Встановлено суттєве підвищення зносостійкості, зумовлене формуванням покриття з високою мікротвердістю та меншим коефіцієнтом тертя порівняно з необробленими зразками.

Серед перспективних конструкційних матеріалів, освоєних промисловістю в минулі роки, особливе місце займає титан і його сплави. Безперервне розширення області застосування цих матеріалів в різних галузях техніки пояснюється сприятливим поєднанням їх фізико-хімічних властивостей. Проте титанові сплави мають і недоліки, найбільш значні серед яких – висока вартість, низькі твердість поверхні і зносостійкість. Два останні фактори обмежують застосування титанових сплавів для роботи в умовах тертя і контактних навантаженнях.

Одним з найбільш широко застосовуваних методів підвищення цих характеристик є азотування. Сформований в результаті азотування шар складається з двох зон: дифузійної, яка представляє собою пересичений азотом і легуючими елементами б-твердий розчин титану, та зони хімічних сполук, що складається в основному з нітриду титану TiN.

Відомо [1], що найбільш високу твердість та зносостійкість зі сполук титану має карбід титану TiC. В той же час він відзначається високою схильністю до захоплення при обробці різноманітних матеріалів. Покриття ж з TiN характеризується практично повною інертністю до адгезії і високим