

ЗІСТАВНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРУ РУЙНУВАННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ КОЧЕННЯ КОЛІС РІЗНОГО РІВНЯ ТВЕРДОСТІ

І. Г. Узлов, д. т. н., проф., К. І. Узлов, к. т. н., доц., Ж. А. Дементьєва, А. М. Хулін, О. С. Баскевич*, к. т. н., В. І. Сухомлин, к. т. н.**

Інститут чорної металургії НАНУ,

**Український державний хіміко-технологічний університет,*

*** Дніпродзержинський державний технічний університет*

Результатами попередніх досліджень [1] закономірностей утворення повзунів та вищербин на колесах КПТ та КП2 в експлуатації було показано, що обидві колісні сталі КП2 та КПТ після імпульсного термічного впливу у точці локального контакту гальмування за перерізом зразків набувають структурного стану «зони термічного впливу» в глибину від поверхні кочення. Склад структурних зон, при цьому, в обох випадках однаковий, але, при ідентичному наборі структурних зон, їх розмірні характеристики для кожного із випадків є унікальними.

Порівняльний аналіз розмірних відповідностей зон термічного впливу та відносних параметрів структурних факторів сталей КП2 та КПТ, однозначно довів, що сумарна товщина зони термічного впливу в сталі КП2 зафіксована більшою за відповідний параметр структури сталі КПТ (3.6мм проти 3.3мм). При цьому всередині цієї зони «відбілений шар» в сталі КПТ виявився на 1.3мм більшим за такий показник у КП2 [1].

Аналіз мікротвердості показав, що градієнт цієї характеристики між поверхневою зоною гартування і тілом колеса у сталей КП2 в 3 рази більший за відповідну сталь КПТ (115.9% проти 34.5%, відповідно). Тобто, ці дані свідчать про більшу схильність сталі КП2 до утворення тріщин [1].

Метою досліджень цієї роботи було вивчення зіставних характеристик зон руйнування високоміцних та серійних коліс за допомогою рентгеноструктурного аналізу та електронномікроскопічної фрактографії.

У якості об'єктів аналізу були обраними колісні сталі марок 2 за ДСТУ ГОСТ 10791:2006 та Т за ТУ У 35.2-23365425-600:2006, які були вилучені з експлуатації через виникнення наднормативних дефектів на поверхні кочення.

Рентгенівський дифракційний аналіз проводили на дифрактометрі ДРОН-3М за стандартними методиками [2, 3] в монохроматизованому $\text{CuK}\alpha_1$ випромінюванні. Параметри решітки α -Fe фази вираховували за центром мас площини під кривою дифракційних максимумів за класичною формулою Вульфа-Бреггов.

Шліфи для електронномікроскопічного дослідження виготовляли із застосуванням електролітичного полірування в хромово-оцтовому електроліті з наступним відповідним травленням.

Растрові електронномікроскопічні і фрактографічні дослідження проводили на мікроскопі РЕМ-106-І. Прискорююча напруга та збільшення вказані на наведених в роботі мікрофотографіях.

Ідентифікацію мікрофрактографічних електронномікроскопічних зображень проводили за Атласами дефектів та фрактограмм [4, 5].

Електронномікроскопічний фрактографічний аналіз природи руйнування в експлуатації «білих шарів» на поверхні кочення суцільнокатаних коліс КПТ та КП2. Електронномікроскопічні фрактографічні зображення експлуатаційного руйнування «білих шарів» на поверхні кочення суцільнокатаних залізничних коліс КП2 та КПТ, у порівнянні, наведені на рисунках 1 та 2.

Рис. 1, а свідчить про те, що «білий шар» на поверхні кочення коліс КП2 руйнується з формуванням прямолінійних тріщин з незначним розгалуженням. Поверхні, які розділені тріщиною гладкі. Такі структурні ознаки притаманні крихкому характеру руйнування, який ще більш ускладнений наявністю лінійних напружень, пов'язаних із кристалогеометричною невідповідністю кубічної решітки феритної фази вихідної сталі та тетрагонально викривленою мартенситною структурою зони відбілу.

Ще більше крихких ознак руйнування має злам безпосередньо «білого шару» сталі КП2. Електронномікроскопічне фрактографічне зображення руйнування мартенситу (рис. 1, б) демонструє наявність зернограничних фасеток міжзеренного сколу, тобто рівновісні фрагменти розщеплення металу на поверхні кочення за границями зерен. Все це є наявною ознакою міжзеренного суто крихкого руйнування.

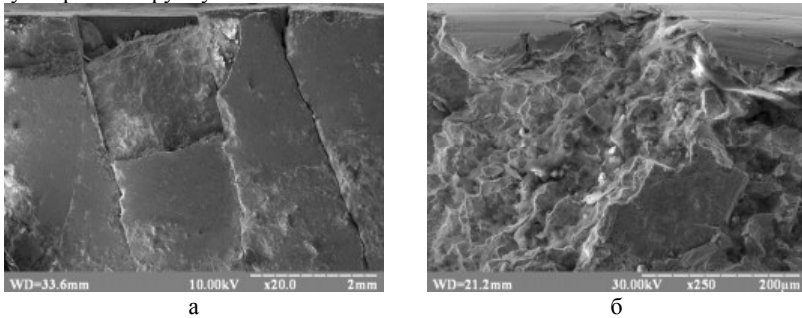


Рис. 1. Мікрофрактограми ділянок «білих шарів» на поверхні кочення коліс КП2.

В протилежність цьому, електронномікроскопічний аналіз поверхні руйнування «білого шару» коліс КПТ (рис. 2, а) виявив хвилястий характер розвитку тріщин з їх зломом волокнистої будови, що є притаманним втомленому руйнуванню із суттєвою долею в'язкої складової. При тому, сам мартенсит «білого шару» (рис. 2, б) руйнується навіть із формуванням гребенів відриву, що свідчить про в'язкий характер зламу, обумовлений іншою, на відміну від сталі КП2, кристалогеометрією його кристалічної решітки.

Таким чином, за даними електронномікроскопічного фрактографічного аналізу доведено, що суттєва відмінність природи мартенситу в «білих шарах» сталей КП2 та КПТ, принципово впливає на характер руйнування «білих шарів» в експлуатації завдяки значимо різним кристалічній будові та властивос-

тям (твердості). Наявність прямолінійних тріщин з незначним розгалуженням, зернограничних фасеток міжзеренного сколу є наявною ознакою міжзеренного суто крихкого руйнування. В протилежність цьому, хвилястий характер розвитку тріщин з їх зломом волокнистої будови, руйнування «білого шару» сталі КПТ навіть із формуванням гребенів відриву свідчить про втомлений механізм із суттєвою долею в'язкої складової в даному випадку.

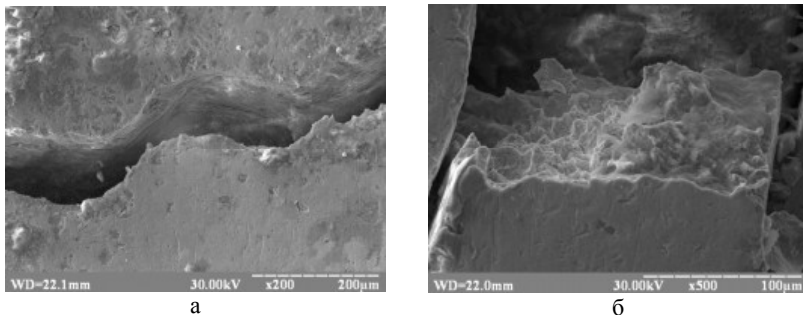


Рис. 2. Мікрофрактограми ділянок «білих шарів» на поверхні кочення коліс КПТ.

Електронномікроскопічний фрактографічний аналіз експлуатаційних пошкоджень зони руйнування суцільнокатаних коліс КПТ та КП2 у порівнянні. Електронномікроскопічні фрактографічні зображення експлуатаційного руйнування зон термічного впливу на поверхні кочення суцільнокатаних залізничних коліс КП2 та КПТ наведені на рисунках 3 та 4.

Рисунок 3, а свідчить про те, що в зламах домінують скольні фасетки. Поверхня руйнування не має втомлених бороздок, що вказує на зсувний механізм руйнування. Таким чином, в даному випадку має місце міжзеренне крихке руйнування. Рисунок 3, б демонструє рівновісні об'єми, які розщепилися по границям. Внаслідок цього сформувалися зернограничні фасетки і фасетки міжзеренного сколу. Все наведене ілюструє факт абсолютно крихкого руйнування зони термічного впливу поверхні кочення коліс КП2.

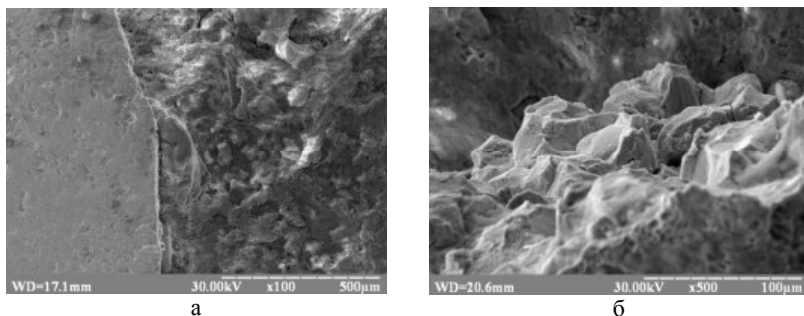


Рис. 3. Мікрофрактограми ділянок руйнування зони термічного впливу поверхні кочення коліс КП2.

В протилежність, у випадку руйнування зони термічного впливу поверхні кочення коліс КПТ ямки і фасетки сколу не формуються – рисунок 4, а – б. В цілому фрактографічний аналіз руйнування сталі КПТ (рис.4, а) виявляє злам волокнистої будови. Із рисунків 4, а, б видно що перетинки сформовані в процесі сколу у ході руйнування розірвані. В результаті загальна картина руйнування виглядає як хвилясті гребені втомлених бороздок переважно в'язкого руйнування (рис. 4, а, б). Через те, що механізм втомленого руйнування достатньо енергоємний, в зламі переважно спостерігаються деформаційні гребені внаслідок в'язкого руйнування окремих мікрооб'ємів. Дійсно, завдяки проходженню локальних актів мікропластичності, відображенням яких в зламах є деформаційні гребені, руйнування (рис. 4, а) призводить до формування терас з бороздками та сходінками зсуву у повністю втомленому зламі. Таким чином, за даними електронномікроскопічного фрактографічного аналізу доведено, що не тільки «білі шари» сталей КП2 та КПТ мають принципово різний характер руйнування, але і вся зона термічного впливу в цих випадках руйнується за принципово не однаковими механізмами. КП2 має суто міжзеренний крихкий злам. У випадку КПТ руйнування розвивається за втомленим механізмом, тобто відокремлення поверхневої частки металу проходить не одноактно, а за декілька циклів знакоперемінних навантажень, що свідчить про більш високу стійкість матеріалу коліс КПТ до руйнування у порівнянні з колесами КП2.

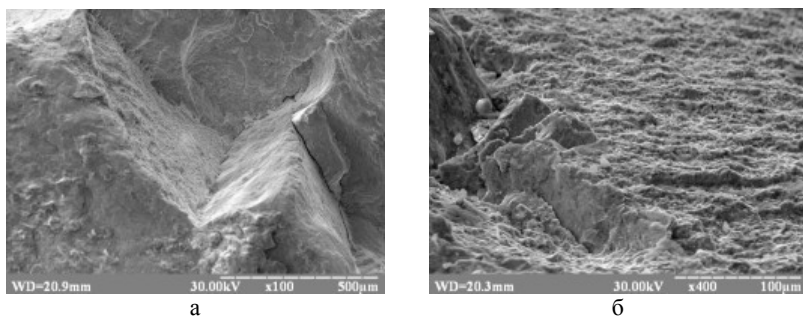


Рис. 4. Мікрофрактограми ділянок руйнування зони термічного впливу поверхні кочення коліс КПТ.

Дослідження мартенситної структури «білих шарів» на поверхні кочення суцільнокатаних коліс КПТ та КП2 методом рентгеноструктурного аналізу. Остаточний висновок про закономірності формування мартенситної α -фази білих шарів в обох розглядаємих випадках належить майбутньому детальному аналізу. Але попередні дослідження, результати яких наведені у цій роботі, продемонстрували принципову відмінність мартенситної структури в зонах відбілу коліс КП2 та КПТ.

На рисунках 5 та 6 наведені дифрактограми «білих шарів» з мартенситною структурою, які відшаровані від зон на поверхні кочення коліс КП2 та КПТ. Результати рентгеноструктурного фазового аналізу свідчать про те, що в обох випадках як колеса КП2 (рис. 5), так і КПТ (рис. 6) на поверхні кочення в

якості «білих шарів» містять мартенситну α - фазу із незначним вмістом цементитної складової (Fe_3C).

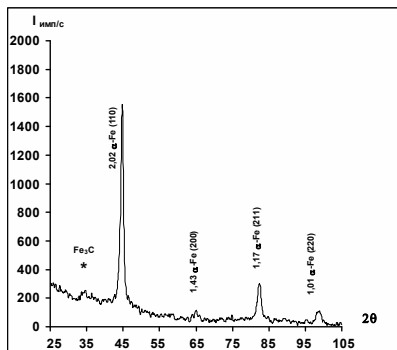


Рис. 5. Дифрактограма мартенситного порошку (Cu-Ka випромінювання) вилученого з білих шарів коліс КП2.

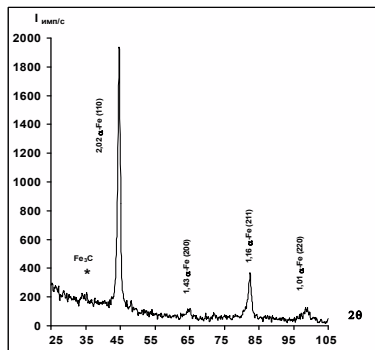


Рис. 6. Дифрактограма мартенситного порошку (Cu-Ka випромінювання) вилученого з білих шарів коліс КПТ.

В той же час аналіз профілів дифракційних максимумів (220) $\alpha\text{-Fe}$ (рисунок 7, 8, 9) продемонстрував принципову відмінність природи α - фази у еталонному зразку карбонільного заліза (рис. 7), у мартенситі «білого шару» КП2 (рис. 8) та у мартенситі «білого шару» КПТ (рис. 9).

В першому випадку (рис. 7) спостерігали формування одного дифракційного максимуму (220) $\alpha\text{-Fe}$, що безперечно підтверджує наявність у еталонному зразку кубічної α - фази з параметром решітки $a = 2.86 \text{ \AA}$ [2].

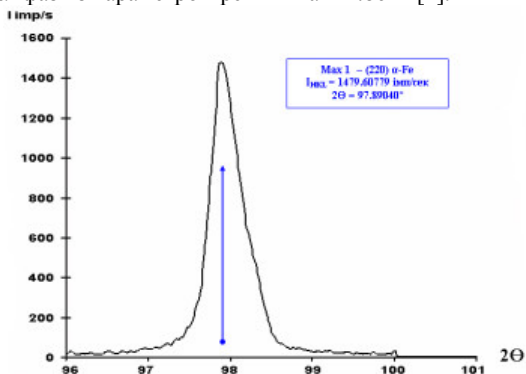


Рис. 7. Профіль дифракційного максимуму (220) $\alpha\text{-Fe}$ (Cu-Ka випромінювання) знятий з еталону карбонільного заліза

Водночас, зразки «білих шарів» коліс КП2 (рис. 8) продемонстрували типове розщеплення тетрагонального дублету (220) $\alpha\text{-Fe}$, (202) $\alpha\text{-Fe}$, що свідчить

про формування, в даному випадку, мартенситної тетрагональної α - фази з параметрами $a = 2.86 \text{ \AA}$, $c = 2.94 \text{ \AA}$ [2].

При цьому, відповідний дифракційний максимум зразків «білих шарів» коліс КПТ (рис. 9) виявився розщепленим на три лінії $(220)\alpha\text{-Fe}$, $(202)\alpha\text{-Fe}$ та $(022)\alpha\text{-Fe}$, що характеризує мартенсит, у цьому разі, як ромбічну α - фазу з параметрами решітки $a = 2.86 \text{ \AA}$, $b = 3.02 \text{ \AA}$, $c = 2.94 \text{ \AA}$ [2].

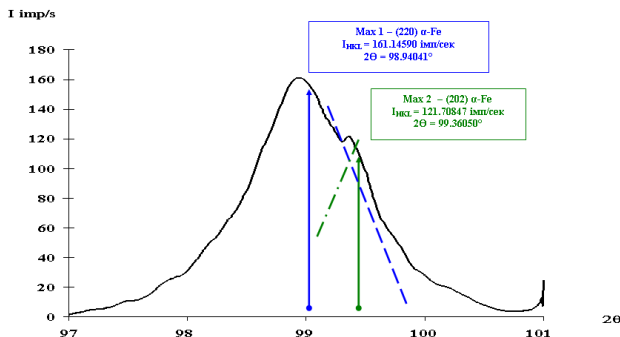


Рис. 8. Профіль дифракційного максимуму $(220) \alpha\text{-Fe}$ (Cu-K α випромінювання) знятий із мартенситного зразку дефекту на поверхні кочення колеса із сталі КП2

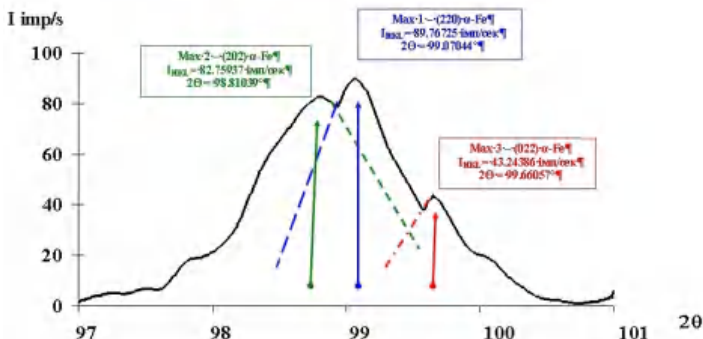


Рис. 9. Профіль дифракційного максимуму $(220) \alpha\text{-Fe}$ (Cu-K α випромінювання) знятий із мартенситного зразку дефекту на поверхні кочення колеса із сталі КПТ

Таким чином, метод рентгеноструктурного аналізу свідчить про принципово різну природу мартенситної структури «білих шарів» на поверхні кочення суцільнокатаних коліс КП2 та КПТ. Зразки «білих шарів» коліс КП2 продемонстрували типове розщеплення тетрагонального дублету $(220)\alpha\text{-Fe}$, $(202)\alpha\text{-Fe}$. Відповідний дифракційний максимум зразків «білих шарів» коліс КПТ виявився розщепленим на три лінії $(220)\alpha\text{-Fe}$, $(202)\alpha\text{-Fe}$ та $(022)\alpha\text{-Fe}$, що характеризує мартенсит, у цьому разі, як ромбічну α - фазу.

Суттєва відмінність природи мартенситу в «білих шарах» сталей КП2 та КПТ, по-перше – пояснює різницю твердості поверхневого шару зони відбілу на ділянці термічного впливу поверхні кочення суцільнокатаних залізничних коліс і, як наслідок значиму кількісну різницю градієнту твердості, по-друге – впливає на характер руйнування «білих шарів» в експлуатації завдяки, як було показано вище, значимо різним кристалічній будові та властивостям.

Висновки:

1. За даними електронномікроскопічного фрактографічного аналізу доведено, що «білі шари» на поверхні кочення коліс КП2 руйнуються з формуванням прямолінійних тріщин. Поверхні, які розділені такими тріщинами гладкі. Це є наявною ознакою міжзеренного суто крихкого руйнування.

2. Електронномікроскопічний аналіз коліс КПТ виявив хвилястий характер розвитку тріщин з їх зломом волокнистої будови. Сам мартенсит «білого шару» сталі КПТ руйнується навіть із формуванням гребенів відриву, тобто за втомленим механізмом із суттєвою долею в'язкої складової.

3. Електронномікроскопічні зображення фрактографії експлуатаційного руйнування зон термічного впливу на поверхні кочення суцільнокатаних залізничних коліс свідчать про те, що в зламах коліс КП2 домінують скольні фасетки, які ілюструють факт абсолютно крихкого руйнування зони термічного впливу поверхні кочення цих коліс. В протилежність цьому, руйнування сталі КПТ розвивається за втомленим механізмом, тобто відокремлення поверхневої частки металу проходить не одноактно, а за декілька циклів знакоперемінних навантажень, що свідчить про більш високу стійкість матеріалу коліс КПТ до руйнування у порівнянні з колесами КП2.

4. Методом рентгеноструктурного аналізу продемонстрована принципово різна природа мартенситної структури «білих шарів» на поверхні кочення суцільнокатаних коліс КП2 та КПТ. Зразки «білих шарів» коліс КП2 показали типове розщеплення тетрагонального дублету $(220)\alpha\text{-Fe}$, $(202)\alpha\text{-Fe}$, що свідчить про формування, в даному випадку, мартенситної тетрагональної α - фази. Відповідний дифракційний максимум «білих шарів» коліс КПТ виявився розщепленим на три лінії $(220)\alpha\text{-Fe}$, $(202)\alpha\text{-Fe}$, $(022)\alpha\text{-Fe}$, що характеризує мартенсит, у цьому разі, як ромбічну α - фазу.

Використані джерела

1. Узлов І.Г. Порівняльний аналіз причин утворення дефектів на поверхні кочення вуглецевих та підвищеної твердості мікролегованих суцільнокатаних коліс в експлуатації / І.Г. Узлов, С.В. Мямлін, К.І. Узлов [та інш.] // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. – 2011. – Вып. 24. – С.
2. Горелик С.С. Рентгенографический и электронооптический анализ. /С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков / М.: 1970. – 366 с.
3. Миркин Л.И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов / Л.И. Миркин. - М.: Машиностроение, 1979. – 134с.
4. Атлас дефектов стали. / Пер. с нем. под ред. М.Л. Бернштейна. М.: Металлургия. – 1979. – 188 с.
5. Фрактография и атлас фрактограмм. / Пер. с англ. под ред. М.Л. Бернштейна. М.: Металлургия. – 1982. – 489 с.
6. Пути повышения надежности и долговечности механизмов и машин./ Сб. трудов под ред. М.М. Машнева.- Ленинград: Транспорт, 1969.- 200с.