

УДК 539.43:669.018.294

О.П. Остап, І.М. Андрейко, В.В. Кулик

НОВА КОНЦЕПЦІЯ РОЗРОБЛЕННЯ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВИСОКОМІЦНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

За результатами статистичного аналізу експлуатаційних пошкоджень високоміцних залізничних коліс та відповідних лабораторних досліджень колісних сталей встановлено, що переважна більшість з них – це вищербини і повзуни на поверхні кочення. Тому необхідно змінити концепцію вибору сталі для високоміцних коліс: враховувати не тільки її характеристики міцності і твердості (зносотривкості), а й опірність тріщиноутворенню за умов контактної втоми. Вона повинна базуватися на підходах структурної механіки втомного руйнування і передбачати створення високоміцних колісних сталей з пониженим вмістом вуглецю та підвищеними характеристиками циклічної тріщиностійкості в умовах нормального відриву і поперечного зсуву і зносотривкості.

Ключові слова: колісна сталь, експлуатаційні пошкодження, вищербини, повзуни, втомна довговічність.

Табл. 2. Рис. 7. Літ. 17.

О.П. Остап, І.М. Андрейко, В.В. Кулик

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗРАБОТКИ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

На основании статистического анализа эксплуатационных поврежденных высокопрочных железнодорожных колес и соответствующих лабораторных испытаний колесных сталей показано, что преимущественно это выщербини и ползуны на поверхности катания. Сделан вывод о необходимости смены концепции выбора стали для высокопрочных колес: необходимо учитывать не только ее характеристики прочности и твердости (износостойкости), а также сопротивляемость трещинообразованию в условиях контактной усталости. Она должна базироваться на подходах структурной механики усталостного разрушения и предусматривать создание колесных сталей с пониженным содержанием углерода и повышенными характеристиками циклической трещиностойкости в условиях нормального отрыва и поперечного сдвига и износостойкости.

Ключевые слова: колесная сталь, эксплуатационные повреждения, выбоины, ползуны, усталостная долговечность.

O. Ostash, I. Andreiko, V. Kulyk

THE NEW CONCEPT OF DEVELOPMENT STEELS FOR HIGH-STRENGTH RAILWAY WHEELS

Based on statistical analysis of operational damages for high-strength railway wheels and relevant laboratory investigations of wheel steels it is shown that dominate majority of these damages are spallings and flats on the rolling surface. It is necessary to change the concept of wheel high-strength steel selection: both its strength and hardness (wear resistance) and also its crack-growth resistance under contact fatigue must be taken into account. It must be based on the approaches of microstructural fracture mechanics and provide the manufacture of wheel steels with lower carbon content and higher fatigue crack growth resistance characteristics under mode I and mode II fracture and wear-resistance.

Keywords: steel wheel, operational damage vyscherbyny, sliders, fatigue durability.

Вступ. Однією з основних причин виходу з ладу рухомого складу Укрзалізниці є понаднормове зношування гребеня суцільнокатаних коліс [1]. Повністю усунути зношування в зоні контакту колесо – рейка неможливо, проте знизити його інтенсивність можна вдосконаленням профілю поверхні кочення колеса, оптимізацією співвідношення твердості колеса і рейки, підвищенням міцності і твердості колеса.

Вирішуючи цю проблему, в Україні виготовили високоміцні колеса (типу КП-Т) зі сталі марки Т підвищеної твердості [2, 3] на заміну серійних середньоміцних коліс (типу КП-2) зі сталі марки 2. Основними характеристиками сталі марки Т є міцність $\sigma_B \geq 1020$ МПа і твердість $\geq 320 \dots 360$ НВ за вмісту вуглецю 0,62...0,70% проти $\sigma_B < 910-1110$ МПа і ≥ 255 НВ сталі марки 2 за вмісту вуглецю 0,56...0,63% [4]. Це дало можливість підвищити ресурс вагонних коліс типу КП-Т за критерієм зносотривкості на 30...40 % порівняно з колесами типу КП-2 [2].

Укрзалізниця в 2005-2008 рр. закупила і ввела в експлуатацію декілька тисяч високоміцних коліс. Співробітники науково-дослідної лабораторії "Вагони" ДНУЗТ проаналізували дефекти на поверхні кочення коліс, які надійшли в ремонт за дев'ять місяців 2009 р. з усієї мережі доріг Укрзалізниці [5]. За статистичними даними (рис. 1), більшість експлуатаційних пошкоджень належить до вищербин і повзунів (рис. 2а, б), хоча до недавнього часу найбільшу кількість складали прокат і пошкодження гребеня (його стоншення, вертикальний підріз і гострокінцевий накат).

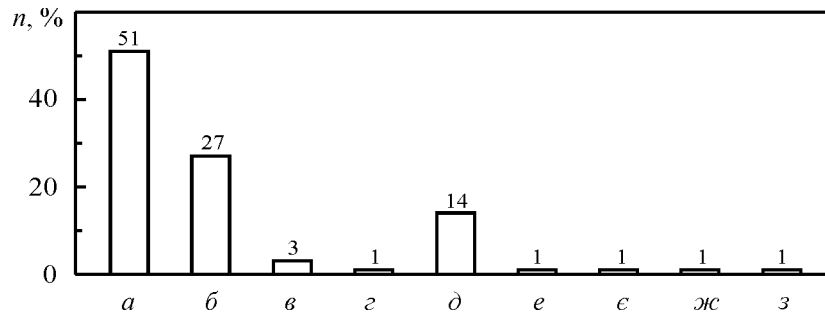


Рис. 1. Відносна кількість (n) дефектів різного типу: (а) – вищербина, б) – повзун, в) – навар, г) – кільцеве вироблення, д) – тонкий гребінь, е) – підріз гребеня, є) – накат гребеня, ж) – рівномірний прокат, з) – нерівномірний прокат) в колесах, які надійшли в ремонт за дев'ять місяців 2009 р. в депо Укрзалізниці

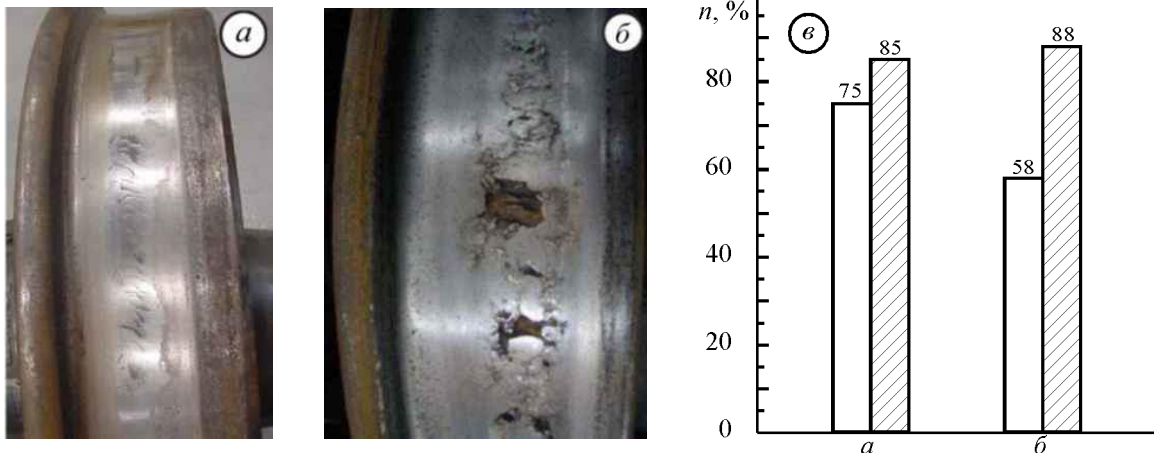


Рис. 2. Експлуатаційні пошкодження на поверхні кочення коліс: а) повзуни, б) вищербини, а також порівняння відносної кількості (n) коліс КП-2 (□) і КП-Т (▨) випуску 2005-2008 рр. з цими пошкодженнями (в)

Аналіз причин утворення дефектів на поверхні кочення коліс. Вищербини зумовлені тріщиноутворенням внаслідок контактної втоми металу, а повзуни – його локальним течінням [6]. Цьому сприяє проковзування в зоні контакту колеса-рейка (особливо під час гальмування на сортувальних гірках), де суттєво (до 900 °С [7]) підвищується локальна температура ($T_{гальм}$). Для рейки вона розподіляється вздовж шляху гальмування, а для колеса теплове навантаження концентрується в зоні контакту. В результаті тут падає опір текучості металу, а після швидкого охолодження вихідна перлітно-феритна структура колісної сталі частково трансформується в мартенситну. Повзуни спричиняють ударні навантаження, що інтенсифікує тріщиноутворення, особливо за мартенситної структури.

Порівняння пошкодженості коліс випуску 2005-2008 рр. залежно від марки сталі виявило (рис. 2в), що в колесах КП-Т повзунів і, особливо, вищербин значно більше, ніж у колесах КП-2. Водночас слід зауважити, що дефектів у вигляді повзунів і вищербин не зафіксовано під час випробувань вагонів з колесами КП-Т, де заборонено спускати вагони з гірок, що підтверджує формування цих пошкоджень у першу чергу за впливу температурно-силових факторів під час гальмування [5].

Несподіваним виявився факт більшої кількості повзунів в колесах КП-Т порівняно з колесами КП-2 (рис. 2в), зважаючи, що границя текучості сталі марки Т вища, ніж сталі марки 2. Проте він стає зрозумілим, коли проаналізувати отримані [8] температурні залежності характеристик міцності і пластичності сталей марок 2 і Т (рис. 3). Границі міцності (σ_B) і текучості ($\sigma_{0,2}$) обох сталей в інтервалі температур 20...800 °С змінюються подібно, але пластичність (відносне видовження δ) сталі марки Т за температур вище 500...520 °С стрімко зростає порівняно зі сталлю марки 2. Таким чином, вище оптимальної температури карбонітридного зміцнення сталь марки Т [8] починає знеміцнюватися і суттєво пластифікується. За локального розігріву після

гальмування температура може бути значно вищою [7], що зумовлює змінання приповерхневих шарів ободу на більшу глибину, ніж в колесі зі сталі марки 2. Якщо сталь марки Т додатково обробити модифікатором на основі РЗМ і Са за мінімального вмісту алюмінію (0,023%) та титану (0,006%), щоб подрібнити перлітні складові і покращити морфологію металургійних включень, то згідно температурної залежності δ для сталі варіанту T_m (рис. 3) можна очікувати, що колеса з цієї сталі будуть мати вищий опір утворенню повзунів після гальмування.

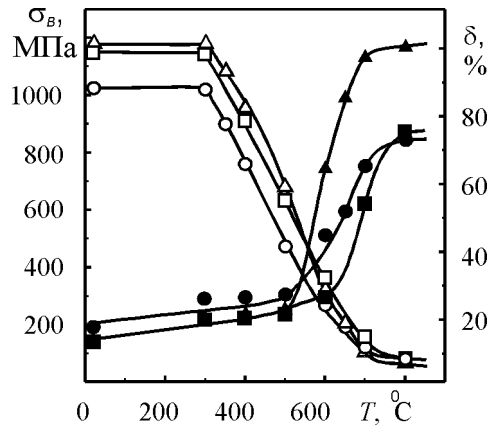


Рис. 3. Температурна залежність характеристик міцності (\circ, Δ, \square) і пластичності ($\bullet, \blacktriangle, \blacksquare$) сталей марок 2 (\circ, \bullet), Т (Δ, \blacktriangle) і T_m (\square, \blacksquare).

Результати статистичного аналізу формування вищербин (рис. 2в) узгоджуються з даними лабораторних досліджень пошкоджуваності модельної пари колесо-рейка [9]. Кількість вищербин, утворених шляхом відшарування, більша в модельних зразках високоміцного колеса порівняно зі середньоміцним.

Щоб отримати профілі вищербин, поверхні кочення модельних зразків досліджували безконтактним інтерференційним 3-D профілографом "Micron-beta" [9]. Глибина вищербин (рис. 4а, б) залежить від властивостей сталей. У високоміцному колесі вона більша: 10...11 проти 7...8 мкм (у реальних колесах сягає 2...3 мм).

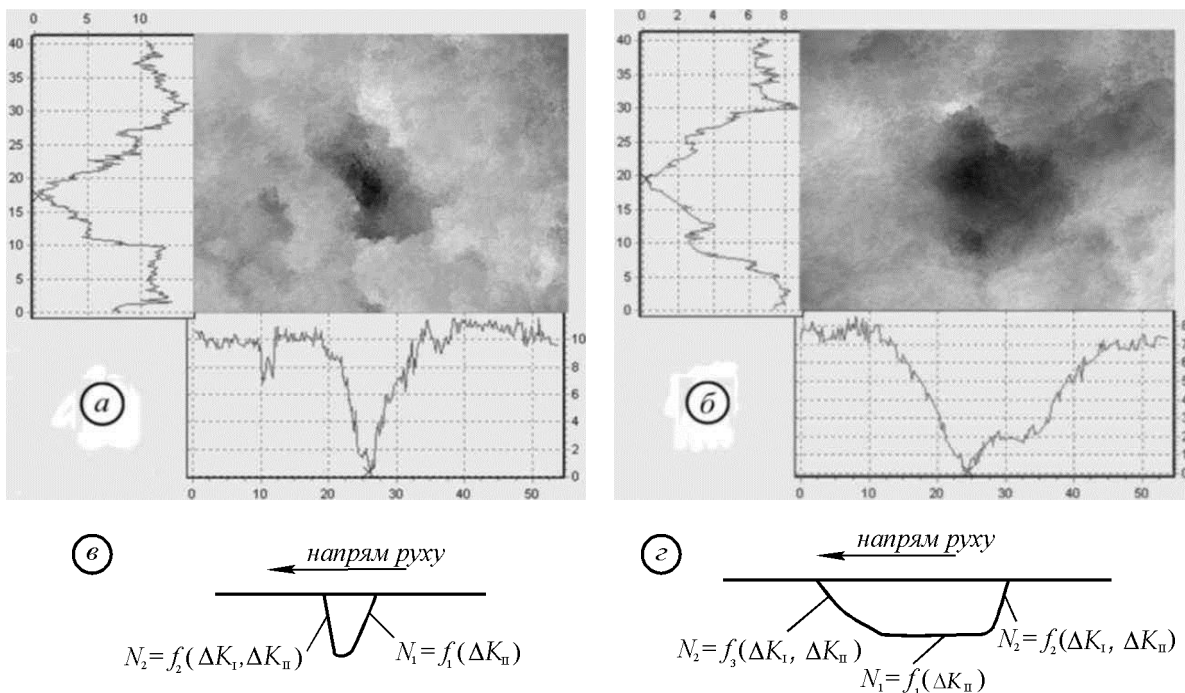


Рис. 4. Профілограми вищербин на поверхні кочення високо - (а) і середньоміцного (б) модельних зразків колеса (розмірність шкал подано в мкм) та схеми формування вищербини через пітингоутворення (в) і відшарування (з)

З аналізу поверхонь кочення модельних зразків запропоновано схеми утворення вищербин [9], коли кінетику цього процесу визначає тривалість (N) різних стадій пітингоутворення та відшарування (рис. 4в, з) внаслідок зародження і росту втомних тріщин. Втомна тріщина може зароджуватися як з поверхні кочення (рис. 4в), так і в підповерхневих шарах (рис. 4з). Її ріст відбувається по чергово за різної комбінації процесів нормального відриву (що контролює розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (K_{II}) $\square K_I$) та поперечного зсуву ($\square K_{II}$). Тріщина, що утворилася на поверхні кочення, росте вглиб під певним кутом за одночасної дії розмахів K_{II} $\square K_I$ і $\square K_I$. Зі зростанням її довжини змінюється механізм руйнування: від сумісної дії розмахів K_{II} $\square K_I$ і $\square K_I$ до майже виключної дії розмаху $\square K_{II}$, а далі знову за розмахів $\square K_I$ і $\square K_{II}$ за виходу її на поверхню кочення, що призводить до виникнення вищербини пітингоутворенням (рис. 4в). Підповерхнева тріщина росте за дії розмаху $\square K_{II}$, що зумовлює відшарування з подальшим виходом її на поверхню за сумісної дії розмахів K_{II} $\square K_I$ і $\square K_{II}$ (рис. 4з).

При цьому треба мати на увазі, що у формуванні вищербин пітингоутворенням і особливо підповерхневим відшаруванням суттєву роль можуть відігравати ендогенні неметалеві включення, розмір яких у колісних сталях становить 5...60 мкм.

Таким чином, для аналізу впливу структури і міцності колісної сталі на кінетику утворення дефектів типу вищербини потрібні діаграми швидкості росту втомної тріщини від розмаху K_{II} ($da/dN - \Delta K_I$) і ($da/dN - \Delta K_{II}$) [10].

Механічна поведінка сталей залежить від впливу експлуатаційних факторів. Порівняно зміну комплексу механічних характеристик сталі марки Т зі сталлю марки 2 з урахуванням дії низької температури, корозивного середовища, локального нагріву під час гальмування [11-14]. Встановлено (табл. 1), що високоміцна сталь, переважаючи середньоміцну за показниками міцності (σ_B) і твердості (НВ), помітно поступається їй за циклічною тріщиностійкістю, особливо циклічною в'язкістю руйнування $\Delta K_{I,fc}$ за умов нормального відриву. За порогоми втоми $\Delta K_{I,th}$ відмінності між ними незначні, за винятком випадку впливу гальмування. Виявлено, що експлуатаційні проблеми високоміцних залізничних коліс особливо пов'язані з дією температурно-силових факторів під час гальмування, коли для високоміцної сталі відносне падіння $\Delta K_{I,th}$ навіть перевищує суттєве зниження $\Delta K_{I,fc}$ (табл. 1). Причиною утворення вищербин на поверхні кочення коліс є інтенсифікація тріщиноутворення в зоні контакту колесо-рейка, зумовлена мартенситним перетворенням і розтягальними залишковими напруженнями [14], дію яких можна моделювати високою асиметрією ($R=0,5$) циклу навантаження (табл. 1).

Ці модельні дослідження показали, що порівняно з вихідним станом, після гальмування, особливо з повітряно-водяним охолодженням, різко змінюється механізм росту втомної тріщини в обох сталях: від квазів'язкого череззеренного (рис. 5а, б) до змішаного ямкового і міжзеренного в сталі марки 2 (рис. 5в) та переважно низькоенергоємного відкольного міжзеренного руйнування в сталі марки Т (рис. 5з).

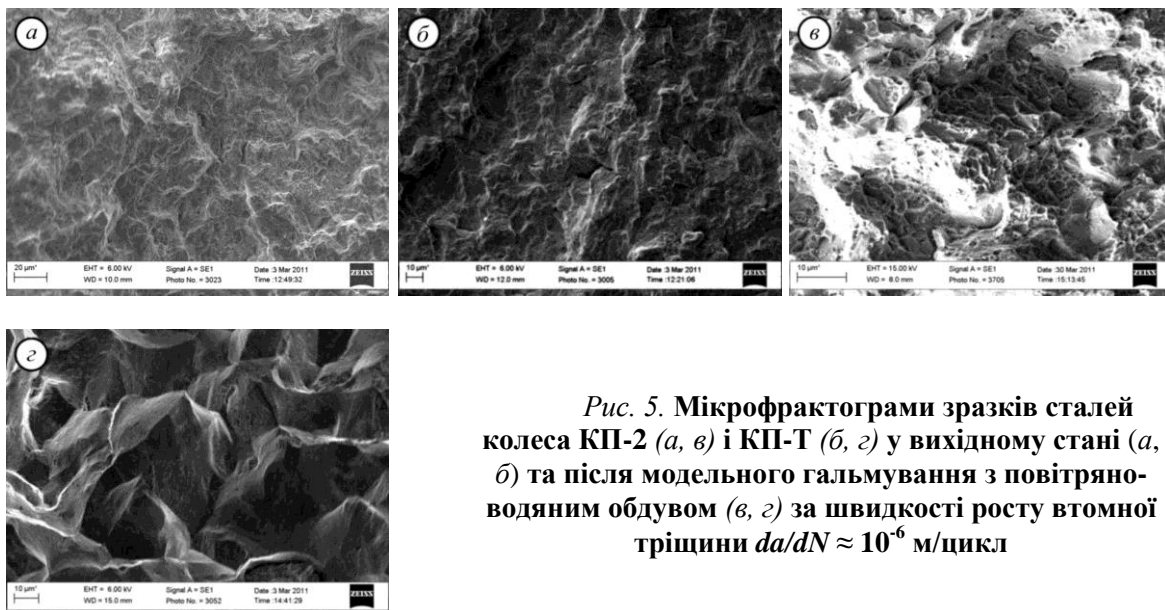


Рис. 5. Мікрофрактограми зразків сталей колеса К2-2 (а, в) і КТ-Т (б, з) у вихідному стані (а, б) та після модельного гальмування з повітряно-водяним обдувом (в, з) за швидкості росту втомної тріщини $da/dN \approx 10^{-6}$ м/цикл

Виявлена зміна мікроефективності руйнування і характеристик циклічної тріщиностійкості досліджуваних сталей спричинена сукупним впливом трансформації їх вихідної мікроструктури, яка залежить від вмісту вуглецю в сталі, а також залишкових напружень II роду, які зумовлені технологічними режимами під час виробництва коліс (вихідний стан) та термосиловими чинниками за гальмування (табл. 2). Рентгеноструктурний аналіз показав [14], що вищевказаний вплив відобразився на зміні міжплощинної віддалі d в кристалічних ґратках сталей (для лінії (220)) і, відповідно, на залишкових напруженнях II роду. Чітко видно (табл. 2), що зниження циклічної в'язкості руйнування $\square K_{fc}$ обох сталей пов'язане зі зменшенням стискальних і ростом розтягальних напружень II роду $\square r$. Поріг втоми $\square K_{th}$ при цьому спочатку росте, а потім знижується. Він змінюється у широкому інтервалі для середньоміцної сталі і незначно для високоміцної. В максимально окришеному стані (після гальмування з повітряно-водяним обдувом) сталь марки Т поступається сталі марки 2 за циклічною в'язкістю руйнування $\square K_{fc}$ у 1,7 рази; за порогом втоми $\square K_{th}$ – у 2,4 рази.

Таблиця 1. Вплив експлуатаційних факторів на відносну зміну механічних характеристик сталей високо- і середньоміцного коліс [11-14]

Відношення характеристик сталей коліс	Повітря, 20°C		Повітря						Корозивне середовище		Після гальмування на повітрі	
	σ_B	НВ	20°C				-40°C, R=0,1		20°C, R=0,1		20°C, R=0,1	
			R=0,1		R=0,5		ΔK_{Ith}	ΔK_{Ijc}	ΔK_{Ith}	ΔK_{Ijc}	ΔK_{Ith}	ΔK_{Ijc}
			ΔK_{Ith}	ΔK_{Ijc}	ΔK_{Ith}	ΔK_{Ijc}						
КП-Т/КП-2	1,24	1,22	0,93	0,65	1	0,30	1	0,60	0,97	0,64	0,39	0,45

Таблиця 2. Структурні параметри і характеристики циклічної тріщиностійкості колісних сталей

Марка сталі	Стан матеріалу (охладж. середовище)	Структура	$d, \text{Å}$	$\sigma_r, \text{МПа}$	$\square K_{th}$	$\square K_{fc}$
					$\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{І}}$	
2 (0,56...0,58%)	Еталон	Перліт, ферит (відпал)	1,01320	0	-	-
	Вихідний	Перліт, ферит (відпуск)	1,01360	-276	7,0	100
	Після гальмування (повітря)	Перліт	1,01356	-249	20,0	100
	-//- (повітряно-водяний обдув)	Перліт, бейніт	1,01315	+36	14,1	54
Т (0,63...0,66%)	Еталон	Перліт, ферит (відпал)	1,01322	0	-	-
	Вихідний	Перліт, ферит (відпуск)	1,01377	-380	6,5	65
	Після гальмування (повітря)	Перліт, бейніт	1,01333	-76	7,8	45
	-//- (повітряно-водяний обдув)	Перліт, бейніт, мартенсит	1,01290	+221	5,9	31

Оцінювання робоздатності колісних сталей. Отримані результати обґрунтовують необхідність зміни концепції вибору сталей для підвищення довговічності високоміцних залізничних коліс, який повинен здійснюватися як за критерієм зношування (що визначає міцність і твердість сталей), так і за критерієм вищерблювання поверхні кочення (що визначає циклічна тріщиностійкість сталей). Підвищений (до 0,7%) вміст вуглецю в сталі марки Т, зумовлюючи ріст зносотривкості (твердості), спричиняє її схильність до мартенситного перетворення [14, 15], зміну залишкових напружень II роду і, як результат, падіння циклічної тріщиностійкості (табл. 2).

Нова концепція повинна базуватися на підходах структурної механіки руйнування [16]. Вона передбачає необхідність зниження вмісту вуглецю в колісних сталях для запобігання

мартенситного перетворення після гальмування (рис. 6а); пошук структур колісних сталей, які забезпечують оптимальне поєднання характеристик їх міцності і циклічної тріщиностійкості (рис. 6б) з урахуванням механізмів руйнування за умов нормального відриву і поперечного зсуву (рис. 6в) для мінімізації тріщиноутворення і вищерблювання на поверхні кочення коліс. Бейнітна структура сталі колеса КП-Т забезпечує суттєво вищі характеристики циклічної тріщиностійкості [12] проти перлітної в сталі коліс КП-Т і навіть КП-2. Для оптимального поєднання міцності і тріщиностійкості перспективна трооститна структура (рис. 6б).

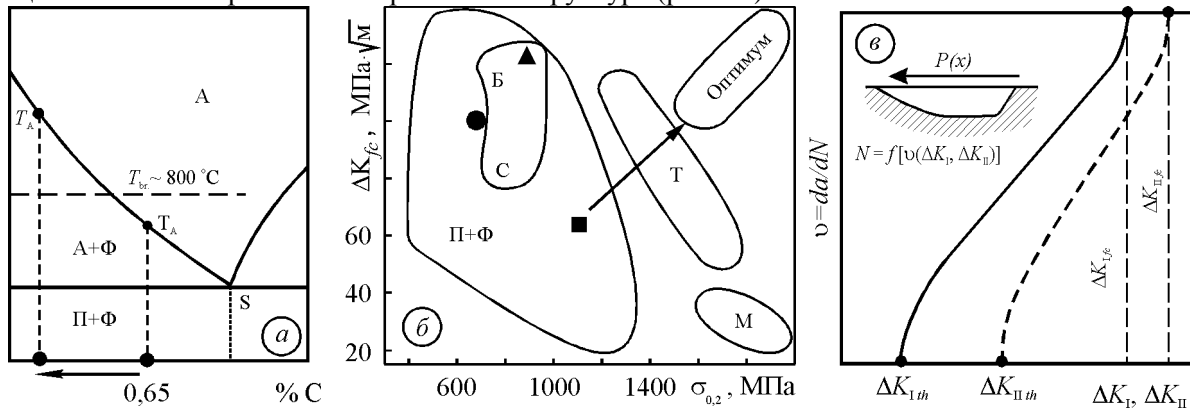


Рис. 6. Концепція оптимізації колісних сталей: а) запобігання мартенситного перетворення після гальмування; б) оптимальне поєднання міцності і циклічної тріщиностійкості (діаграма конструкційної міцності [16]); в) врахування механізмів руйнування за умов нормального відриву і поперечного зсуву: А – аустеніт, Ф – ферит, П – перліт, Б – бейніт, М – мартенсит, Т – троостит, С – сорбіт; ●, ■ – перлітні сталі коліс КП-2 і КП-Т, відповідно; ▲ – бейнітна структура сталі коліс КП-Т

Таким чином згідно нової концепції вибору (розроблення) сталей для високоміцних залізничних коліс вони повинні оптимально поєднувати підвищені характеристики зносостійкості і опору утворенню вищербин (пітингів і під поверхневих розшарувань) в умовах контактної втоми. Пошук цього оптимуму потрібно вести за допомогою діаграм конструкційної міцності – залежностей характеристик циклічної тріщиностійкості від міцності (твердості) сталей з урахуванням їх структури і мікромеханізмів руйнування (рис. 6б). Проте універсальнішим у цьому плані для колісних сталей повинні бути діаграми експлуатаційної надійності – залежності між характеристиками циклічної тріщиностійкості, які визначають опір утворенню експлуатаційних дефектів на поверхні кочення коліс та характеристиками, які визначають опір зношуванню гребеня і поверхні кочення коліс (рис. 7). В якості останніх можуть бути вибрані величини, обернені до втрати маси ($1/\square m$) або лінійних розмірів, які встановлюють за результатами стандартних випробувань матеріалів на зношування. Очевидним є той факт, що шуканий оптимум буде знаходитися у правому верхньому куті цієї діаграми (рис. 7). Видно, що за наявними експериментальними даними ні одна з досліджених на даний час сталей не забезпечує оптимальне поєднання зносостійкості і опору утворенню вищербин.

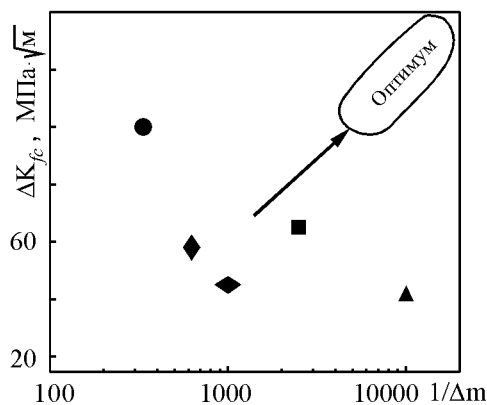


Рис. 7. Діаграма експлуатаційної надійності колісних сталей: ● – сталь марки 2; ■ – марки Т; ▲ – варіант Т_м; ◆, ◆ – експериментальні варіанти

Висновки. На основі статистичного аналізу експлуатаційних пошкоджень залізничних коліс типу КП-2 і КП-Т та лабораторних досліджень сталей марок 2 і Т обґрунтовано необхідність вибору колісних сталей і за опірністю зношуванню, і за опірністю утворенню дефектів (повзунів і вищербин) на поверхні кочення коліс, що вимагає зміни відповідних нормативно-технічних документів на колісну продукцію. Запропоновано новий підхід для розроблення (вибору) сталей для висококомісних залізничних коліс, ґрунтуючись на діаграмах експлуатаційної надійності сталей.

1. *Лашко А.Д., Савчук О.М.* К вопросу о стратегии Укрзалізници по решению проблемы устранения сверхнормативных износов пары "колесо-рельс" // Залізничний транспорт України. – 1997. – №2-3. – С. 2–4.
2. Научная разработка и производственная реализация технологии микролегирования и термоупрочнения высокоизносостойких железнодорожных цельнокатаных колес / И.Г. Узлов, К.И. Узлов, О.Н. Перков, А.В. Кныш // Фундаментальные и прикл. проблемы черной металлургии. – 2004. – Вып. 7. – С. 231–243.
3. *Харченко И.Г.* Эксплуатационная надежность колесных пар грузовых вагонов // Вагонный парк. – 2008. – №2. – С. 21–22.
4. *ГОСТ 10791-2011.* Колеса цельнокатаные. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2011. – 28 с.
5. Про концепцію вибору сталей для висококомісних залізничних коліс / О.П. Осташ, В.Г. Анофрієв, І.М. Андрейко та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – №6. – С. 7–13.
6. Дефекти залізничних коліс / І.О. Вакуленко, В.Г. Анофрієв, М.А. Грищенко, О.П. Перков. – Дн-вськ: Вид-во Маковецький, 2009. – 112с.
7. Frictional heat-introduced phase transformation on train wheel surface / S. Hang, P. Tao, L. Li et al. // J. of Iron and Steel Research Int. – 2008. – 15(5). – P. 49–56.
8. *Андрейко І.М., Кулик В.В.* Температурна залежність механічних характеристик колісних сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – №1. – С.113–115.
9. Контактно-втомна пошкоджувальність поверхні кочення залізничних коліс типу КП-2 і КП-Т / О.П. Осташ, І.М. Андрейко, В.В. Кулик та ін. // Вісник Дніпропетр. нац. ун. залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 39. – С. 118–122.
10. Експлуатаційна довговічність залізничних коліс із висококомісної сталі / В.В. Панасюк, О.П. Осташ, О.П. Дацишин та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: Ін-т електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, 2009. – С. 659–663.
11. Низькотемпературна циклічна тріщиностійкість сталей залізничних коліс / О.П. Осташ, І.М. Андрейко, В.В. Кулик та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – №4. – С. 52–57.
12. *Вплив* режиму термічної обробки і асиметрії циклу навантаження на циклічну тріщиностійкість колісних сталей / О.П. Осташ, І.М. Андрейко, В.В. Кулик та ін. // Там же. – 2009. – №2. – С. 63–70.
13. *Андрейко І.М., Кулик В.В., Осташ О.П.* Опір корозійно-втомному руйнуванню сталей залізничних коліс // Там же. – 2011. – №5. – С. 35–39.
14. Вплив гальмування на мікроструктуру і механічну поведінку сталей залізничних коліс / О.П. Осташ, І.М. Андрейко, В.В. Кулик, В.І. Ваврух // Там же. – 2012. – №5. – С. 15–20.
15. Исследование причин образования дефектов на поверхности катания высокопрочных колес в процессе эксплуатации / А.И. Бабаченко, А.А. Кононенко, Ж.А. Деметьева и др. // Залізничний транспорт України. – 2010. – №5. – С. 35–38.
16. Структурная механика разрушения и эксплуатационная надежность железнодорожных колес / О.П. Осташ, А.И. Бабаченко, И.М. Андрейко и др. // Фундаментальные и прикл. проблемы черной металлургии. – 2009. – Вып. 20. – С. 246–253.
17. *Бабаскин Ю.З., Шипицын С.Я., Кирчу И.Ф.* Конструкционные и специальные стали с нитридной фазой. – К.: Наук. думка, 2005. – 372 с.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.