

Studio del danneggiamento termomeccanico di acciai per ruote ferroviarie frenate a ceppi mediante test innovativi *small-scale*

Study of the thermo-mechanical damage in steels for shoe-braked railway wheels using innovative small-scale tests

Lorenzo GHIDINI (*)

Angelo MAZZÙ (*)

Silvio BONOMETTI (*)

Michela FACCOLI (*)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.0708.2023.ART.1>)

Sommario - Il comportamento di tre acciai per ruote ferroviarie (HYPERLOS®, ER-TEN e SUPERLOS®) accoppiati a due materiali per ceppi frenanti (ghisa e composito organico) e all'acciaio per rotaie R260 è stato studiato per mezzo di un innovativo banco di prova in scala ridotta, di seguito chiamato macchina a 4 contatti. Questo banco ha simulato i danneggiamenti termo-meccanici subiti da ruote ferroviarie reali durante la frenata. Sono stati condotti test comparativi per valutare la fatica da contatto ciclico e l'usura per ciascuna combinazione di materiali. I risultati sono comparabili ai danni operativi reali, rivelando differenze nelle prestazioni dei materiali. I campioni di ceppo in ghisa hanno mostrato un'usura maggiore e hanno generato uno strato di materiale di riporto su quelli di ruota, mentre i campioni in materiale composito hanno mostrato una bassa usura. Sebbene gli acciai per ruote testati abbiano mostrato un comportamento simile, l'entità dei danni osservati è differente, con alcuni materiali che hanno mostrato danneggiamenti più elevati di altri.

1. Introduzione

La frenatura nei veicoli ferroviari per il trasporto merci avviene principalmente mediante freni a ceppi, ovvero blocchi che applicano una certa pressione e generano una forza di attrito radente direttamente sulla superficie di rotolamento della ruota. Sebbene in alcuni casi sia preferibile l'applicazione di freni a disco, la frenatura a ceppi consente di rimuovere i dischi che, in quanto masse rotanti, caricano ulteriormente l'assale, aumentando il peso e

Summary - The behavior of three railway wheel steels (HYPERLOS®, ER-TEN, and SUPERLOS®) coupled with two brake block materials (cast iron and organic composite) and R260 rail steel was studied by means of an innovative small-scale test bench, hereafter called 4-contact machine. This bench simulated the thermal and mechanical damage experienced by real railway wheels during braking. Comparative tests were conducted to assess rolling contact fatigue and wear damage for each material combination. The results aligned with actual operational damage, revealing differences in material performance. Cast iron block samples exhibited higher wear and generated a carryover material layer on the wheel samples, while the composite brake block samples wore less. Although the tested wheel steels showed similar behaviour, the extent of observed damage varied, with some materials experiencing more damage than others.

1. Introduction

Braking in railway freight vehicles is mainly accomplished by block brakes, which are blocks that apply a certain amount of pressure and generate a sliding friction force directly on the tread of the wheel. Although the application of disc brakes is preferred in certain cases, block braking allows for the removal of the discs, which, as rotating masses, further load the axle, increasing weight and potentially generating vibrations. In fact, block braking has lately started to be used in high-speed situations for emergency braking [1]. Braking-related heat and mechanical

(*) Università degli Studi di Brescia, Brescia, Italia. Autore corrispondente: lorenzo.ghidini@unibs.it.

(*) Università degli Studi di Brescia, Brescia, Italy. Corresponding author: lorenzo.ghidini@unibs.it.

potenzialmente generando vibrazioni. Grazie ai vantaggi che comporta, ultimamente la frenatura a ceppi ha iniziato a essere utilizzata in situazioni di alta velocità per le frenate di emergenza [1]. Il calore e le sollecitazioni meccaniche legate alla frenata possono alterare la microstruttura del materiale nelle zone di contatto e portare allo sviluppo di fratture termomeccaniche, che possono portare a eventi di cedimento estremamente gravi o, in ogni caso, ridurre la durata di vita della ruota [2]. Dal punto di vista dei materiali frenanti, il passaggio dalla ghisa, che è stata il solo materiale utilizzato per molti anni, ai materiali sinterizzati e compositi per i ceppi dei freni ha comportato una serie di vantaggi in termini di prestazioni, ma anche nuove problematiche. Infatti, l'introduzione di materiali in grado di generare una maggiore potenza frenante e con scarse proprietà di dissipazione del calore ha comportato un aumento del flusso di energia termica sulla ruota, determinando una situazione più gravosa per la ruota ferroviaria [3]. I ceppi freno in ghisa sono noti per l'introduzione di elevati livelli di rugosità superficiale sul rotolamento della ruota. Queste irregolarità provocano vibrazioni nelle ruote e nelle rotaie, con conseguente emissione di rumore [4]. Le zone calde causate dal contatto termomeccanico tra i ceppi freno e il rotolamento della ruota sono una delle cause principali della rugosità superficiale. Quando impiegati, i ceppi freno in ghisa possono trasferire materiale ai punti caldi sul rotolamento della ruota. VERNERSSON [5] ha osservato per la prima volta questo fenomeno con prove di frenatura in scala reale. Più recentemente, FACCOLI et al. [6][7] e MAZZÙ et al. [8][9] hanno riprodotto il fenomeno con prove condotte su un banco bi-disc. Gli autori hanno osservato che il fenomeno consiste nella deposizione di materiale del ceppo freno sulla superficie di contatto del disco ruota e nel successivo distacco del materiale, che avviene ciclicamente. È, inoltre, importante notare che l'usura dei ceppi freno e la rimozione del materiale trasferito dalla superficie della ruota contribuiscono entrambi agli elevati costi di manutenzione dei ceppi freno in ghisa e alle emissioni di particelle nell'aria [10][11]. I ceppi freno in materiale organico composito e sinterizzato riducono la rugosità del rotolamento delle ruote e i livelli di rumorosità, e possono persino lucidarne la superficie [12]. Per questo motivo, sono stati compiuti molti sforzi per valutare la possibilità di sostituire i ceppi freno in ghisa con ceppi in materiali compositi o sinterizzati. Ci sono, però, molti aspetti da considerare. Rispetto ai ceppi in ghisa, il costo del materiale è più elevato, ma la durata del materiale è maggiore. Inoltre, è necessario modificare l'impianto frenante per ridurre al minimo il surriscaldamento termico delle ruote prodotto dai ceppi in materiale composito e sinterizzato, che sono più aggressivi sulla ruota rispetto ai ceppi in ghisa, poiché una parte maggiore del calore generato passa nella ruota [3]. Questo studio si propone di analizzare il comportamento di diversi accoppiamenti di acciai per ruote ferroviarie e materiali per ceppi freno utilizzando test innovativi in scala ridotta nelle stesse condizioni e di studiare i meccanismi di danneggiamento che si verificano durante la frenatura a ceppi.

stresses may affect the material's microstructure in the contact zones and lead to development of thermo-mechanical fractures, which may result in extremely severe failure events or, in any case, shorten the lifespan of the wheel [2]. From the perspective of braking materials, the switch from cast iron, which had been the sole material used for many years, to sintered and composite brake block materials resulted in a range of performance benefits, but also in new issues. In fact, the introduction of materials capable of generating higher braking power and with poor heat dissipation properties resulted in an increased thermal energy flow on the wheel, leading to a more severe situation for the railway wheel [3]. Cast iron brake blocks are notorious for introducing high levels of tread roughness. These irregularities cause vibrations in the wheels and rails, which then cause noise to be emitted [4]. Hot spotting caused by thermomechanical contact between the brake blocks and the wheel tread is a major cause of wheel tread roughness. Cast iron brake blocks can transfer material to the hot spots on the wheel tread when they are used. VERNERSSON [5] made the first observation of this phenomenon with full-scale block braking testing. More recently, FACCOLI et al. [6][7] and MAZZÙ et al. [8][9] reproduced it with bi-disc tests. The authors observed that the phenomenon consists of brake block material deposition on the wheel disc contact surface and subsequent material detachment occurring cyclically. It is also important to note that the wear of the brake blocks and the removal of transferred material from the wheel surface both contribute to the high maintenance costs of cast iron brake blocks and the emissions of airborne particles [10][11]. Organic composite and sintered brake blocks reduce wheel tread roughness and noise levels, and they may even polish the tread [12]. Therefore, many efforts have been made to assess the possibility of replacing cast iron brake blocks with blocks made of composite or sintered materials. There are a lot of things to consider. Compared to cast iron brake blocks, the cost of the material is higher; however, the material lasts longer. Furthermore, a braking system change is necessary to minimize thermal overheating of the wheels produced by composite and sintered brake blocks, which are more aggressive on the wheel than cast iron brake blocks, since a greater portion of the generated heat enters the wheel [3]. This study aims to investigate the behavior of different couplings of railway wheel steels and brake block materials using innovative small-scale tests under the same conditions and investigate the damage mechanisms that occur during shoe braking.

2. Experimental tests

2.1. Materials and methods

The wheel steels tested are HYPERLOS®, ER-TEN and SUPERLOS®, supplied by Lucchini RS. HYPERLOS® is an upgraded type EN ER7 steel, used in freight cars or passenger trains in Europe and permitted by the technical specification UIC 812-3 for shoe-braked wheels. HYPERLOS® steel

2. Prove sperimentali

2.1. Materiali e metodi

Gli acciai per ruote testati sono HYPERLOS®, ER-TEN e SUPERLOS®, forniti da Lucchini RS. HYPERLOS® è un acciaio di tipo EN ER7 migliorato, utilizzato nei vagoni merci o nei treni passeggeri in Europa e consentito dalla specifica tecnica UIC 812-3 per le ruote frenate a ceppi. L'acciaio HYPERLOS® presenta una calibrazione analitica migliorata rispetto all'acciaio EN ER7 per una migliore combinazione di resistenza e tenacità, nonché trattamenti termici progettati per ottenere una microstruttura prevalentemente perlittica e quindi valori più elevati di tenacità alla frattura [1]. L'ER-TEN deriva dall'acciaio Classe B AAR e dagli acciai J.Q3S/J.Q3R JIS, molto diffusi rispettivamente negli Stati Uniti per il trasporto di massa ed in Giappone per l'alta velocità. A causa del maggiore contenuto di carbonio, l'ER-TEN presenta una microstruttura prevalentemente perlittica dopo il trattamento termico di tempra differenziale; ciò consente una maggiore resistenza all'usura e alla RCF. Il SUPERLOS® è un acciaio al carbonio al silicio e manganese con una microstruttura prevalentemente perlittica. Garantisce un'elevata resistenza all'usura e alla RCF. Dopo un periodo di monitoraggio in servizio, il SUPERLOS® è stato approvato dalle normative ferroviarie BS 5892-3:1992+A2:2009 come RS8T ed EN 13262 come ERS8.

Questi acciai per ruote ferroviarie sono stati testati contro ghisa e materiale organico composito utilizzati per i ceppi freno e contro l'acciaio per rotaie R260. La composizione chimica e le proprietà meccaniche nominali degli acciai per ruote e rotaie sono riportate nella Tab. 1. Le proprietà di trazione sono state ottenute dal fornitore utilizzando campioni estratti dalla corona della ruota secondo la norma EN ISO 6892-1, mentre la durezza Brinell è stata misurata sulla sezione radiale della corona della ruota secondo la norma EN ISO 6506-1. La composizione chimica dei materiali dei ceppi dei freni è riportata nella Tab. 2.

I test sono stati eseguiti utilizzando una macchina innovativa in scala ridotta. Questa macchina, chiamata "macchina a 4 contatti" [13], è in grado di alternare sulla superficie di un provino di ruota contatti di tipo ceppo freno e contatti di tipo rotaia (vedi Fig. 1). Ciò consente di riprodurre il danneggiamento termico e meccanico combinato che si verifica su una ruota ferroviaria reale durante la frenata. Un disco di 120 mm prelevato dalla corona della ruota viene messo in rotazione con un motore elettrico che,

has an improved analytical calibration compared to EN ER7 steel for a better combination of strength and toughness, as well as heat treatment methods designed to achieve a predominantly perlitic microstructure and thus higher fracture toughness values [1]. ER-TEN is derived from CLASS B AAR steel and from J.Q3S/J.Q3R JIS steels, which are very common in USA for mass transit transportation and in Japan for high speed, respectively. Due to the higher carbon content, ER-TEN has a prevalently perlitic microstructure after rim-chilling heat treatment; this allows higher resistance to wear and RCF. SUPERLOS® is a Silicon and Manganese Carbon steel with peculiar perlitic microstructure. It provides high wear and RCF resistance. After a period of in-service monitoring, SUPERLOS® has been approved by specific railways, i.e. BS 5892-3:1992+A2:2009 as RS8T and EN 13262 as ERS8.

These railway wheel steels were tested against cast iron and organic composite brake block materials and R260 rail steel. The chemical composition and the nominal mechanical properties of the rail and wheel steels are shown in Tab. 1. The tensile properties were obtained by the supplier using specimens extracted from the wheel rim according to the EN ISO 6892-1 Standard, and the Brinell hardness was measured on the radial section of the wheel rim according to the EN ISO 6506-1 Standard. The chemical composition of the brake block materials is shown in Tab. 2.

The tests were carried out using an innovative small-scale machine. This machine, called "4-contact machine" [13], is capable of alternating brake block type and rail type contacts on the surface of a wheel specimen (see Fig. 1).

Tabella 1 – Table 1
Principali elementi chimici [wt%] e proprietà meccaniche degli acciai per ruote e rotaie
Main chemical elements [wt%] and mechanical properties of the wheel and rail steels

	HYPERLOS®	ER-TEN	SUPERLOS®	R260
Composizione chimica [wt%] <i>Chemical composition [wt%]</i>	C	0.51	0.64	0.52
	Mn	0.78	0.64	0.93
	Si	0.38	0.26	0.92
	S	0.002	0.002	0.002
	P	0.015	0.009	0.010
Carico di rottura [MPa] <i>Ultimate Tensile Strength [MPa]</i>		885	995	940
Resistenza allo snervamento [MPa] <i>Yield Strength [MPa]</i>		568	670	590
Allungamento [%] <i>Elongation [%]</i>		19	16	20
Durezza Brinell [HB] <i>Brinell Hardness [HB]</i>		280	320	300
				271

attraverso un riduttore, permette di regolare la velocità e la coppia erogata. Su questo campione, che rappresenta la ruota, vengono premuti altri quattro campioni, che rappresentano le rotaie e i ceppi freno. Prima di ogni prova, il campione di ruota e il campione di ceppo freno sono stati puliti in una vaschetta ad ultrasuoni con etanolo e asciugati con aria calda per rimuovere grasso e altre impurità, quindi sono stati pesati con una risoluzione di 0,1 g. Sono state effettuate tre misurazioni per ogni campione e poi è stata calcolata la media. I test sono stati eseguiti a 25°C e sono durati circa 5 minuti ciascuno. Sono state applicate le seguenti condizioni:

- 600 MPa di pressione di contatto tra i campioni di ruota e rotaia [14];
- 1 MPa di pressione di contatto tra i provini ceppo freno e ruota [15];
- 1 kW di potenza termica dissipata sul provino della ruota, in conformità alla norma UIC 510-5.

Al termine di ogni prova, sia il campione di ruota che quelli di ceppi freno sono stati puliti con la procedura precedentemente descritta ed è stata misurata la perdita di peso. La superficie del campione di ruota è stata attentamente esaminata e documentata al microscopio per individuare l'area più rappresentativa del danneggiamento. Una volta identificata, il disco è stato tagliato lungo la sezione longitudinale al centro del disco in modo da ricavare un campione che avesse dimensioni adeguate a essere maneggiato al microscopio. Quindi, questa sezione trasversale è stata rettificata, lucidata meccanicamente fino a una finitura di 1 μm e sulla zona lucidata è stato effettuato un attacco chimico usando una soluzione di Nital al 2% (nello specifico alcol etilico assoluto al 98% + acido nitrico al 2%) per circa 15 secondi così da poter osservare la microstruttura del campione e la deformazione plastica. Particolare attenzione è stata rivolta alla comprensione degli strati alterati presenti sotto la superficie nell'area di contatto del campione di ruota. Le misure della profondi-

Tabella 2 – Table 2

Principali elementi chimici [wt%] dei materiali dei ceppi freno

Main chemical elements [wt%] of the brake block materials

	Ghisa Cast Iron	Composito organico Organic composite material
C	3.23	35.16
Mn	0.69	1.28
Si	1.57	4.72
S	0093	4.223
P	1.632	0.126
Fe	92.20	17.383
Cr	0.156	0.196
Cu	0.136	0.155
Al	0.052	6.902

This makes it possible to reproduce the combined thermal and mechanical damage that occurs on a real railway wheel during braking. A 120 mm disc taken from the wheel rim is put in rotation with an electric motor which, through a gearbox, makes it possible to regulate the speed and the torque supplied. On this specimen, which represents the wheel, four other specimens, representing the rails and the brakes, are pressed. Before each test, the wheel sample and the brake block samples were cleaned ultrasonically with ethanol and dried with warm air to remove grease and other impurities and then weighed with a resolution of 0.1 g. Three measurements for each sample were taken and then averaged. The tests were carried out at 25°C and lasted about 5 minutes each. The following conditions were applied:

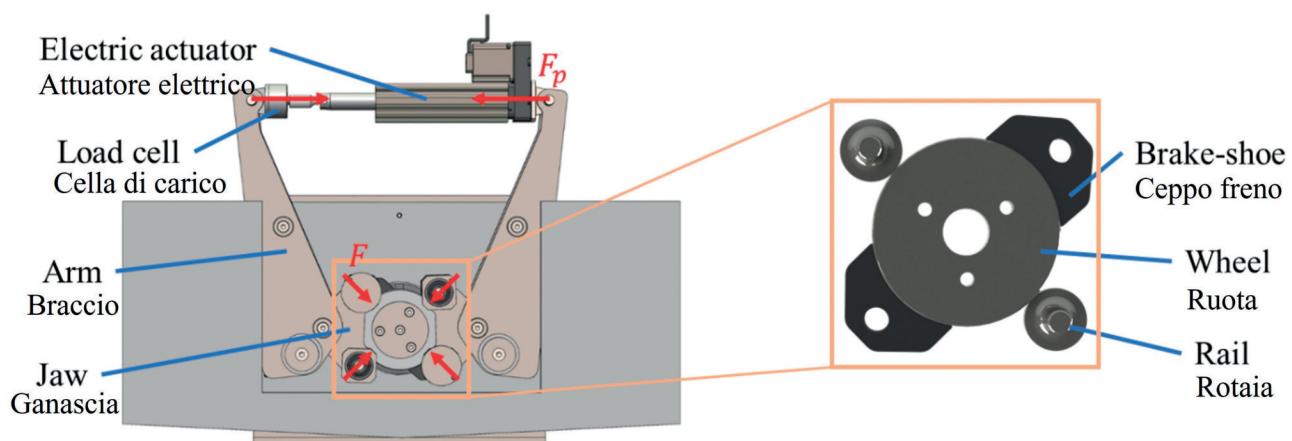


Figura 1 – Schema della macchina a 4 contatti.
Figure 1 – Schematic of the 4-contact machine.

tà dei diversi strati osservati sono state effettuate in tre aree prese a uguale distanza dalla superficie del provino per ogni ruota campione, e il valore medio è stato calcolato. Prove di durezza Vickers con un carico di 500 g e un tempo di permanenza di 15 s sono state eseguite sulla sezione trasversale dei campioni di ruota secondo la norma ASTM E384-17 per studiare la capacità di incrudoimento dell'acciaio. Sono state effettuate tre misurazioni e calcolate le medie in tutte le diverse aree osservate.

2.2. Risultati sperimentali

La Fig. 2 mostra la superficie della pista di rotolamento dei campioni di ruota testati con campioni di ceppi in ghisa e in materiale composito. La riga superiore mostra la superficie di rotolamento dei campioni di ruota testati con i campioni in ghisa, rivelando una superficie fortemente alterata e rugosa. La riga inferiore mostra la superficie di rotolamento dei campioni di ruota testati con i campioni in materiale composito, rivelando una superficie più liscia e lucida.

La Fig. 3 mostra la perdita di peso misurata sui campioni di ruota e di ceppo freno per ogni accoppiamento di materiale ruota-freno. I campioni in HYPERLOS®, essendo quelli in acciaio più tenero, hanno presentato la maggiore perdita di peso, mentre i campioni in ER-TEN hanno avuto la minore perdita di peso, grazie alla maggiore durezza del materiale. Per quanto riguarda i ceppi freno, quelli in ghisa hanno mostrato una maggiore usura per ogni singolo accoppiamento rispetto a quelli in materiale composito. Infine, i campioni in SUPERLOS® hanno mo-

- 600 MPa contact pressure between wheel and rail specimens [14];
- 1 MPa contact pressure between brake shoe and wheel specimens [15];
- 1 kW thermal power dissipated on the wheel specimen, in accordance with UIC 510-5 Standard.

At the end of each test, both the wheel disc and the brake blocks samples were cleaned using the procedure previously described and the weight loss was measured. The surface of the wheel sample was carefully examined and documented under the magnifier to find the area most representative of the damage. Once identified, it was cut along the longitudinal section at the middle of the disc so that it had adequate size to be handled under the microscope. Then, this cross-section was ground, mechanically polished to a 1 m finish and a chemical etching was carried out on the polished area through a 2% Nital solution (specifically 98% absolute ethyl alcohol + 2% nitric acid) for about 15 seconds to observe the microstructure of the sample and the plastic deformation. Particular attention was paid to understand the altered layers under the contact surface in the contact area of the wheel specimen. Measurements of the depth of the different observed layers were made in three areas taken at equal distance from the sample surface for each sample wheel, and the average value was calculated. Vickers hardness tests with a load of 500 g and dwell time of 15 s were performed on the cross-section of the wheel specimens according to ASTM E384-17 to investigate the steel work-hardening. Three measurements were taken and averaged in all different areas observed.

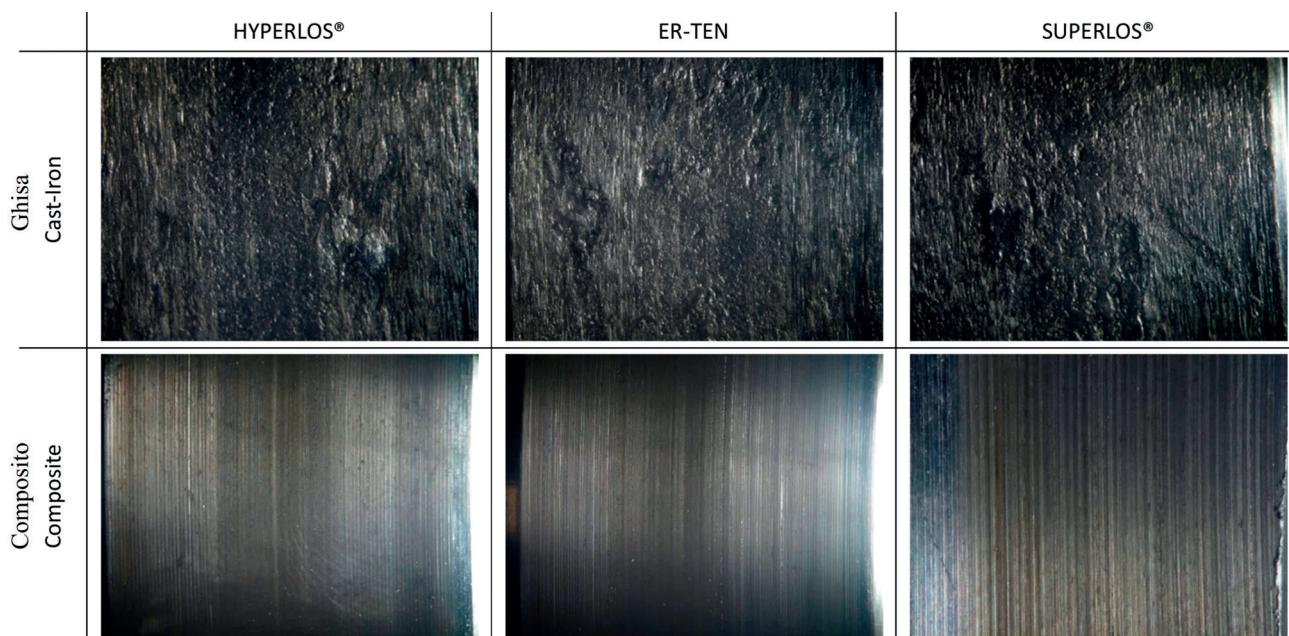


Figura 2 – Confronto tra le superfici dei campioni di ruota dopo il test.
Figure 2 – Comparison of the Wheel surface at the end of the test.

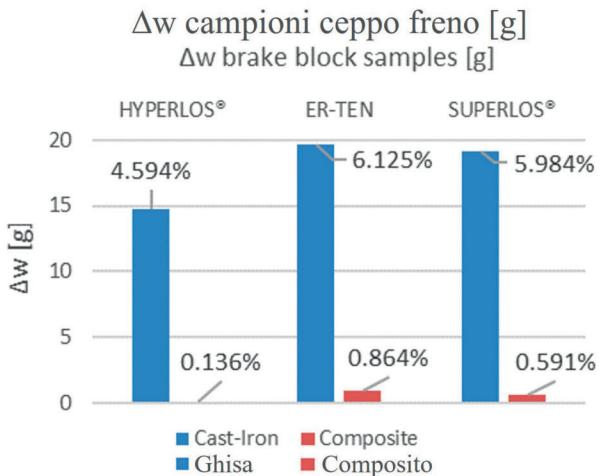
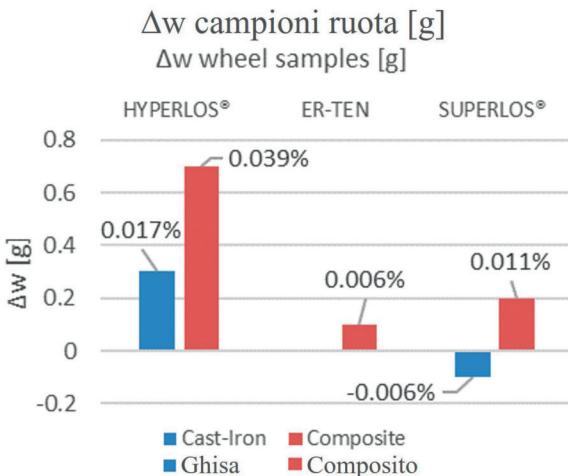


Figura 3 – Perdita di peso media dei campioni di ruote e ceppi freno e percentuale sul peso dei campioni nuovi.
Figure 3 – Average weight loss of the wheel and brake block samples and percentage on new sample weight.

strato comportamenti opposti: con la ghisa hanno guadagnato peso, mentre con il composito lo hanno perso.

Sono stati osservati i seguenti strati alterati sotto la superficie di contatto del provino della ruota, in alcuni casi composti da due parti (Fig. 4):

- il materiale di riporto proveniente dal blocco freno con microstruttura martensitica, chiamato “*Thermal White Etching Layer*” (T-WEL);
- lo strato deformato plasticamente, dovuto a carichi ciclici e *ratcheting*.

Tutti i campioni di ruota accoppiati con i campioni in ghisa hanno formato T-WEL, mentre quelli accoppiati con i campioni in composito non hanno registrato alcuna formazione di T-WEL. Inoltre, per quanto riguarda lo strato plasticamente alterato, i campioni di ruota accoppiati con ceppi freno in ghisa hanno mostrato uno spessore maggiore rispetto a quelli accoppiati con ceppi freno in composito. L'acciaio per ruote che ha mostrato la maggiore plasticizzazione con i ceppi in ghisa è stato l'HYPERLOS®, mentre con i ceppi in composito ha mostrato, anche se di poco, la minore plasticizzazione, probabilmente a causa di una maggiore usura rispetto agli altri acciai testati con i ceppi in composito. L'acciaio per ruote che ha mostrato la minore plasticizzazione con i campioni in ghisa è il SUPERLOS®, nonostante sia anche quello che ha mostrato la maggiore formazione di T-WEL con lo stesso accoppiamento. Questi risultati sono riassunti nella Fig. 5, dove vengono mostrati e confrontati il T-WEL e lo spessore dello strato plasticizzato dei dischi ruota dopo il test con diversi ceppi freno. I campioni di ruota accoppiati con campioni in materiale composito hanno mostrato un sottilissimo strato di ossidazione formatosi sulla superficie del disco, meglio visibile sul campione di ruota ER-TEN. La Tab. 3 mostra i valori di microdurezza Vickers dello strato di T-WEL (dove presente) e del materiale non deformato osservati nei campioni di ruote. La microdurezza misurata nella T-WEL è più del doppio di quella del

2.2. Experimental results

Fig. 2 displays the surface of the rolling track of wheel samples tested with cast iron and composite specimens. The top row shows the surface of the rolling track of the wheel samples tested with cast iron specimens, revealing a heavily altered and rough surface. The bottom row displays the surface of the rolling track of the wheel samples tested with composite specimens, revealing a smoother and shinier surface.

Fig. 3 shows the weight loss measured on the wheel and the brake block samples for each wheel-brake material coupling. HYPERLOS® specimens, being the softest steel, had the greatest weight loss, while ER-TEN specimens had the least weight loss, thanks to the highest hardness of the material. Regarding the brake block specimens, cast iron blocks showed significantly higher wear per coupling than composite ones. SUPERLOS® showed opposite behaviors: with cast iron it gained weight, while with composite it lost it.

The following altered layers, in some cases consisting of 2 parts, were observed under the contact surface of the wheel specimen (Fig. 4):

- *the carry-over material derived from the brake block with a martensitic microstructure, called “Thermal White Etching Layer” (T-WEL);*
- *the plastically deformed layer, due to cyclic loads and ratcheting.*

All wheel specimens coupled with cast iron brake block specimens formed T-WEL, while those coupled with composite brake blocks reported no T-WEL formation. Also, for the plastically altered layer, wheel specimens coupled with cast iron brake blocks showed greater thickness than those coupled with composite brake blocks. The wheel steel that showed the most plasticization with cast iron brake blocks was HYPERLOS®, while with composite brake blocks it

materiale non deformato, ciò fa concludere che l'acciaio sia andato incontro ad una trasformazione martensitica.

3. Discussione

L'usura osservata nei dischi di ruota è dovuta a un effetto complesso, originato dall'interazione di diversi corpi e meccanismi di danneggiamento. Il fenomeno è causato dalla sovrapposizione di due effetti: l'usura dovuta al contatto ruota-rotaia e quella relativa al contatto ruota-freno. I principali meccanismi di danneggiamento nel contatto

showed, albeit slightly, the least plasticization, probably due to a higher wear when compared with other steels tested with composite brake. The wheel steel that showed the least plasticization with cast iron blocks is SUPER-LOS®, despite also being the one that showed the greatest T-WEL formation with the same coupling. These results are summarized in Fig. 5, where T-WEL and plasticized layer thickness of the wheel discs after testing with various brake blocks are shown and can be compared. Wheel samples coupled with composite brake block showed a very thin layer of oxidation formed on the surface of the

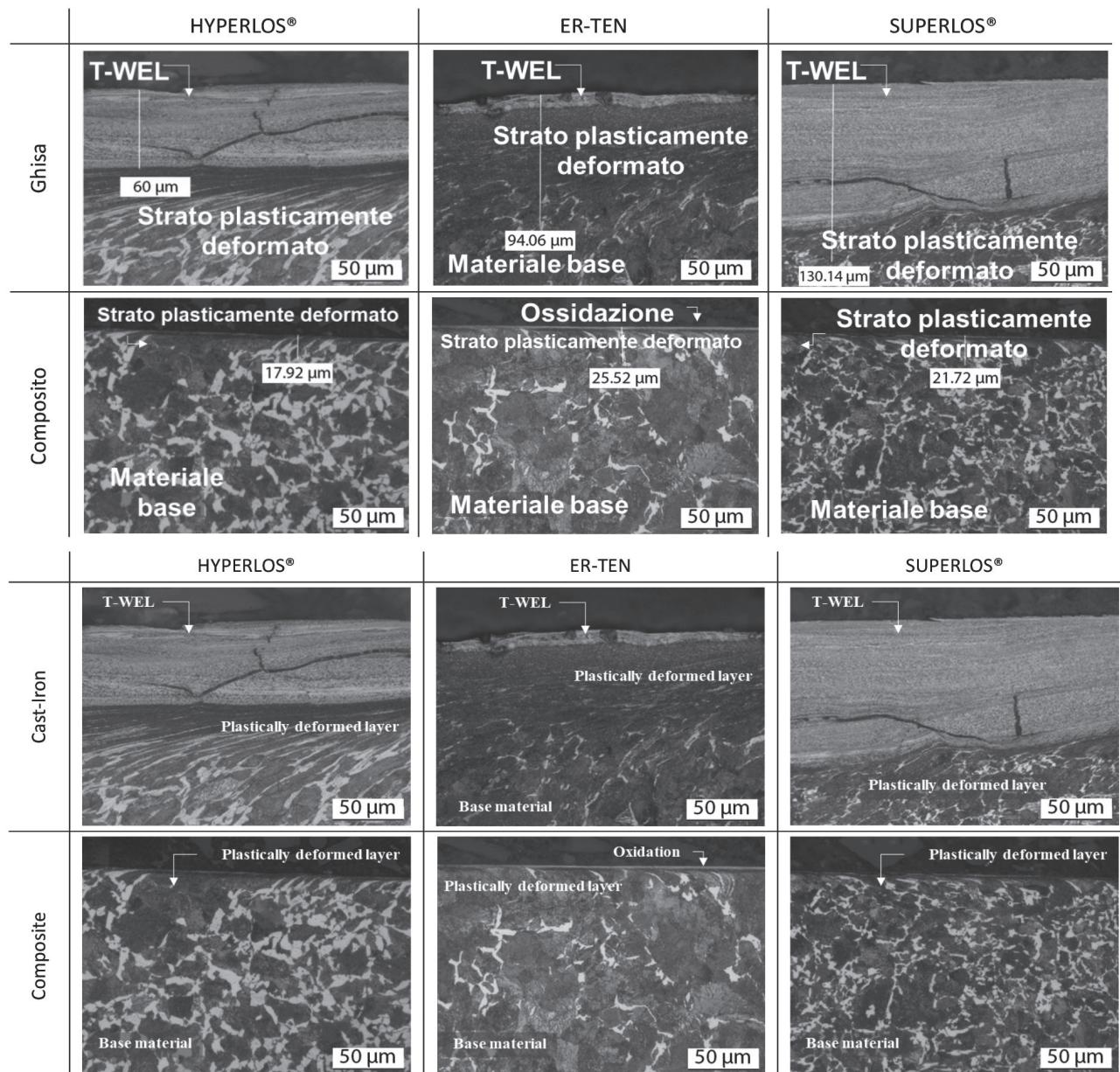


Figura 4 – Aspetto microstrutturale delle sezioni trasversali dei campioni di ruota dopo le prove.
Figure 4 – Microstructural appearance of the wheel specimen cross-sections after tests.

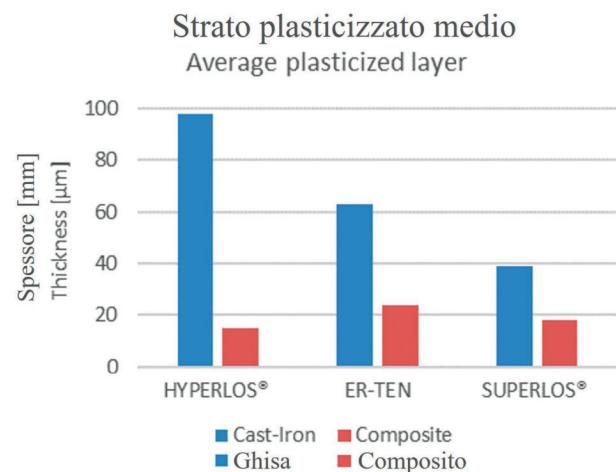
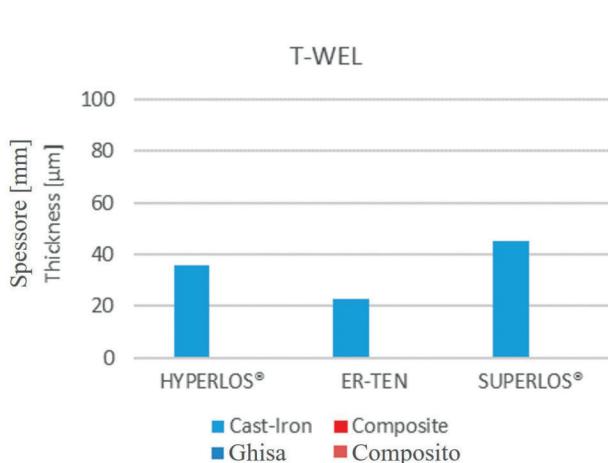


Figura 5 – T-WEL e spessore dello strato plasticizzato dei dischi di ruota.
Figure 5 – T-WEL and plasticized layer thickness of the wheel discs.

ruota-rotaia sono l'usura e la fatica da contatto ciclico (RCF). Negli acciai per ruote ferroviarie, la cui microstruttura è prevalentemente perlitica, l'usura è generalmente inversamente proporzionale alla durezza [16]. Pertanto, si può ipotizzare che l'usura causata dall'interazione con i campioni di rotaia sui campioni di ruota in HYPERLOS® sia maggiore, mentre sui campioni ER-TEN sia minore (essendo il primo acciaio meno duro del secondo). Per quanto riguarda il contatto ruota-freno, i meccanismi di danneggiamento sono più complessi. La pista di rotolamento del campione di ruota subisce un ciclo termico caratterizzato dal riscaldamento dovuto all'attrito con il campione di ceppo freno e dal raffreddamento dovuto al contatto con il campione di rotaia. Inoltre, nella prova con i ceppi freno in ghisa è presente il fenomeno del riporto di materiale dai ceppi freno al disco ruota.

Come mostrato nella Fig. 2, il ceppo freno in materiale composito è risultato meno invasivo, producendo una superficie più liscia e lucidando la superficie di rotolamento della ruota [12]; al contrario, il ceppo freno in ghisa ha causato una significativa rugosità superficiale. Si tratta di

disc, which can be better seen on the ER-TEN wheel sample. Tab. 3 shows the Vickers microhardness values of T-WEL (where possible) and undeformed material in the wheel samples. The microhardness measured in T-WEL is more than twice the hardness of the undeformed material and is in agreement with a martensitic transformation of the steel.

3. Discussion

The wear observed in the wheel discs is due to a complex effect, originating from the interaction of different bodies and damage mechanisms. The phenomenon is caused by the superposition of two effects: the wear due to the wheel-rail contact and the wear related to the wheel-brake contact. The main mechanisms of damage in the wheel-rail contact are wear and rolling contact fatigue (RCF). For railway wheel steels, whose structure is prevalently pearlitic, wear is generally inversely proportional to hardness [16]. Therefore, it can be assumed that the wear caused by interaction with the rail samples is the greatest on wheel specimens in the

Tabella 3 – Table 3

Valori di microdurezza in T-WEL e nel materiale non deformato dei campioni ruota
Microhardness values in T-WEL and undeformed material of the wheel samples

[HV 500g]	HYPERLOS®		ER-TEN		SUPERLOS®	
	Materiale non alterato <i>Undeformed steel</i>	T-WEL	Materiale non alterato <i>Undeformed steel</i>	T-WEL	Materiale non alterato <i>Undeformed steel</i>	T-WEL
Ghisa <i>Cast-iron</i>	247	659	279	674	263	696
Composito <i>Composite</i>	255	n.a.	281	n.a.	271	n.a.

un fenomeno ben documentato [5], che la macchina a 4 contatti è stata in grado di riprodurre e dimostrare.

Inoltre, i danneggiamenti osservati nel campione di ruota sono di entità comparabile a quelli osservati in una ruota reale alla fine della sua vita, come mostrato in Fig. 6. Questa osservazione sottolinea l'accuratezza e l'affidabilità dei metodi di prova *small-scale* utilizzati in questo studio. La comparabilità dei danneggiamenti e della loro gravità tra il campione di ruota e la ruota reale dimostra che la metodologia di prova e i parametri scelti sono stati efficaci nella simulazione del complesso meccanismo di danneggiamento che le ruote reali subiscono nel corso della loro vita operativa. L'approccio di prova scelto riproduce efficacemente i processi ai quali le ruote sono sottoposte durante lunghi periodi di utilizzo, poiché i danni risultanti raggiungono un alto grado di somiglianza in un periodo di tempo relativamente breve, appena cinque minuti.

HYPERLOS®, while on it is the least the ER-TEN specimens (due to the lower hardness of the former compared to the latter). As for the wheel-brake contact, the damage mechanisms are more complex. The wheel specimen tread experiences a thermal cycle characterized by the heating due to friction with the brake block specimen and by the cooling due to the rail specimen chilling. In addition, in the test with cast iron specimens the phenomenon of material carryover from the brake block specimens to the wheel disc is present.

As shown in Fig. 2, the composite-material appeared less intrusive, producing a smoother surface and polishing the thread of the wheel specimen [12]. By contrast, the cast iron caused significant surface roughness. This is a well-documented phenomenon [5], and the 4-contact machine was able to reproduce and demonstrate it.

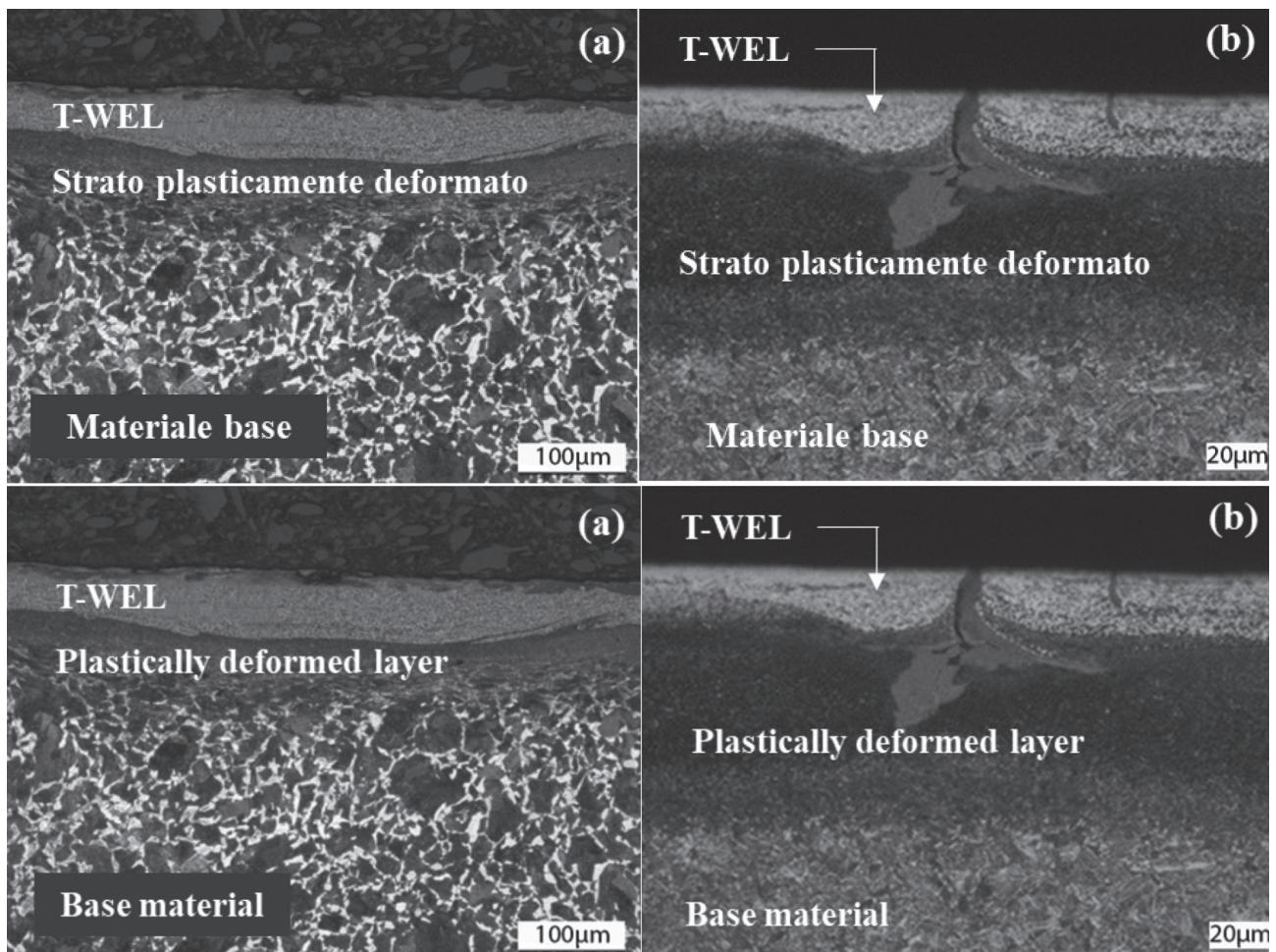


Figura 6 – Confronto delle sezioni trasversali di un campione di ruota (a) testato contro un campione di ghisa con una ruota reale (b) frenata con un freno in ghisa a fine vita.

Figure 6 – Comparison of the cross-sections of a wheel specimen (a) tested against a cast iron specimen with a real wheel (b) braked with cast iron brake at the end of its life.

La Fig. 3 mostra che la maggiore usura dei campioni di ruota è dovuta ai ceppi in materiale composito, come atteso [3]. È interessante notare che l'usura dei campioni di ruota testati con ceppi in ghisa ha mostrato risultati contrastanti, in cui si è verificata un'usura lieve, nessuna usura o, addirittura, un aumento di peso. Questo comportamento è strettamente correlato al T-WEL che si può osservare in Fig. 5.

Nei campioni di ruota testati con ceppi freno in ghisa si nota un T-WEL elevato. In particolare, il T-WEL mostrato è materiale di riporto dai ceppi freno in ghisa che si è indurito e trasformato in martensite, come testimoniato dalla durezza (Tab. 3). Lo sviluppo di questo strato provoca una notevole deformazione, plasticizzando ulteriormente il materiale della ruota sottostante. Questo fenomeno non solo provoca un aumento del peso del disco ruota, ma contribuisce anche ad un'elevata rugosità della superficie di contatto del campione di ruota e quindi alla generazione di rumore. Dalle micrografie della Fig. 4 è evidente che i ceppi freno in materiale composito non causano il riporto di materiale sulla ruota. Tuttavia, i campioni di ruota presentano uno strato superficiale osidato.

La Tab. 3 mostra che il T-WEL formatosi sulla superficie dei campioni di ruota, quando presente, ha valori di microdurezza più che doppi rispetto al materiale di base. Questa microstruttura molto dura e fragile può causare l'innescio di cricche superficiali sul provino della ruota, in fase di contatto con la rotaia, che possono propagarsi e provocare il distacco di piccoli pezzi di materiale, come documentato in precedenti test bi-disc condotti dagli Autori [8]. Per evitare la rottura fragile della ruota, è essenziale prendere in considerazione la tenacità alla frattura per la progettazione del materiale della ruota, oltre ai parametri descritti in questo lavoro.

Dal punto di vista dei ceppi freno, si nota chiaramente una minore usura sui campioni freno in composito, un risultato coerente con la letteratura [10], che li rende più ecologici grazie a una minore emissione di particelle. Inoltre, quanto più duri sono gli acciai delle ruote su cui sono stati testati, tanto maggiore è stata l'usura, sia per la ghisa che per il composito.

4. Conclusioni

Per studiare il comportamento di tre acciai per ruote ferroviarie (HYPERLOS®, ER-TEN e SUPERLOS®) accoppiati a due materiali per ceppi frenanti (ghisa e composito organico) e ad un acciaio per rotaia (R260) è stato utilizzato un innovativo banco di prova in scala ridotta, chiamato macchina a 4 contatti. Questo banco prova è in grado di alternare contatti di tipo freno e di tipo rotaia sulla superficie di un provino di ruota e permette di riprodurre il danneggiamento termico e meccanico combinato che si verifica su una ruota ferroviaria reale durante la frenata. Il danneggiamento dei provini è stato investigato per ogni

Furthermore, the damages seen in the wheel sample are of comparable magnitude to those seen in a full-sized wheel at the end of its life, as shown in Fig. 6. This observation emphasizes the accuracy and reliability of the small-scale testing methods used in the present study. The comparability of the damage patterns and severity between the wheel sample and the real wheel shows that the testing methodology and parameters were successful in simulating the complex damage mechanism that full-sized wheels experience throughout the course of their operational lifetime. The chosen testing approach effectively reproduces the processes that wheels undergo over long periods of application since the resulting damages achieve a high degree of similarity in a relatively short amount of time—just five minutes.

Fig. 3 shows that the greatest wear of the wheel specimens was due to the composite block material, as expected [3]. Interestingly, the wear of wheel specimens tested with cast iron brake blocks showed mixed results, in which there was a little wear, no wear or, even, an increase in weight. This behavior is closely related to the T-WEL that can be seen in Fig. 5.

A high T-WEL can be noticed on the wheel samples tested with cast iron brake blocks. In particular, the T-WEL shown is carryover material from the cast iron specimens that has been hardened and turned into martensite, as can be seen from the hardness (Tab. 3). This layer's development causes considerable deformation by further plasticizing the underlying wheel material. This phenomenon not only causes an increase in the wheel disc's weight, but also contributes to high roughness on the wheel sample contact surface and thus to the generation of noise. It is clear from the micrographs in Fig. 4 that the composite brake blocks do not cause material carryover on the wheel. However, the wheel samples produce an oxidized surface layer.

Tab. 3 showed that the T-WEL formed on the surface of the wheel specimens, where present, had microhardness values of more than twice that of the base material. This very hard and brittle microstructure can cause the initiation of surface cracks on the wheel specimen, during contact with rail, which can propagate and result in the detachment of small pieces of material, as documented in previous bi-disc tests carried out by the Authors [8]. In order to avoid a brittle fracture of the wheel, it is essential to take fracture toughness into consideration for wheel material design, in addition to the parameters described in this paper.

From the perspective of brake blocks, less wear can clearly be seen on the composite brake samples, this result is coherent with the literature [10], making them friendlier for the environment thanks to a decreased particle emission. Furthermore, the harder the wheel steels on which they were tested, the higher the wear was, for both cast iron and composite.

accoppiamento di materiale dopo prove comparative di breve durata (5 minuti) nelle stesse condizioni. I meccanismi di danneggiamento riscontrati sono coerenti con quelli reali, riuscendo ad evidenziare bene la diversa natura dei 3 tipi di acciaio studiati.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

- lo strato di T-WEL è stato osservato solo sui campioni di ruota testati contro i ceppi freno in ghisa ed è stato identificato come materiale di riporto trasferito dai campioni di ceppo;
- lo strato di materiale plasticizzato presente nei campioni di ruota è risultato maggiore sui campioni testati contro la ghisa, in quanto lo sviluppo del T-WEL provoca una notevole deformazione plasticizzando ulteriormente il materiale di ruota sottostante;
- è stata rilevata una maggiore usura sui campioni in ghisa rispetto a quelli in materiale composito, confermando questi ultimi come più ecologici;
- l'usura dei campioni di ceppo freno è stata tanto più elevata quanto più duri erano gli acciai delle ruote contro i quali sono stati testati, sia per la ghisa che per il materiale composito.

È importante notare che, per la progettazione dei materiali delle ruote, è essenziale prendere in considerazione la tenacità alla frattura, oltre ai parametri descritti in questo documento, al fine di evitare la frattura fragile della ruota. Gli aspetti relativi alla formazione del T-WEL sulla ruota e alla sua evoluzione nel tempo devono essere ulteriormente studiati; si tratta di un fenomeno piuttosto complesso, poiché dipende dalle velocità di riscaldamento e raffreddamento coinvolte. I test dovrebbero essere eseguiti studiando la formazione e l'evoluzione del T-WEL in diverse fasi temporali e ricavando una curva caratteristica completa nel tempo per ogni accoppiamento di ruota e materiale del ceppo del freno. Questi aspetti saranno oggetto di studi futuri con la macchina a 4 contatti.

Per questo motivo, recentemente sono stati apportati significativi aggiornamenti alla macchina a 4 contatti. In particolare, la macchina è stata dotata di vari sensori che consentono di raccogliere grandi quantità di dati durante le prove, fornendo una maggiore comprensione degli eventi che si verificano durante il processo. I sensori comprendono un misuratore di coppia sull'albero di trasmissione, che consente di misurare la rotazione del campione di ruota e di calcolare il coefficiente di attrito, nonché un encoder sull'albero di trasmissione per misurarne la velocità. Inoltre, è stata aggiunta una termocoppia a contatto strisciante per misurare la temperatura della superficie di rotolamento del campione di ruota e una termocoppia per misurare la temperatura del campione di ceppo freno. Per garantire prove uniformi e affidabili, sono stati compiuti notevoli sforzi per automatizzare il processo di prova, compreso lo sviluppo di un software per raccogliere i dati dai sensori e azionare gli

4. Conclusions

The behavior of three railway wheel steels (HYPER-LOS®, ER-TEN, and SUPERLOS®) coupled with two brake block materials (cast iron and organic composite) and R260 steel rail was studied by means of an innovative small-scale test bench, called 4-contact machine. This test bench is capable of alternating brake block type and rail type contacts on the surface of a wheel specimen and makes it possible to reproduce the combined thermal and mechanical damage that occurs on a real railway wheel during braking. The damage of the specimens was evaluated for each material coupling after comparative tests of short duration (5 min) under the same conditions. The detected damage mechanisms are consistent with the real ones, managing to highlight well the different nature of the 3 steel grades studied. The following results were obtained:

- *T-WEL was recorded only on wheel specimens tested against cast iron specimens as carryover material;*
- *the plasticized layer on the wheel samples was also found to be higher on wheel tested against cast-iron, as T-WEL development causes considerable deformation by further plasticizing the underlying wheel material;*
- *greater wear was detected on the cast iron specimens than on composite ones, making the latter friendlier for the environment;*
- *brake block specimens' wear was higher the harder the wheel steels against which they were tested, for both cast iron and composite material.*

It is important to note that, for wheel material design, it is essential to take fracture toughness into consideration, in addition to the parameters described in this paper, in order to avoid brittle fracture of the wheel. The aspects concerning the formation of T-WEL on the wheel and its evolution over time have to be further investigated; it is quite complex, since it depends on heating and cooling rates. Tests should be done by studying the T-WEL formation and evolution at different time steps and deriving a complete characteristic curve over time for each coupling of wheel and brake block material. These aspects will be the subject of future studies with the 4-contact machine.

For this reason, recently significant upgrades have been made to the 4-contact machine. Specifically, the machine has been equipped with various sensors that allow for the collection of large amounts of data during testing, providing greater insight into the events that occur during the process. The sensors include a torque meter on the transmission shaft, which enables the rotation of the wheel specimen to be measured and the coefficient of friction to be calculated, as well as an encoder on the drive shaft to measure its speed. In addition, a sliding contact thermocouple has been added to measure the temperature of the rolling surface of the wheel sample, and a thermocouple to measure the temperature of the brake block specimen. To ensure consistent and reliable testing, significant efforts

attuatori della macchina. Inoltre, per mantenere costanti le condizioni di prova, è stato installato un controllore proporzionale-integrale-derivativo (PID) per controllare la velocità della macchina, assicurando che rimanga costante anche quando vengono azionati i freni. Questi miglioramenti offrono un ambiente di prova più affidabile e preciso, consentendo di comprendere meglio il complesso fenomeno dei danneggiamenti termo-meccanici su una ruota frenata a ceppi. I metodi di prova aggiornati e l'avanzato allestimento sperimentale non solo hanno migliorato la nostra comprensione degli effetti sui materiali e sulle combinazioni attuali, ma forniscono anche un quadro verificato per future ricerche su materiali alternativi e le loro combinazioni. Ora è possibile espandere la ricerca per esaminare materiali alternativi, valutare le prestazioni e ottenere informazioni dettagliate sulle loro potenziali applicazioni nei sistemi di ruote frenate a ceppi utilizzando i comprovati metodi di prova e l'allestimento sperimentale.

Ringraziamenti

Questo studio è stato finanziato da Lucchini RS. Si ringraziano Michele NODARI, Ivan MELONI e il personale del reparto di metallurgia per aver messo a disposizione i laboratori e le loro competenze.

have been made to automate the testing process, including the development of software to collect data from the sensors and operate the machine actuators. Furthermore, to maintain consistent test conditions, a proportional-integral-derivative (PID) controller has been installed to control the speed of the machine, ensuring that it remains constant even when brakes are applied. These improvements offer a more reliable and precise testing environment, allowing us to understand the intricate phenomenon of thermal-mechanical damages on a tread-braked wheel. The upgraded test methods and advanced bench setup not only improved our understanding of the effects on present materials and combinations, but also provide a verified framework for future research into alternative materials and their combinations. It is now possible to expand the research to evaluate alternative materials, assess their performance, and acquire insightful information about their prospective uses in tread-braked wheel systems by utilizing the proven test methods and bench.

Acknowledgment

This study was funded by Lucchini RS. We thank Michele NODARI, Ivan MELONI, and the staff of the metallurgy department for providing the laboratories and their expertise.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] M. FACCOLI, A. GHIDINI, A. MAZZÙ (2018), “*Experimental and Numerical Investigation of the Thermal Effects on Railway Wheels for Shoe-Braked High-Speed Train Applications*”, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 49, no. 10, pp. 4544-4554, doi: 10.1007/s11661-018-4749-2.
- [2] M. FACCOLI, A. GHIDINI, A. MAZZÙ (2019), “*Changes in the Microstructure and Mechanical Properties of Railway Wheel Steels as a Result of the Thermal Load Caused by Shoe Braking*”, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 50, no. 4, pp. 1701-1714, doi: 10.1007/s11661-019-05135-x.
- [3] C. FERRER, M. PASCUAL, D. BUSQUETS, E. RAYÓN (2019), “*Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique*”, Wear, vol. 268, no. 5-6, pp. 784-789, Feb., doi: 10.1016/J.WEAR.2009.12.014.
- [4] M. FACCOLI, N. ZANI, A. GHIDINI, C. PETROGALLI (2021), “*Tribological Behavior of Two High Performance Railway Wheel Steels Paired with a Brake Block Cast Iron*”, Tribology Transactions, pp. 1-12, Nov., doi: 10.1080/10402004.2021.2011997.
- [5] T. VERNERSSON (1999), “*Thermally induced roughness of tread-braked railway wheels: Part 1: brake rig experiments*”, Wear, vol. 236, no. 1-2, pp. 96-105, Dec., doi: 10.1016/S0043-1648(99)00260-4.
- [6] M. FACCOLI, L. PROVEZZA, C. PETROGALLI, A. GHIDINI, A. MAZZÙ (2019), “*Effects of full-stops on shoe-braked railway wheel wear damage*,” Wear, vol. 428-429, pp. 64-75, Jun., doi: 10.1016/J.WEAR.2019.03.006.
- [7] M. FACCOLI, L. PROVEZZA, C. PETROGALLI, A. GHIDINI, A. MAZZÙ (2020), “*A Small-Scale Experimental Study of the Damage Due to Intermittent Shoe Braking on the Tread of High-Speed Train Wheels*”, Tribology Transactions, vol. 63, no. 6, pp. 1041-1050, Nov., doi: 10.1080/10402004.2020.1787568.
- [8] A. MAZZÙ, L. PROVEZZA, N. ZANI, C. PETROGALLI, A. GHIDINI, M. FACCOLI (2019), “*Effect of shoe braking on wear and fatigue damage of various railway wheel steels for high speed applications*”, Wear, vol. 434-435, p. 203005, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.WEAR.203005.
- [9] A. MAZZÙ, A. GHIDINI, L. PROVEZZA, C. PETROGALLI, M. FACCOLI (2019), “*Study of the damage induced by thermomechanical load in ER7 tread braked railway wheels*”, Procedia Structural Integrity, vol. 18, pp. 170-182, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROSTR..08.151.

SCIENZA E TECNICA

- [10] B.D. GARG, S.H. CADLE, P.A. MULAWA, P.J. GROBLICKI, C. LAROO, G.A. PARR (2000), "Brake Wear Particulate Matter Emissions", Environ Sci Technol, vol. 34, no. 21, pp. 4463-4469, Nov., doi: 10.1021/es001108h.
- [11] G. PERRICONE, M. ALEMANI, I. METİNÖZ, V. MATJKA, J. WAHLSTRÖM, U. OLOFSSON (2016), "Towards the ranking of airborne particle emissions from car brakes – a system approach", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 231, no. 6, pp. 781-797, Aug., doi: 10.1177/0954407016662800.
- [12] R. LEWIS, U. OLOFSSON (2009), "Basic tribology of the wheel–rail contact", Wheel-Rail Interface Handbook, pp. 34-57, Jan., doi: 10.1533/9781845696788.1.34.
- [13] L. GHIDINI, M. FACCOLI, N. ZANI, C. PETROGALLI, S. BONOMETTI, A. MAZZÙ (2023), "An innovative small-scale testing procedure to study damage in shoe-braked wheels", Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit, May 2023, doi: 10.1177/09544097231173738.
- [14] M. PAU, F. AYMERICH, F. GINESU (2002), "Distribution of contact pressure in wheel–rail contact area", Wear, vol. 253, no. 1-2, pp. 265-274, Jul. 2002, doi: 10.1016/S0043-1648(02)00112-6.
- [15] D. THURESSON (2004), "Influence of material properties on sliding contact braking applications", Wear, vol. 257, no. 5-6, pp. 451-460, Sep., doi: 10.1016/J.WEAR.2004.01.009.
- [16] M.A. MOORE (1974), "The relationship between the abrasive wear resistance, hardness and microstructure of ferritic materials", Wear, vol. 28, no. 1, pp. 59-68, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(74\)90101-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(74)90101-X).



STRAIL sarà presente a
Expo Ferroviaria, Milano

3 - 5 Ottobre // STAND B100

Vi aspettiamo!

KRAIBURG STRAIL GmbH & Co. KG // 84529 Tittmoning, Germany // Goellstraße 8
STRAIL® in Italy // Tommaso Savi // mobile +39 392 9 50 38 94 // tommaso.savi@strail.it

