



## Una famiglia di acciai innovativi per ruote monoblocco forgiate-laminate progettati per ambienti sabbiosi

### *An innovative steel grade family for forged-rolled solid wheels designed for sandy environments*

Andrea GHIDINI<sup>(\*)</sup>  
 Michela FACCOLI<sup>(\*\*)</sup>  
 Angelo MAZZÙ<sup>(\*\*)</sup>  
 Candida PETROGALLI<sup>(\*\*)</sup>

**Sommario** - L'articolo descrive le proprietà di una nuova famiglia di acciai per ruote monoblocco forgiate-laminate, sviluppata come alternativa agli acciai AAR Classe B/C/D per aumentarne la resistenza all'usura ed alla fatica da contatto (RCF) anche in presenza di sabbia o altri contaminanti solidi. Lo studio degli effetti dei contaminanti solidi all'interfaccia ruota-rotaia è stato condotto attraverso indagini metallurgiche su ruote esercite in ambiente desertico, prove small scale su banco bi-disc ed analisi agli elementi finiti (FEM). Come risultato finale è stata sviluppata una famiglia di acciai micro-legati denominata SANDLOS®, caratterizzata da valori del carico di snervamento ciclico più elevati rispetto a quelli medi dei corrispondenti acciai AAR, pur nel rispetto della norma stessa. La caratterizzazione specifica della nuova famiglia di acciai è stata eseguita in conformità agli standard di Lucchini RS; il miglioramento delle prestazioni è stato quantificato attraverso diversi indici che permettono il confronto con gli acciai tradizionali.

#### 1. Introduzione

Storicamente, le infrastrutture per il trasporto si sono sviluppate principalmente in ambienti non aggressivi per i materiali, secondo la logica umana di ridurre al minimo gli sforzi necessari per la costruzione e la manutenzione, e per questo gli ambienti sabbiosi sono stati per lo più evitati. Recentemente, tuttavia, è emersa l'esigenza di implementare la rete ferroviaria anche in ambienti desertici, sotto la spinta delle seguenti motivazioni:

- potenziare il trasporto passeggeri in Paesi dove si trovano alcuni dei territori più inospitali del pianeta, caratterizzati da una combinazione di fattori quali caldo, freddo, sabbia, ma anche neve e ghiaccio;

**Summary** - The report describes the properties of a new steel grade family for forged-rolled solid wheels alternative to AAR Class B/C/D steel grades, designed to increase the resistance to wear and rolling contact fatigue (RCF) also in presence of sand and other solid contaminants. The study of the effects of the solid contaminants at the wheel-rail interface has been carried out by means of metallurgical investigations on full scale wheels tested in deserts, small-scale laboratory experiments by a bi-disc rig and Finite Element analyses (FEM). As a result, a micro-alloyed steel grade family named SANDLOS®, suited for forged and rolled wheels, has been designed and developed, characterized by higher values of Cyclic Yield Strength with respect to the average values of the corresponding AAR standards, even in the respect of the same standard. The special characterization of the new steel grade family is performed according to common criteria designed by Lucchini RS; performances improvement is obtained through various indices/maps allowing the comparison with traditional grade steels.

#### 1. Introduction

Most of transport demands historically has been developed mainly in railway-friendly environments, according to the human logic to minimize the efforts, largely avoiding upon the time sandy environments.

However, recently a new need of implementing the railway network in desert environments emerged, driven mainly by the two following motivations:

- transporting more people in short time in some countries needs passing through some of the most inhospitable territory on the planet, due to the combination

<sup>(\*)</sup> Lucchini RS, Lovere (BG), Italia.

<sup>(\*\*)</sup> Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale, Università di Brescia, Italia.

<sup>(\*)</sup> Lucchini RS, Lovere (BG), Italy.

<sup>(\*\*)</sup> Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Brescia, Italy.

- potenziare l'industria estrattiva. Minerali, petrolio, combustibili ed altre materie prime vengono estratte con sempre maggiore frequenza in ambienti estremi; in questi casi la ferrovia diventa un'infrastruttura essenziale per l'esistenza stessa di tali industrie.

La sabbia e le temperature estreme sono i principali fattori critici cui gli ingegneri devono far fronte, esplorando nuovi campi di ricerca e sviluppo del materiale rotabile; questa sfida, naturalmente, coinvolge sia i fornitori di rotaie, sia i fornitori di ruote ferroviarie [1].

Per quanto riguarda la ruota, l'esigenza di progettare una nuova classe di materiali idonei ad operare in ambienti desertici deriva principalmente da due necessità:

- ridurre la forte usura abrasiva ed il ratcheting (accumulo di deformazione plastica) che derivano dalla presenza di sabbia all'interfaccia del contatto ruota-rotaia [2], [3];
- elaborare acciai per ruota idonei all'accoppiamento con gli acciai ad alta resistenza per rotaia introdotti di recente.

Guidata da questo intento, Lucchini RS ha sviluppato la famiglia degli acciai SANDLOS®, che comprende una sorta di "desert-pack", ossia una serie di tre soluzioni innovative che permettono l'esercizio alle alte temperature del deserto ed in presenza di sabbia [4].

Il fenomeno del danneggiamento delle ruote ferroviarie in ambienti sabbiosi è molto singolare [5], [6], [7]; in questo articolo vengono presentati i risultati di una ricerca congiunta accademico-industriale, che ha come obiettivo la comprensione dei principali meccanismi di danneggiamento che si presentano nella zona del contatto ruota-rotaia. Si ritiene che l'esperienza acquisita in questo campo possa dare grandi vantaggi anche per altre applicazioni in cui i materiali rotabili, pur in assenza di sabbia, sono fortemente sollecitati.

## 2. Analisi del danneggiamento di ruote usurate dopo l'esercizio in ambiente sabbioso

Per comprendere meglio il meccanismo principale di danneggiamento cui sono soggette le ruote in presenza di sabbia, sono state esaminate alcune ruote usurate provenienti da regioni desertiche. Esse hanno registrato performance molto basse in termini di durata, con vita utile inferiore ai quattro mesi. Partendo dal presupposto che la percorrenza giornaliera è di 1.000 km circa, la vita utile stimata per una ruota in ambienti desertici è complessivamente di soli 130.000 km circa, prevedendo generalmente tre operazioni di riprofilatura intermedie ogni 25.000 ÷ 30.000 km.

L'indagine metallurgica è stata condotta dal Reparto Metallurgia di Lucchini RS (MET) su quattro ruote usurate in acciaio AAR Classe B, ciascuna delle quali è stata tagliata ed esaminata in 3 posizioni radiali a 120°. In Fig. 1 è riportata una sezione significativa per ognuna delle

*of heat, cold, sand, but also snow, ice, etc.;*

- *increase the capacity of the mining industry. Minerals, oil, fuel and the main raw materials are more and more frequently extracted in extreme environments; in those cases, railway becomes an essential infrastructure for the existence itself of such industries.*

*Sand and extreme temperatures are the main stressing factors the engineers have to deal with, opening new topics for the research and development of rolling stock components; this challenge, of course, involves both rail-track and wheel suppliers [1].*

*From the point of view of the wheel, in addition to the important tread machining and maintenance philosophy adopted, the need to design a new class of materials comes from two main reasons:*

- *to mitigate the very severe abrasive wear and ratcheting (accumulation of plastic strain), resulting from sand entering the wheel-rail contact interface [2], [3];*
- *to couple the newly introduced high resistance rail grades with different and suited sets of wheel materials for desert applications.*

*Driven by this purpose, Lucchini RS has developed the SANDLOS® steel family, which incorporates a sort of "desert pack", that is a set of three innovative solutions able to run within the desert high temperatures and sandstorms [4].*

*The mechanism of damaging in sandy environments is a very peculiar process [5], [6], [7]: in this paper, the results of a joint industrial-academic research, aimed at understanding the focal mechanisms occurring in a contact patch, are presented.*

*The experience collected in this extreme sector for wheel/rail materials application is expected to give large benefits also on other strong and stressed railway applications, even without sand.*

## 2. Failure analysis on worn wheels after service in the sand

*In order to better understand the main mechanism of damage on wheels in service in the sand, some worn wheels coming from desert regions provided by customers were analyzed. In fact, those wheels recorded very low performances in terms of "durability", getting the end of life within less than four months. Assuming that the daily distance is about 1.000 km, the actual life estimated for a wheel in desert environments is around 130.000 km only (total wheel life), with usually three intermediate re-profiling operations, each every 25.000 ÷ 30.000 km.*

*A metallurgical investigation was carried out by the Metallurgy Department of Lucchini RS (MET) on four worn wheels in AAR Class B steel; each wheel was cut and examined at 3 radial section with a 120° angle. Fig. 1 shows a significant section for each wheel. The presence of*



Fig. 1 - Sezione delle quattro ruote usurate esaminate. La “gola di usura” compare su tutte le quattro ruote esaminate; le ruote 3 e 4 presentano anche un “tread roll over” intenso.

Fig. 1 - Section of the four examined worn wheels. “Hollow wear” appears on all the four examined wheels; wheels 3 and 4 show also intense “tread roll over”.

quattro ruote. Si è osservata la presenza di una “gola di usura” o “hollow wear” su tutte le ruote esaminate, dovuta probabilmente alla conformazione del binario, alle condizioni ambientali e di carico, oltre che ad un grave deterioramento correlato all'azione meccanica della sabbia. Le ruote 3 e 4, che sono state prelevate da locomotive, presentano anche evidenza di “tread roll over”, ovvero uno scorrimento plastico laterale molto accentuato al margine della superficie di rotolamento. Normalmente le ruote delle locomotive soffrono più frequentemente di questo fenomeno poiché hanno più problemi di aderenza. Come esempio del danneggiamento descritto, in Fig. 2 sono riportati i risultati delle osservazioni condotte al microscopio ottico sulla ruota 4.

Tutti i campioni di ruote in Classe B esaminati mostrano nella zona della “gola di usura” e attorno ad essa, due strati distinti sovrapposti di deformazione plastica a freddo. Questo fenomeno è correlato a forze di contatto elevate, accompagnate ad un valore non sufficientemente elevato del limite di snervamento ciclico ( $cYS_{0.2}$ ) [1]. Infatti, un ratcheting intenso che interessi uno strato consistente di materiale è la condizione necessaria per l'inglobamento della sabbia ed il conseguente deterioramento della pista di rotolamento, come è successo nelle quattro ruote usurate esaminate. Pertanto, per limitare la penetrazione della sabbia è necessario ridurre il ratcheting aumentando il limite di snervamento ciclico  $cYS_{0.2}$ .

Si è reso quindi necessario verificare le proprietà meccaniche delle ruote analizzate secondo la norma Lucchini RS I.T.MET R111 riferita all'acciaio di qualità AAR UPLOS® per ciò che attiene all'omologazione, la posizione del campionamento ed i valori richiesti. La specifica

“hollow wear” was observed on all the examined wheels, probably due to track conformation, loading and environmental conditions, huge deterioration related to the sand mechanics. Even a “tread roll over” phenomenon is present in wheels 3 and 4, e.g. a huge lateral plastic flow near the tread border. Typically, locomotives suffer more frequently from “tread roll over” than other vehicle types, because locomotives generally apply higher tractive forces. As an example of the described damage, results of microscope observation on wheel 4 are shown in Fig. 2.

All of the examined samples from Class B wheels, show a “double layer with cold plastic deformed material” located into and around the “hollow wear” area. This common feature is correlated to high contact forces and to a not enough high value of cyclic yield strength  $cYS_{0.2}$  [1]. In fact, a large layer with intense ratcheting is the starting point for sand incorporation in the depth and huge deterioration, as happened in the four examined worn wheels. In order to prevent sand penetration and incorporation in the strained material, we have to reduce ratcheting, increasing the cyclic yield strength  $cYS_{0.2}$  of the wheel material.

Mechanical properties have been verified, according to the Lucchini RS standard I.T.MET R111 (test type, sampling location, required values), with reference to the AAR UPLOS® steel grade, because AAR M-107/M-208 specification does not require mechanical properties, but only the hardness on the front rim face. The obtained results, summarized in Table 1, are quite low for all the four worn wheels, particularly in terms of hardness, monotonic yield strength  $mYS_{0.2}$  and cyclic yield strength  $cYS_{0.2}$ . Plotting those results into the maps of Fig. 3 (points ID1, ID2, ID3, ID4) we can compare the tested materials with the two AAR derived families developed by Lucchini RS: AAR UPLOS® family and SANDLOS® family

The four worn wheels have recorded not enough high values of  $cYS_{0.2}$ , coupled with not very high  $K_Q$  values and upgradeable  $\epsilon_f$  values.

The values plotted in Fig. 3 come from LRS database and they are for information only; they are not a guarantee of maximum or minimum values.

### 3. Experimental small-scale tests

#### 3.1. Materials and methods

Small scale rolling-sliding contact tests were carried out by means of a bi-disc machine, whose lay-out is schematically shown in Fig. 4, on discs with 60 mm diameter and 15 mm thickness, machined out from real rails and wheels. The behaviour of two traditional steels (ER8 EN13262 and AAR Class C), and two upgraded materials, (SANDLOS® S and SANDLOS® H) were investigated. The four wheel steels, all supplied by Lucchini RS, were coupled with the same rail steel (350HT). The steels chemical composition and properties are shown in Table 2. Tests with different duration, (10,000, 20,000, 30,000, 50,000, 70,000 and



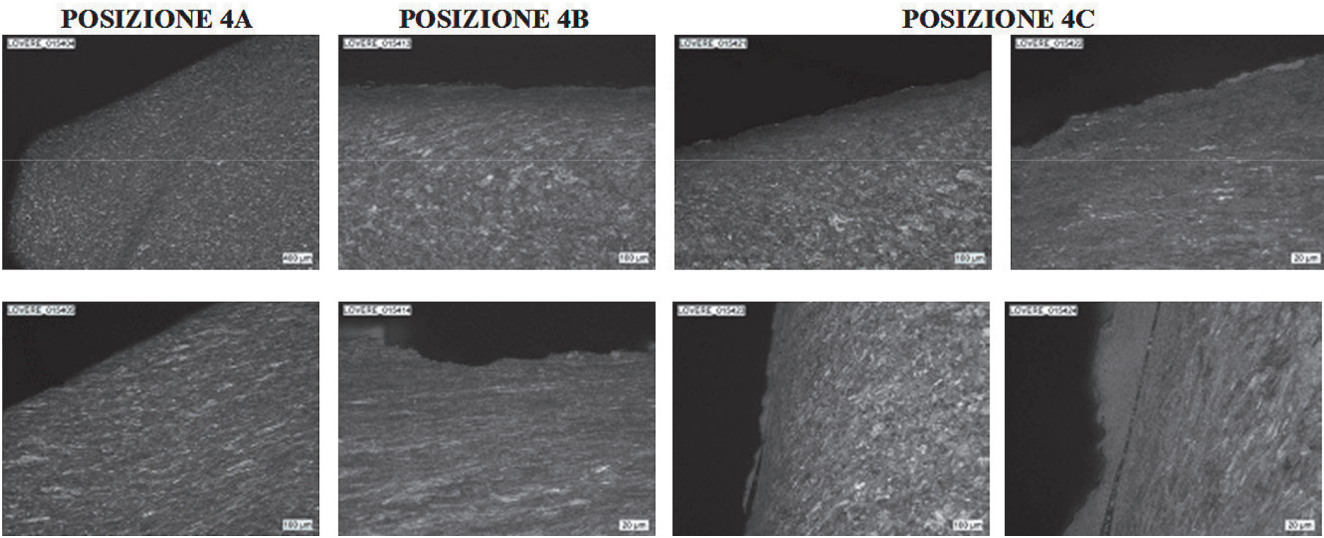


Fig. 2 - Microstruttura del campione 4 di una ruota usurata. La posizione A presenta uno strato molto profondo di materiale deformato plasticamente a freddo, con un effetto molto forte di “tread roll over”. La posizione B, dove la “gola di usura” è più importante, mostra ancora uno strato profondo di materiale deformato plasticamente a freddo, ma con usura molto più accentuata. Nella posizione C si vedono due strati sovrapposti di materiale deformato plasticamente a freddo, insieme ad usura accentuata ed effetti di delaminazione superficiale. In questa zona particelle di sabbia vengono inglobate nell'acciaio per effetto del flusso plastico.

Fig. 2 - Microstructure of worn wheel sample 4. Location A shows a very deep layer of cold plastic deformed material, with a very strong “tread roll over” effect. Location B, where “hollow wear” is more relevant, shows a very deep layer of cold plastic deformed material and accentuated wear with surface roughening. Location C shows a very deep double layer of cold plastic deformed material, combined with accentuated wear with delamination effects in the surface layer, where sand is incorporated by plastic flow.

Tabella 1 – Table 1

Proprietà meccaniche delle ruote analizzate  
Mechanical properties of the investigated wheels

	Richieste I.T. MET R111 Required I.T. MET R111	Misurate Ruota 1 Measured Wheel 1	Misurate Ruota 2 Measured Wheel 2	Misurate Ruota 3 Measured Wheel 3	Misurate Ruota 4 Measured Wheel 4
Durezza HB (superficie di rotolamento) Hardness HB (tread surface)	305÷340	302	300	295	310
Durezza HB (profondità 5 mm) Hardness HB (depth 5 mm)	≥285	287	284	275	260
Durezza HB (profondità 35 mm) Hardness HB (depth 35 mm)	FIO	296	293	298	276
Sollecitazione di snervamento monotona $m.YS_{0.2}$ [MPa] Monotonic yield stress $m.YS_{0.2}$ [MPa]	640	630	585	620	570
Carico di rottura UTS [MPa] Ultimate tensile stress UTS [MPa]	950÷1100	1055	1050	1045	990
Strizione Z [%] Necking Z [%]	≥25	37	36	36	35
Deformazione reale a rottura $\epsilon_f$ True failure strain $\epsilon_f$	-	0,46	0,45	0,45	0,43
Tenacità alla frattura $K_Q$ [MPa×m <sup>0.5</sup> ] Fracture toughness $K_Q$ [MPa×m <sup>0.5</sup> ]	≥50	57	50	49	55
Sollecitazione di snervamento ciclica $c.YS_{0.2}$ [MPa] Cyclic yield stress $c.YS_{0.2}$ [MPa]	-	490	460	500	450

AAR M-107/M-208, infatti, non è sufficiente in quanto non prescrive le proprietà meccaniche, ma solo la durezza sulla faccia frontale della corona. I risultati ottenuti, riepilogati in Tabella 1, sono piuttosto bassi per le quattro ruote usurate, in particolare in termini di durezza, limite di snervamento monotono  $M.YS_{0.2}$  e limite di snervamento ciclico  $C.YS_{0.2}$ . Riportando questi risultati nei diagrammi di Fig. 3 (punti ID1, ID2, ID3, ID4) è possibile mettere a confronto i materiali testati con le due famiglie AAR derivate sviluppate da Lucchini RS: la famiglia AAR UPLOS® e la famiglia SANDLOS®.

Le quattro ruote usurate hanno registrato valori di resistenza allo snervamento ciclico ( $C.YS_{0.2}$ ) non abbastanza elevati, accoppiati a valori di tenacità alla frattura ( $K_Q$ ) non molto elevati e a valori di deformazione a rottura ( $\epsilon_f$ ) migliorabili.

I valori mostrati in Fig. 3 provengono dal database LRS e sono solo a scopo informativo; non sono una garanzia di valori minimi o massimi.

### 3. Prove sperimentali su scala ridotta

#### 3.1. Materiali e metodi

Le prove di contatto con rotolamento e strisciamento su scala ridotta sono state eseguite presso l'Università di Brescia sulla macchina bi-disc mostrata in Fig. 4, utilizzando provini cilindrici di diametro 60 mm e spessore

130,000 cycles), were carried out. In all tests the Hertz contact pressure was 1100 MPa, the rolling speed was 500 r.p.m. and the sliding/rolling ratio was 1%. A continuous sand flow of 9 g/min was added to the contact interface. The sand was a commercial product with particle size in the range 0.20÷0.35 mm. The longest test was repeated without sand as well. The tests were periodically stopped in order to measure the weight loss of the samples. At the end of the tests the specimens were sectioned in order to measure the Vickers hardness profile along the depth; furthermore, the sections were etched by Nital in order to observe the subsurface microstructure by means of optical and, in some cases, SEM microscopy.

#### 3.2. Test results

The weight loss in the 130,000 cycle tests with sand are shown in Fig. 5 for the wheel steels. Overlapping curves, not shown here, were obtained for the shorter tests as well. In Fig. 5 the weight loss curves of the tests without sand are shown as well. Table 3 shows the wear rate, intended as the slope of the weight loss curve in its linear stretch. At a first sight, the weight loss of the wheel steel discs is considerably higher in the tests with sand than in those without sand. Furthermore, the wear rate of ER8 discs is approximately double than that of Class C and SANDLOS® S discs, both with and without sand, whereas it is 2.5 times higher than that of SANDLOS® H discs in the tests with sand.

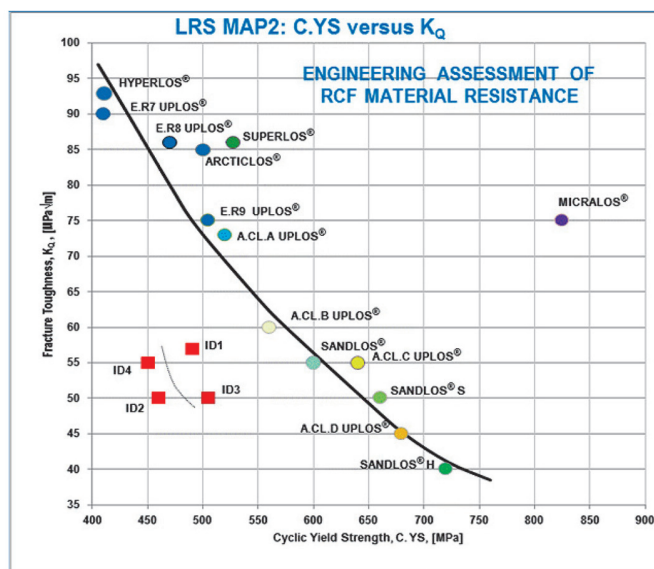
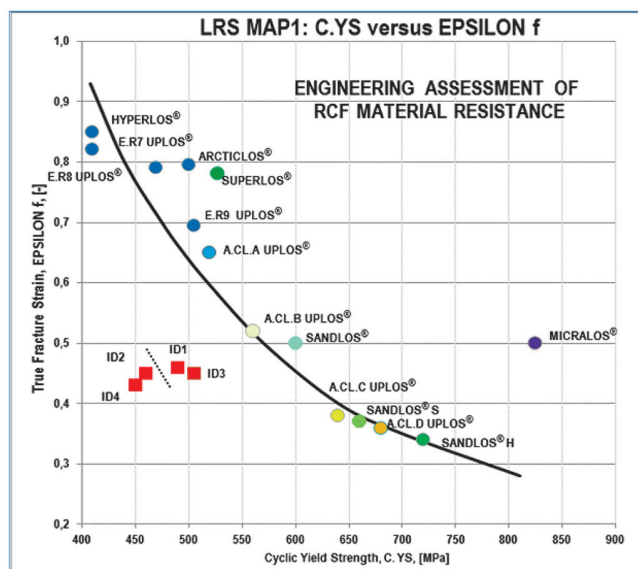


Fig. 3 - Diagrammi delle proprietà meccaniche di diversi acciai per ruote prodotti da Lucchini RS, confrontate con quelle delle ruote analizzate. A sinistra, la deformazione reale a rottura  $\epsilon_f$ , intesa come parametro di duttilità, viene diagrammata in funzione del limite di snervamento ciclico  $C.YS_{0.2}$ , inteso come soglia per la plasticizzazione ciclica. A destra, il parametro di tenacità a frattura  $K_Q$  è diagrammato in funzione di  $C.YS_{0.2}$ .

Fig. 3 - Maps of mechanical properties of several Lucchini RS wheel steels, compared with those of the analysed wheels. On the left, the true strain at fracture  $\epsilon_f$ , assumed as ductility parameter, is plotted versus the cyclic yield strength  $C.YS_{0.2}$ , assumed as a threshold for cyclic plastic strain. On the right, the fracture toughness parameter  $K_Q$  is plotted versus  $C.YS_{0.2}$ .

15 mm, lavorati di macchina da rotaie e ruote reali. È stato analizzato il comportamento di due acciai tradizionali (ER8 EN13262 e AAR Classe C) e di due materiali innovativi (SANDLOS® S e SANDLOS® H). I quattro acciai per ruota sono stati accoppiati con lo stesso acciaio per rotaia (350HT). La composizione chimica degli acciai e le loro proprietà meccaniche sono riportate in Tabella 2. Sono state eseguite prove di diversa durata (da 10.000 a 130.000 cicli), tutte con la stessa pressione hertziana di contatto (1100 MPa), la stessa velocità di rotolamento (500 giri/’) e lo stesso rapporto strisciamento/rotolamento (1%). All’interfaccia del contatto è stato applicato per caduta un flusso continuo di sabbia di 9 g/min, utilizzando una sabbia commerciale di granulometria 0,20÷0,35 mm. La prova più lunga è stata ripetuta anche senza sabbia. Le prove sono state fermate periodicamente per misurare la perdita di peso dei campioni. A fine prova, i provini sono stati sezionati a metà dello spessore ed è stato eseguito il profilo della durezza Vickers lungo la profondità. Le sezioni, inoltre, sono state attaccate con soluzione Nital 2% al fine di evidenziare la microstruttura sub-superficiale ed il danneggiamento, ed osservate con l’ausilio di un microscopio ottico e, in alcuni casi, SEM.

3.2. Risultati delle prove

In Fig. 5 è illustrata la perdita di peso degli acciai per ruota, misurata nelle prove di durata 130.000 cicli con e senza sabbia. La Tabella 3 riporta la velocità di usura, intesa come la pendenza della curva della perdita di peso nel suo tratto lineare. Sin da un primo sguardo, la perdita di peso dei dischi ruota è notevolmente più elevata nelle prove con sabbia rispetto a quella senza sabbia. La velocità di usura dei dischi in ER8, inoltre, è

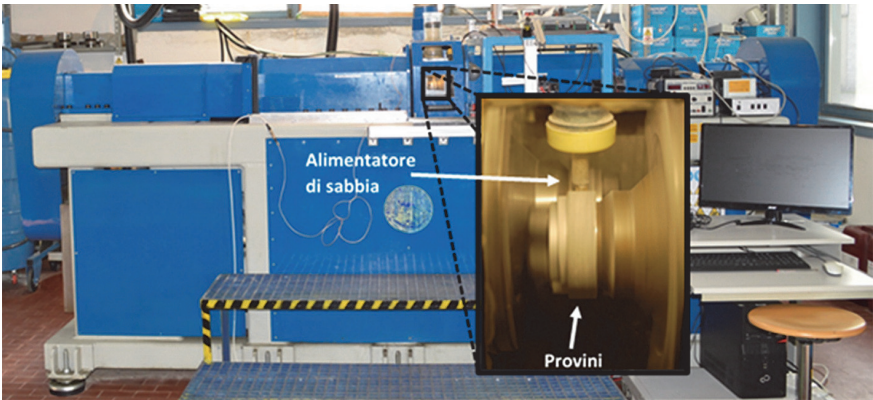


Fig. 4 - Macchina per prove bi-disc e particolare dell’impianto di alimentazione della sabbia.

Fig. 4 - Scheme of the bi-disc testing machine and particular of the sand feeding system.

Fig. 6 shows the Vickers hardness profiles on the cross-section of the wheel steel discs in the 130,000 cycle tests. The discs tested with sand exhibit the maximum hardening, with higher depth of hardened layer. As hardening is correlated to the plastic strain occurred, these results show that the presence of sand increases the overall plastic flow.

Two pictures (Figs. 7 and 8), referring to the 130,000 cycle tests with sand, are shown as representative of the main phenomena occurring in presence of sand.

Fig. 7 shows what happened in the ER8 specimen: a layer of about 450 µm with huge plastic strain, leading the grain borders to be almost parallel to the contact surface, is evident. Under this layer, the plastic strain gradually decreases as far as the depth increases. In most of the highly strained layer “veins” of crushed sand, incorporated into the steel by means of the extremely high plastic strain, are evident: they form a sort of subsurface crack network that likely enhances the detachment of large material particles.

Fig. 8 shows the microstructure of the SANDLOS® S steel: again, a highly strained layer is present, but its depth is much lower (about 200 µm). The phenomenon of sand

Tabella 2 – Table 2

Composizione chimica e proprietà meccaniche degli acciai delle ruote testate  
Chemical composition and mechanical properties of the tested wheel steels

Acciaio Steel	Principali elementi chimici [peso%] Main chemical elements [wt%]					UTS	M <sub>0.2</sub> YS	Allungamento Elongation	Durezza Hardness
	C	Mn	Si	S	P	MPa	MPa	%	HB
ER8	0,54	0,75	0,34	0,001	0,009	980	600	14	280
AAR Classe C	0,70	0,78	0,34	0,002	0,009	1120	715	12	340
SANDLOS® S	0,72	0,80	0,87	0,001	0,010	1180	750	12	350
SANDLOS® H	0,75	0,80	0,87	0,001	0,006	1270	800	11	390
350 HT (rotaia) 350 HT (rail)	0,72	1,04	0,30	0,004	0,015	-	-	-	355



circa il doppio rispetto a quella dei dischi di Classe C e SANDLOS® S, sia con che senza sabbia, mentre è 2.5 volte più elevata di quello dei dischi in SANDLOS® H nelle prove con sabbia.

La Fig. 6 mostra i profili di durezza Vickers sulla sezione trasversale dei dischi ruota nelle prove di durata pari a 130.000 cicli. I dischi testati con sabbia presentano un incrudimento maggiore sia nei valori massimi che nella profondità dello strato indurito. Dato che l'incrudimento è correlato alla deformazione plastica verificatasi durante la prova, questi risultati mostrano che la presenza di sabbia aumenta considerevolmente il flusso plastico complessivo.

Nelle Figg. 7 e 8 sono riportate due micrografie rappresentative dei danneggiamenti osservati sulle sezioni trasversali dei dischi testati 130.000 cicli in presenza di sabbia. La Fig. 7 si riferisce alla sezione del disco in ER8: si nota uno strato di materiale deformato dello spessore di 450 µm, di cui la porzione più esterna (circa 300 µm) presenta una deformazione plastica molto elevata, tale da "stirare" i grani in direzione quasi parallela alla superficie di contatto. Sotto questo strato, la deformazione plastica diminuisce gradualmente all'aumentare della profondità. Nella maggior parte dello strato superficiale più deformato appaiono come delle vene di sabbia frantumata ed incorporata nell'acciaio per effetto della deformazione plastica. Queste formano un sistema di cricche sub-superficiali che favoriscono il distacco di grosse porzioni di materiale.

La Fig. 8 mostra la microstruttura dell'acciaio SANDLOS® S: anche qui è presente uno strato deformato, ma la sua profondità è molto inferiore (200 µm circa). Il fenomeno dell'inglobamento della sabbia è ancora confina-

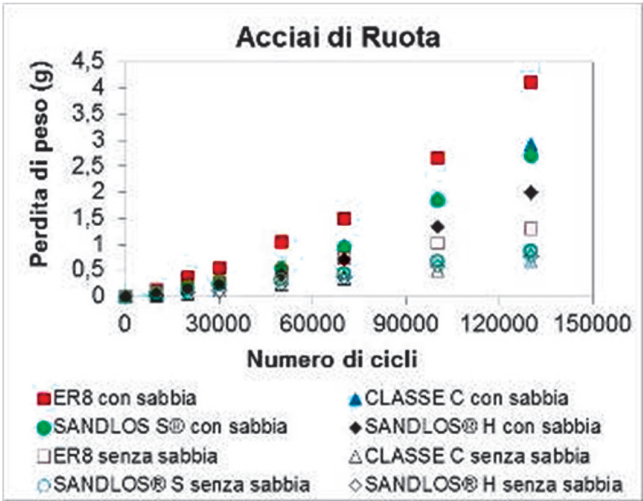


Fig. 5 - Perdita di peso dei dischi in acciaio di ruota.  
Fig. 5 - Weight loss of the wheel discs.

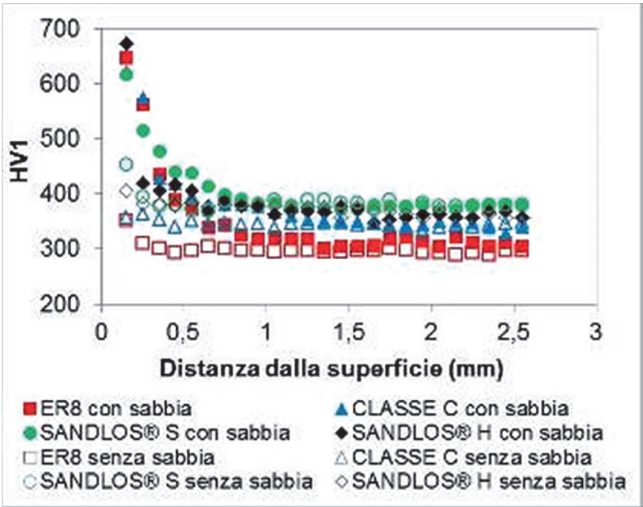


Fig. 6 - Profili di durezza sulla sezione trasversale dei dischi in acciaio per ruota.  
Fig. 6 - Hardness profiles on the specimen cross section.

incorporation is confined within 100 µm in depth, and only surface cracks are present. Under the highly strained layer the strain rapidly decrease, such that under about 300 µm in depth no more plastic strain can be visually detected. Results similar to the SANDLOS® S were found for the SANDLOS® H steel; as the Class C is concerned, some sub-surface cracks filled by sand were detected, although their depth was much lower than in the ER8 specimens.

4. Test simulation by finite elements

The test condition was simulated by means of a 2D plane strain model, including the contacting bodies and

Tabella 3 – Table 3  
Velocità di usura dei dischi in acciai per ruote e rotaie  
Wear rate of the tested wheel and rail steels

Acciaio Steel	Velocità di usura [g/ciclo] Wear rate [g/cycle]	
	Con sabbia With sand	Senza sabbia No sand
ER8	2.27×10 <sup>-5</sup>	1.04×10 <sup>-5</sup>
350HT (rispetto a ER8) 350HT (vs ER8)	1.3×10 <sup>-5</sup>	-
Classe C Class C	1.24×10 <sup>-5</sup>	5.61×10 <sup>-6</sup>
350HT (rispetto a Class C) 350HT (vs Class C)	1.12×10 <sup>-5</sup>	-
SANDLOS® S	1.26×10 <sup>-5</sup>	6.67×10 <sup>-6</sup>
350HT (rispetto a SANDLOS® S) 350HT (vs SANDLOS® S)	1.49×10 <sup>-5</sup>	-
SANDLOS® H	9.02×10 <sup>-6</sup>	6.43×10 <sup>-6</sup>
350HT (rispetto a SANDLOS® H) 350HT (vs SANDLOS® H)	9.00×10 <sup>-6</sup>	-

to nello strato esterno più deformato (100  $\mu\text{m}$  di profondità circa); inoltre sono presenti cricche superficiali. Sotto lo strato superficiale, la deformazione diminuisce rapidamente. Nell'acciaio SANDLOS® H sono stati trovati risultati simili al SANDLOS® S; per quanto riguarda il Classe C, sono state rilevate molte cricche sub-superficiali piene di sabbia, di profondità inferiore rispetto a quella dei provini in ER8.

I campioni testati in assenza di sabbia hanno presentato un danneggiamento molto meno severo rispetto a quelli testati con sabbia, caratterizzato da uno strato deformato meno profondo e dalla presenza di poche piccole cricche superficiali.

#### 4. Simulazione agli elementi finiti delle prove sperimentali

La condizione di lavoro delle prove è stata simulata con un modello 2D in deformazione piana, che comprende, oltre ai corpi a contatto, una, due o tre particelle tonde di sabbia di diametro 20  $\mu\text{m}$  (Fig. 9). Si presume che questo diametro sia rappresentativo di una particella di sabbia frantumata. Il comportamento ciclico degli acciai è stato approssimato con il modello di Ramberg-Osgood (Fig. 10), calibrato sulla base del  $c \cdot YS_{0.2}$  degli acciai testati; il materiale delle particelle è stato approssimato con un comportamento elastico lineare con modulo di Young  $E = 40 \text{ GPa}$  e coefficiente di Poisson  $\nu = 0,3$ .

I risultati principali della simulazione possono essere riepilogati in Fig. 11, dove il campo della deformazione calcolata viene messo a confronto con la microstruttura osservata sperimentalmente per gli acciai ER8 e SANDLOS® S. Le zone rosso vivo nei contorni della deformazione corrispondono ad una deformazione plastica equivalente superiore all'1%. Nella simulazione del provino ER8, lo

one, two or three round particles of sand with 20  $\mu\text{m}$  diameter (Fig. 9). Such diameter is supposed to be representative of a crushed sand particle. The cyclic behaviour of the steels was approximated by means of a Ramberg-Osgood model (Fig. 10), calibrated on the basis of the  $c \cdot YS_{0.2}$  of the tested steels; the particle material was simulated as elastic with Young modulus  $E = 40 \text{ GPa}$  and Poisson ratio  $\nu = 0.3$ .

The main results of the simulation can be summarised by Fig. 11, where the calculated strain field is compared with the experimental microstructure for the ER8 and SANDLOS® S steels. The bright red areas in the strain contours correspond to equivalent plastic strain exceeding 1%. In the simulation of the ER8 specimen, the thickness of such area is rather uniform under the contact surface, meaning that it is less influenced by the sand indentation and more by the overall disc-disc contact. Observing the experimental evidence, the intense plastic flow in this layer enhances the incorporation of the sand into the steel. Switching to the SANDLOS® S, the red area is much thinner than in the previous case away from the indentation region. On the other hand, the print of the sand grain is surrounded by a highly strained area, clearly related to the indentation. This condition allows distinguishing a local strain field, related to the scale of the grain-disc contact area, from a global strain field, related to the scale of the disc-disc contact area. This result is coherent with the experimental micrographs.

#### 5. Mechanics of wheel damaging in various environments

The metallurgical investigation on worn wheels and the laboratory tests revealed that in absence of solid contaminant (dry sand) a "deep layer with plastic flow" generates,

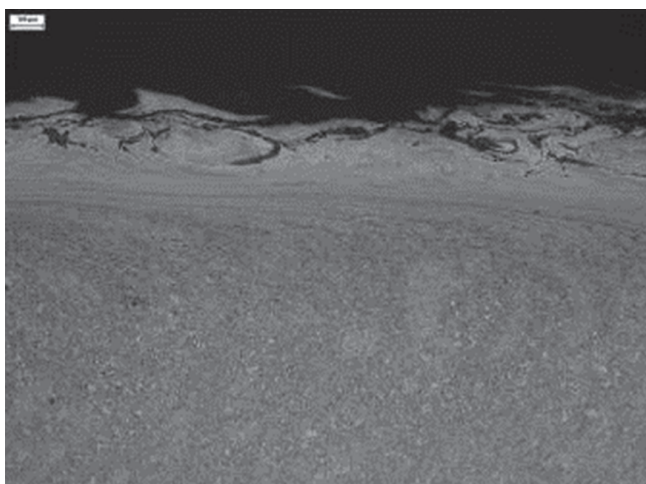


Fig. 7 - Microstruttura del disco in ER8 alla fine della prova con sabbia di durata pari a 130.000 cicli.

Fig. 7 - Microstructure of the ER8 specimen at the end of the 130,000 cycle test with sand.

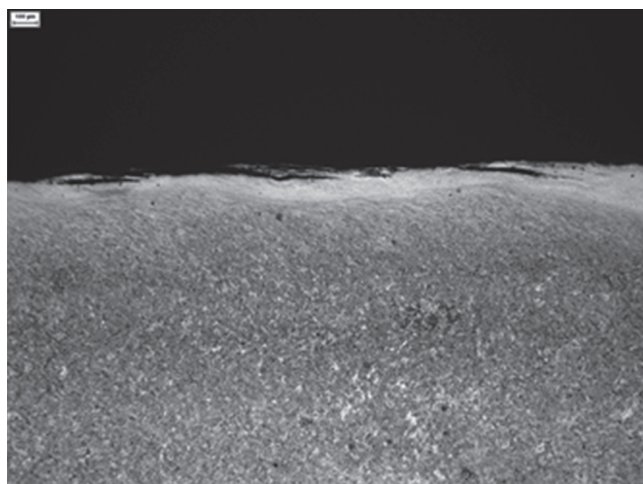


Fig. 8 - Microstruttura del disco in SANDLOS® S alla fine della prova con sabbia di 130.000 cicli.

Fig. 8 - Microstructure of the SANDLOS® S specimen at the end of the 130,000 cycle test with sand.



spessore di questa zona è piuttosto uniforme sotto la superficie di contatto: ciò significa che è meno influenzata dall'indentazione della sabbia e più dal contatto complessivo disco-disco. Osservando la prova sperimentale, l'intenso flusso plastico in questo strato incrementa l'inglobamento della sabbia nell'acciaio. Passando al SANDLOS® S, lontano dalla zona dell'indentazione la zona rossa è molto più sottile che nel caso precedente. D'altro canto, l'impronta del grano di sabbia è circondata da una zona altamente deformata, chiaramente correlata all'indentazione stessa. Questa condizione permette di distinguere un campo di deformazione locale, sulla scala dimensionale dell'area di contatto grano-disco, da un campo di deformazione globale, sulla scala dell'area di contatto disco-disco. Questo risultato trova riscontro nelle micrografie relative alle sezioni dei campioni sottoposti alle prove sperimentali.

## 5. Meccanica del danneggiamento della ruota in diversi ambienti

L'indagine metallurgica sulle ruote usurate e le prove di laboratorio hanno rivelato che in assenza di una sostanza contaminante solida (sabbia asciutta) si genera uno "strato profondo con flusso plastico" come conseguenza del ratcheting e della RCF che si sviluppa nel contatto Hertziano tra ruota e rotaia. Se nella zona di contatto si aggiunge la sostanza contaminante solida, un campo di deformazione locale, correlato al contatto sabbia-acciaio, si sovrappone al suddetto strato nella zona superficiale.

In base all'aspetto della sezione mostrata in Fig. 12, tratta da una ruota che è stata in esercizio in presenza di sabbia, si possono individuare due diversi strati deformati plasticamente:

- un sottile strato superficiale, caratterizzato da un flusso plastico estremamente elevato e da indentazioni causate da frammenti di sabbia e detriti di usura intrappolati nella zona di contatto;
- uno strato sub-superficiale più profondo, con flusso plastico meno intenso.

Si possono individuare questi due strati anche in Fig. 2.

Il campo della deformazione locale dovuta a frammenti intrappolati nel contatto può produrre diversi effetti a seconda dello spessore dello strato superficiale. Se questo è grande, l'effetto della sabbia si sovrappone a quello del contatto ruota-rotaia e si aggiunge al flusso plastico già di per sé intenso, aumentando la probabilità di inglobamento delle particelle non metalliche. In questo modo viene a formarsi una rete di vene di sabbia nella zona sub-superficiale che accelera la delaminazione, il peeling e l'usura, come illustrato in Fig. 7.

In Fig. 13 è mostrato un particolare di una cricca presente in una delle ruote analizzate, che è stata osservata al microscopio elettronico a scansione (SEM). E' possibile osservare sulla porzione più esterna della ruota, indicata con EX, un solco prodotto dalla sabbia. Tale

as consequence of Hertz contact and RCF between wheel and rail. When also the solid contaminant goes into the contact area, a local strain field, related to the sand-steel contact, is added at the surface of the deep layer with plastic flow.

According to the visual appearance of Fig. 12, taken from a wheel run with sand, two different plastically strained layers can be identified:

- a thin surface layer with extremely huge plastic flow and ratcheting, due to indentations caused by fragments of sand and wear debris trapped into the contact patch;
- a deeper sub-surface layer with less intense plastic flow and ratcheting. These two layers can be identified even in Fig. 2.

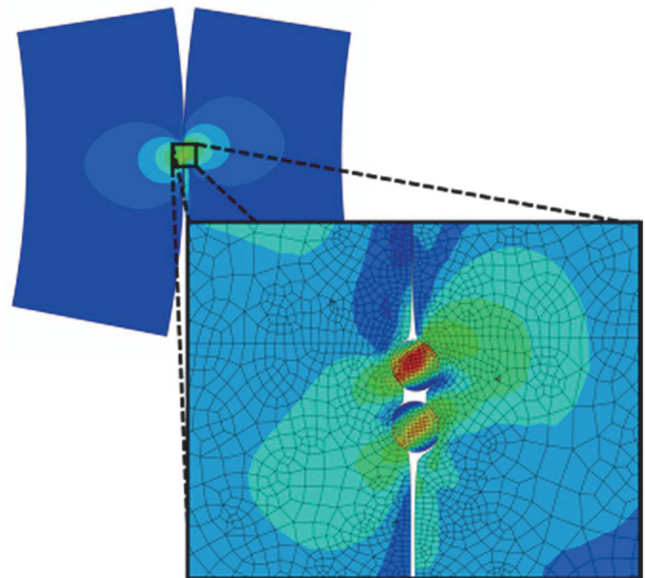


Fig. 9 - Modello FEM dei corpi a contatto in deformazione piana.

Fig. 9 - FEM plane strain model of the contacting bodies.

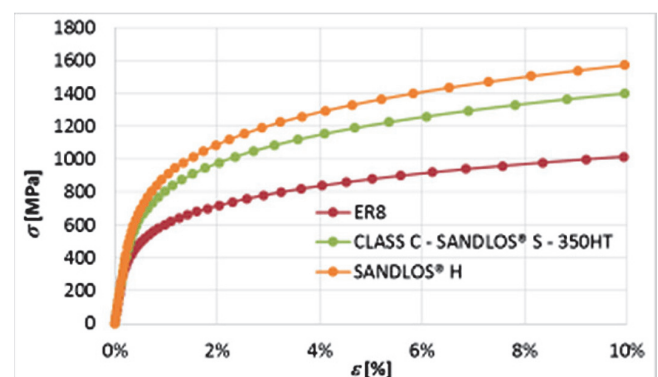


Fig. 10 - Modello di plasticità dei materiali nelle simulazioni.

Fig. 10 - Plasticity model of the materials in the simulations.

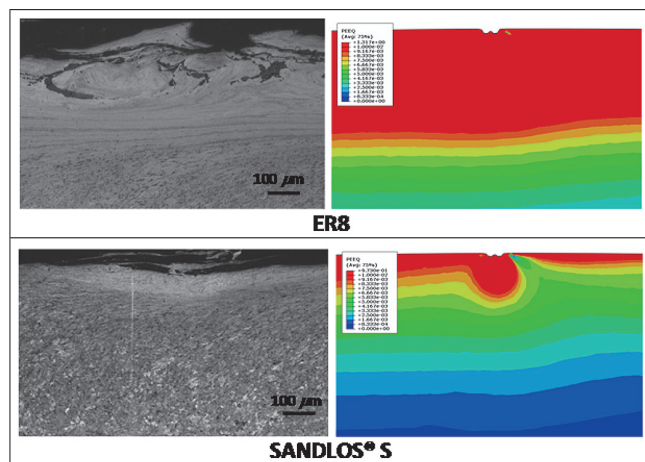


Fig. 11 - Confronto tra la plasticizzazione sperimentale e simulata in ER8 e SANDLOS® S.

Fig. 11 - Comparison between experimental and simulated plasticisation in ER8 and SANDLOS® S.

danneggiamento può essere definito come “indentazione e usura da terzo corpo”, che si verifica quando particelle dure di sabbia si incastrano nella superficie più tenera e graffiano l'altra, causando il distacco di frammenti di usura lungo il loro percorso. Al di sotto di tale zona (tra EX ed IN) sono visibili particelle di sabbia (come confermato dall'analisi EDS riportata in figura) e frammenti di usura intrappolati all'interno della cricca.

Essi sono responsabili della delaminazione e del peeling, poiché la loro presenza favorisce la propagazione della cricca sotto lo strato superficiale, parallelamente alla superficie di rotolamento.

Riepilogando, gli ambienti dove si verifica il contatto ruota-rotaia possono essere classificati come segue:

- Ambiente pulito e asciutto senza sostanze contaminanti solide né liquide;
- Ambiente con sostanze contaminanti solide asciutte quali sabbia asciutta o detriti da usura;
- Ambiente con sostanze contaminanti liquide quali acqua, lubrificanti, miscele umide.

Il fenomeno di danneggiamento principale che si verifica in un ambiente pulito e asciutto può essere definito come *ratcheting standard* (1): è correlato alle azioni normali e tangenziali sull'area di contatto ruota-rotaia e genera uno “strato profondo di flusso plastico”. Se la deformazione plastica supera la resistenza a rottura del materiale, si innescano cricche superficiali.

In presenza di sabbia, oltre al *ratcheting standard*, si possono verificare i fenomeni seguenti:

- *Indentazione e usura da terzo corpo* (2): frammenti di sabbia, frantumata e agglomerata con detriti da usura endogeni, graffiano lo strato superficiale innescando così l'usura abrasiva (usura da terzo corpo). Tali

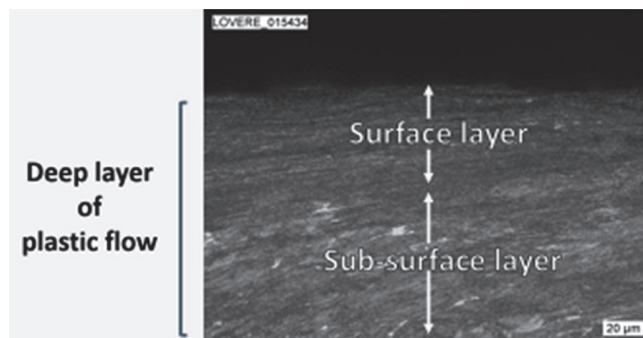


Fig. 12 - Aspetto visivo dei due strati di deformazione plastica.

Fig. 12 - Visual appearance of the deep layer of plastic flow.

The local strain field due to fragments of sand and wear debris entrained into the contact can produce different effects, according to the size-thickness of the surface layer. When this is large, sand effect overlaps to the wheel-rail contact effect and is added to the already intense plastic flow, increasing the probability of incorporating sand and wear debris into the surface layer. This way, a network of subsurface sand veins is formed, as shown in Fig. 7, accelerating delamination, peeling and wear.

In Fig. 13 a SEM micrography of a crack found in one of the analysed wheels is shown. A groove on the external portion of the wheel (indicated as EX), caused by the sand, can be seen. This damage can be defined as “third body indentation and wear”, occurring when hard sand particles are embedded in the softer surface and scratch the harder one, causing the detachment of wear fragments along their path. Under this region (between EX and IN) fragments of crushed sand particles (as confirmed by the shown EDS analysis) trapped into a crack together with steels wear debris are visible. They are responsible for delamination and peeling due to crack propagation under the surface layer, parallel to the tread surface.

In summary, the environments where wheel-rail contact occur can be classified as follows:

- Clean and dry environment with no solid nor liquid contaminants;
- Environment with dry solid contaminants such as dry sand or wear debris;
- Environment with liquid contaminants, such as water, lubricants, wet mixtures.

The main damage phenomenon occurring in a clean and dry environment can be defined as *standard ratchetting* (1): it is related to the wheel-rail normal and tangential force, and generates a “deep layer with plastic flow”. When the plastic strain exceeds the material critical value, fracture occurs and surface cracks initiate.

In presence of sand, in addition to *standard ratchetting* the following phenomena can occur:

frammenti producono anche indentazioni (indentazione da terzo corpo) che causano lo sviluppo dello "strato superficiale di flusso plastico" sovrapposto allo strato subsuperficiale, essendo quest'ultimo dovuto principalmente al "ratcheting standard" (Fig. 12).

- *Usura da ratcheting con delaminazione e peeling (3")*: particelle di sabbia frantumata, agglomerata con frammenti di usura endogeni, vengono intrappolate nel flusso plastico dello strato superficiale innescando un processo di fatica a basso numero di cicli, con gravi effetti di delaminazione e peeling.

In ambienti asciutti sabbiosi, gli effetti 2" e 3" prevalgono sul ratcheting standard. L'effetto complessivo è dato dalla somma di tutti i singoli meccanismi descritti. Per aumentare la resistenza del materiale al danneggiamento in presenza di sostanze contaminanti solide occorre aumentare il limite di snervamento ciclico  $c.YS_{0.2}$ , riducendo la plasticizzazione sia nello strato superficiale che sub-superficiale.

Anche se in paesi desertici la pioggia è un evento raro, durante la notte le temperature scendono sotto il punto di rugiada con la possibile conseguente formazione di condensa e anche ghiaccio sulla parte superiore delle rotaie. Questa può portare alla formazione di una miscela fluida di sabbia sulla superficie ed alla riduzione dell'aderenza tra ruota e rotaia, specialmente in presenza di polvere e foglie.

Oltre al "ratcheting standard", in un ambiente con sostanza contaminante liquida si può verificare il fenomeno seguente:

- *Spalling e formazione di martensite bianca dura e fragile (2")*: il fluido contaminante riduce il coefficiente di attrito nella zona di contatto aumentando lo slittamento tra ruota e rotaia. Quando una ruota slitta, il calore generato può portare alla formazione di uno strato sottile di martensite bianca dura e fragile, che fratturandosi può innescare delle microcricche. Spesso questo strato viene completamente rimosso per effetto del movimento ciclico della ruota, di conseguenza alla fine sono visibili solo segni di ratcheting standard.
- *Propagazione subcritica della cricca dovuta alla pressione del liquido (3")*: il fluido presente nella zona di contatto penetra nelle microcricche innescate dalla rottura della martensite bianca dura e fragile o dal ratcheting standard. Quando il carico vi passa sopra, può chiudere tali cricche e pressurizzare il fluido intrappolato, inducendo una rapida propagazione (effetto pompaggio) [8].

In ambienti piovosi prevalgono gli effetti 2" e 3". Nei deserti, il ghiaccio o la miscela liquida che si formano durante la notte sulla rotaia potrebbero portare agli effetti 2" e 3"; di giorno, si presume che l'usura elimini parzialmente le cricche superficiali, facendo sì che prevalgano ancora gli effetti 2" e 3". La meccanica del danneggiamento con sostanze contaminanti liquide nella zona di contatto

- *Third body indentation and wear (2")*: sand fragments, crushed and agglomerated with the endogenous wear debris, scratch the surface layer: hence, abrasive wear initiates (third-body wear). Such fragments produce also indentations (third-body indentation), causing the development of the "surface layer of plastic flow" superposed to sub-surface layer, the latter being mainly due to "standard ratcheting" (Fig. 12).
- *Ratcheting wear with delamination and peeling (3")*: crushed sand particles, agglomerated with the endogenous wear debris, are trapped into the plastic flow of the surface layer, initiating a low-cycle fatigue process with severe "delamination" and "peeling" effects.

In sandy dry environments, effects 2" and 3" are prevalent with respect to standard ratcheting. The overall effect will be the summation of all the single mechanisms here described. In order to increase the material resistance to damage in presence of solid contaminants, the cyclic yield strength  $c.YS_{0.2}$  should be increased, reducing plasticization both in the surface and sub-surface layer.

Even if in desert countries rain is a rare event, during night time temperatures fall below the dew point and this may result in formation of dew and even frost on the top of the rails. The presence of frost and fluid mixture of sand on the rail may lead to a reduction in friction and available adhesion between wheels and rails, especially in the presence of fine dust and leaves.

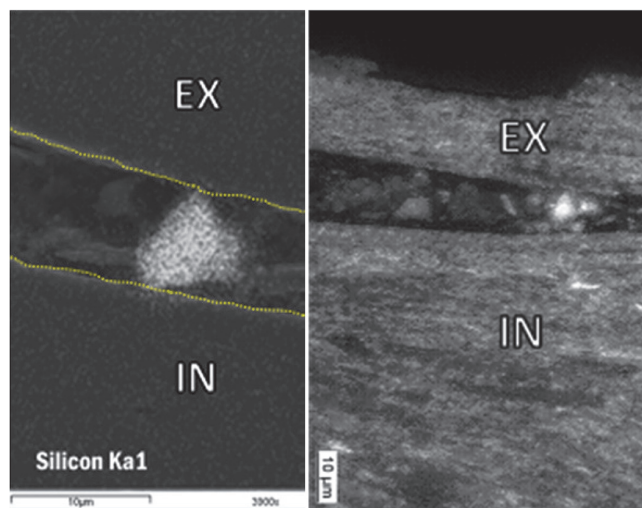


Fig. 13 - Sezione di ruota danneggiata. Sulla posizione esterna (EX) è visibile un segno di usura abrasiva dovuta alla sabbia; tra la posizione esterna (EX) e quella interna (IN) sono visibili frammenti di usura e sabbia intrappolata. A destra: diagramma EDS che mostra la presenza di sabbia ( $SiO_2$ ).

Fig. 13 - Section of damaged wheel. On external (EX) location a mark of abrasive wear due to sand is visible; on the internal (IN) location, trapped sand and wear debris are visible. On the right: EDS map showing the presence of  $SiO_2$ .



to è presente anche nelle curve lubrificate; diventa evidente quando le rotaie sono molto dure e le ruote diventano elementi “sacrificiali” a causa degli effetti 2” e 3”.

È interessante notare che i diversi meccanismi di danneggiamento in presenza di contaminanti, sebbene siano diversi nella meccanica e nelle cause, mostrino molte analogie: in tutti i casi vi è un fenomeno che porta alla nucleazione di cricche superficiali (il ratcheting o la trasformazione martensitica) che di per sé non sarebbe sufficiente a causarne anche la propagazione; subentra poi l'effetto del contaminante (acqua, condensa o sabbia) che provoca la propagazione delle cricche ed il distacco del materiale. La Fig. 14 riassume le classificazioni sopra descritte, evidenziando i meccanismi di danneggiamento che si possono verificare nei diversi ambienti e le relative analogie.

6. Ottimizzazione dei materiali ruota per gli ambienti desertici

Dallo studio dei requisiti chimici AAR, si possono sviluppare diverse famiglie di acciai lavorando sul tenore di silicio e sull'aggiunta intenzionale di elementi residui, disciplinata o non menzionata nella norma AAR. Il caso di acciai micro-legati con elevato tenore di silicio è stato studiato a fondo all'interno della famiglia di acciai SANDLOS® per le norme AAR/JIS e derivate, al fine di

*In addition to “standard ratcheting”, the following phenomena can occur in an environment with liquid contaminant:*

- Spalling and brittle hard white martensite (2’’): *the fluid contaminant in the contact patch decreases the coefficient of friction enhancing sliding. When a wheel slides, the generated heat can lead to the formation of a thin layer of “white brittle-hard martensite”; micro-cracks can initiate by the breakage of this layer. Often this layer is completely detached by the wheel cycling, so that only signs of “standard ratcheting” are visible at the end.*
- Sub-critical crack propagation due to liquid pressure (3’’): *the fluid in contact area can enhance crack propagation by means of a “pumping effect”. Micro-cracks, initiated by the breakage of the “white brittle-hard martensite” or by the “standard ratcheting”, can be filled by the fluid. When the load passes over, it can close the crack mouth and pressurise the entrapped fluid, inducing rapid propagation [8].*

*In rainy environments, effects 2’’ and 3’’ are prevalent. In the deserts, the frost or liquid mixture formed by night on the rail could induce effects 2’’ and 3’’; by day, wear is expected to partially remove and clean the surface cracks, leading again effects 2’’ and 3’’ to prevail. The mechanics of damage with liquid contaminants in the patch is present also in lubricated curves; it becomes evident when rails are very hard and wheels become “sacrificial” elements, because of the appearance of effects 2’’ and 3’’.*

*It is striking to note that the damage mechanisms in presence of contaminants, although different in details and in the driving force, show many similarities: in all cases there is a phenomenon leading to surface crack nucleation (ratcheting or martensitic transition) which alone would not be enough to cause crack propagation; the effect of the contaminant (water, moisture or sand) is then to cause crack propagation and material detachment. Fig. 14 summarizes the classifications described above, identifying the damage mechanisms that can occur in different environments and evidencing their analogies.*

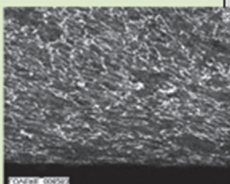
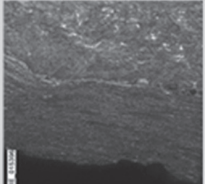
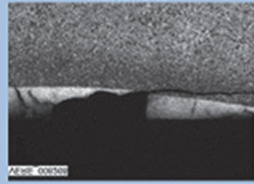
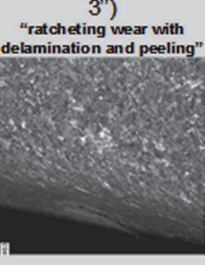
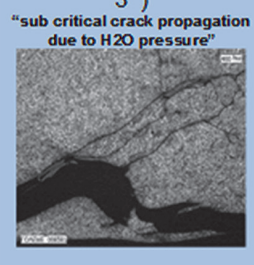
Simplified model of damaging behavior	POTENTIAL ENVIRONMENTS INTO THE CONTACT PATCH		
	“with exogenous contaminants”		
Appearance of the main damage	a) “clean and dry” See Point 1) 1) “standard ratcheting” 	b) “solid contaminants” in dry conditions See Points 1)+2’)+3’’) 2’) “third-body indentation and wear” 	c) “liquid contaminants” in wet conditions See point 1)+2’’)+3’’) 2’’) “spalling and brittle white martensite” 
	Legenda: a) “clean and dry” environment, without sand and H2O. b) environment with “solid contaminants” in dry conditions, like dry sand. c) with “liquid contaminants” (H2O/lubricants/moistures in wet conditions).	3’) “ratcheting wear with delamination and peeling” 	3’’) “sub critical crack propagation due to H2O pressure” 
Main requirements to be improved in the material design	Improvement of cyclic yield strength C.Y.S.		Improvement of the martensite transformation resistance.

Fig. 14 - Classificazione dei possibili meccanismi di danneggiamento in diversi ambienti.

Fig. 14 - Classification of potential damage occurring in different environments.

6. Optimization of wheel material design for desert environments

*From the study of AAR chemical requirements, different families of steel grades can be developed, working on the silica content and on the intention-*

aumentarne la resistenza allo snervamento ciclico  $\sigma_{c,YS_{0.2}}$  e la resistenza alla fatica da contatto. Sono state sviluppate tre soluzioni alternative agli acciai AAR Classe B, C, D. La Tabella 4 riporta un sommario delle caratteristiche meccaniche richieste e ottenute. I dati sono solo a scopo informativo.

Queste proprietà permettono la riduzione dei meccanismi di “indentazione e usura da terzo corpo” e “usura da ratcheting con delaminazione” sopra descritti. Infatti, guardando la Tabella 3, la velocità di usura dell'ER8, il materiale più tenero testato, è di circa 2,5 volte più elevata rispetto a quella del SANDLOS® H nelle prove con sabbia.

I tre diversi gradi di SANDLOS® proposti possono coprire l'intera gamma di durezza dei tradizionali acciai AAR Classe B, C, D, non sovrapponendosi ad essi, ma proponendo un'alternativa andando a coprire la parte alta dell'intervallo ammesso.

Gli acciai della famiglia SANDLOS® sono idonei non solo agli ambienti sabbiosi, ma anche a tutti i casi in cui è richiesto il miglioramento delle caratteristiche meccaniche o della vita della ruota. Fra questi, il trasporto passeggeri ed il trasporto pesante, applicazioni nelle quali i sempre maggiori carichi per assile mettono in crisi la resistenza a fatica delle ruote.

Per garantire che le prestazioni dei materiali innovativi siano migliori rispetto a quelle dei materiali tradizionali, devono essere raccolti sul campo, durante un periodo di monitoraggio, molti dati relativi all'usura delle ruote e alla riprofilatura. Queste attività multidisciplinari sono in fase di svolgimento e comprendono anche l'uso di sistemi smart per il monitoraggio, l'autodiagnostica e la tracciabilità dei parchi carrozze, al fine di permettere una manutenzione preventiva e una sicurezza attiva.

al addition of residuals regulated or not mentioned in the AAR standard. The case of micro-alloyed grades with high silica content has been deeply developed by Lucchini RS in the SANDLOS® family of steel grades for AAR/JIS standards and derived ones, in order to increase the cyclic yield stress  $\sigma_{c,YS_{0.2}}$  and the RCF strength. Three solutions alternative to the AAR Class B, C, D grades have been developed; a rapid summary of required and obtained mechanical characteristics is shown in Table 4. The collection of data is for information only.

These properties allow reducing the mechanisms of “third-body indentation and wear” and “ratcheting wear with delamination and peeling” described above. In fact, looking at Table 3, the wear rate of ER8, the softer tested material, is approximately 2.5 times higher than that of SANDLOS® H in the tests with sand.

The three different grades of SANDLOS® proposed by Lucchini RS can cover the whole range of hardness of the usual AAR Class B, C, D grades, avoiding overlapping with them and covering the higher band of the AAR ranges.

The SANDLOS® family grades is suitable not only to sandy environments, but also in all the cases in which an increasing in mechanical characteristics or a longer wheel life are required, included mass transit transportation and heavy haul applications, where improvement in axle load could cause increasing of wear and RCF damages.

In order to be able to give an absolute guarantee that innovative materials will perform better than the traditional ones for a fleet, the data on wheel wear and re-machining of the profile have to be collected along a period of monitoring. These multidisciplinary activities are in progress in cooperative monitoring programs between Lucchini RS and cus-

Tabella 4 – Table 4

Confronto delle proprietà di SANDLOS® con i requisiti LRS e AAR per acciai Classe B, Classe C e Classe D  
Comparison of SANDLOS® properties with AAR and LRS requirements for Class B, Class C and Class D steels

	Classe B requisiti AAR+LRS Class B AAR + LRS requirements	SANDLOS® Media SANDLOS® average	Classe C requisiti AAR+LRS Class CAAR + LRS requirements	SANDLOS® S Media SANDLOS® S average	Classe D requisiti AAR+LRS Class D AAR + LRS requirements	SANDLOS® H Media SANDLOS® H average
HB (superficie di rotolamento) HB (tread surface)	305 ÷ 340	325	325 ÷ 360	350	355 ÷ 415	390
HB (profondità 5 mm) HB (depth 5 mm)	≥290	300	≥320	330	≥350	365
HB (profondità 35 mm) HB (depth 35 mm)	FIO	320	FIO	345	FIO	380
$\sigma_{c,YS_{0.2}}$ [MPa]	≥670	690	≥720	750	≥770	800
UTS [MPa]	1000÷1150	1110	1100÷1250	1220	1220÷1380	1310
$\sigma_{c,YS_{0.2}}$ [MPa]	560 (media UPLOS®)	600	640 (media UPLOS®)	660	680 (media UPLOS®)	720
$\epsilon_f$	-	0,50	-	0,37	-	0,34
$K_Q$ [MPa×m <sup>0.5</sup> ]	≥45 (35)	55	≥40 (30)	50	≥35 (25)	40

## 7. Conclusioni

Alcune ruote ferroviarie usurate impiegate in ambienti desertici sono state studiate per indagare i meccanismi di danneggiamento. Sono state eseguite prove di laboratorio su scala ridotta su vari provini di diversi acciai su banco prova bi-disc, con l'aggiunta di sabbia all'interfaccia di contatto. Tramite un modello ad elementi finiti (FEM) è stato simulato il processo di danneggiamento dei provini in presenza di sabbia.

Questi studi hanno permesso di individuare i meccanismi di danneggiamento che si possono verificare in ambienti puliti o contaminati con sostanze liquide o solide. Nello specifico, l'"indentazione e usura da terzo corpo" e l'"usura da ratcheting con delaminazione" sono i principali meccanismi di danneggiamento in presenza di contaminanti solidi, mentre lo "spalling e formazione di martensite bianca dura-fragile" e la "propagazione subcritica delle cricche per pressurizzazione del liquido" prevalgono in ambienti contaminati da sostanze liquide. Questi meccanismi possono coesistere nei deserti a causa dell'elevata escursione termica giornaliera che porta alla condensa di umidità sulle rotaie di notte, oppure in tratti ferroviari con rotaie lubrificate.

I nuovi acciai per ruote della famiglia SANDLOS®, elaborati nel rispetto delle normative AAR, sono stati pensati per ambienti particolarmente difficili come, ma non solo, quello desertico. Ruote in acciai SANDLOS® sono state recentemente introdotte in servizio in Paesi come il Sudafrica e l'Arabia Saudita; si attende il feed-back sul lungo periodo da parte dei clienti.

tomers, including also the use of smart systems for the monitoring, the self-diagnostic and the tracking of the fleets, in order to enable predictive maintenance and active safety.

## 7. Conclusions

Worn railway wheels used in desert environment were analysed and tested in order to investigate the damage mechanisms. Small scale laboratory tests on various wheel steels specimens were carried out by a bi-disc machine with the addition of sand at the contact interface. The damage process of the wheel and rail steel specimens with sand contamination was simulated by FEM.

These studies allowed identifying the damage mechanisms that can occur in clean, solid contaminated or liquid contaminated environments. In particular, "third body indentation and wear" and "ratcheting wear with delamination and peeling" are the main damage mechanisms in solid contaminated environments, whereas "spalling and brittle hard white martensite" and "subcritical crack propagation due to liquid pressure" are prevalent in liquid contaminated environments. These mechanisms can coexist in deserts, due to the high daily thermal excursion inducing humidity condensation on the rails by night, or in railway sections with lubricated rails.

Lucchini RS developed a new family of wheel steels, named SANDLOS®, which respects the AAR requirements and is mainly, but not only, addressed at desert environment. Wheels in SANDLOS® steels have been recently introduced in service in countries such as South Africa and Saudi Arabia; a long-period feed-back is expected from the customers.

## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] M. FACCOLI, C. PETROGALLI, M. LANCINI, A. GHIDINI, A. MAZZÙ, "Effect of desert sand on wear and rolling contact fatigue behaviour of various railway wheel steels", *Wear* 396-397 (2018), 146-147.
- [2] D.G. GRIEVE, R.R. DWYER-JONES, J.H. BEYNON, "Abrasive wear of railway track by solid contaminants", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 215 Part F (2001), 193-205.
- [3] W.J. WANG, R. LEWIS, B. YANG, L.C. GUO, Q.Y. LIU, M.H. ZHU, "Wear and damage transitions of wheel and rail materials under various contact conditions", *Wear* 362-363 (2016), 146-152.
- [4] A. GHIDINI, M. FACCOLI, A. MAZZÙ, "SANLOS® wheels for desert environments", *Series LRS-Techno*, Lucchini RS, 2017.
- [5] R. LEWIS, R.S. DWYER-JOYCE, "Wear at the wheel/rail interface when sanding is used to increase adhesion", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 220 Part F (2006), 29-41.
- [6] M. WOLDMAN, T. TINGA, E. VAN DER HEIDE, M.A. MASEN, "Abrasive wear based predictive maintenance for systems operating in sandy conditions", *Wear* 338-339 (2015), 316-324.
- [7] W.J. WANG, H.F. ZHANG, H.Y. WANG, Q.Y. LIU, M.H. ZHU, "Study of the adhesion behavior of wheel/rail under oil, water and sanding conditions", *Wear* 271 (2011), 2693-2698.
- [8] S. MAYA-JOHNSON, J.F. SANTA, A. TORO, "Dry and lubricated wear of rail steel under rolling contact fatigue - Wear mechanisms and crack growth", *Wear* 380-381 (2017), 240-250.