

Considerazioni sulla microstruttura di ruote monoblocco con tracce di bainite

Considerations about microstructure of solid wheels with traces of bainite

Andrea GHIDINI^(*)
 Markus DIENER^(**)
 Angelo MAZZU^(***)
 Nicola ZANI^(***)
 Candida PETROGALLI^(***)
 Michela FACCOLI^(***)

Nomenclatura

C.YS	Resistenza allo snervamento ciclico
E	Modulo elastico
EPSILON f	Deformazione a rottura
HB	Durezza Brinell
I.P.	Indice di produzione
K_{EE}	Tenacità da energia equivalente
K_Q	Tenacità a frattura
M.YS	Resistenza allo snervamento monotonic
n	Parametro plastico del materiale
PEEQ	Deformazione plastica equivalente di Von Mises
Z	Strizione percentuale
α	Deformazione plastica ciclica convenzionale
ΔK_{th}	Fattore di intensificazione della soglia degli sforzi

Sommario - Lo scopo di questo articolo è quello di chiarire gli effetti della presenza di tracce di bainite all'interno della microstruttura perlitica lamellare omogenea di ruote ferroviarie in prossimità della pista di rotolamento. La bainite è una struttura intermedia, sempre in sovrapposizione con la perlite, che si forma durante il trattamento termico di acciai temprati e rinvenuti, nonostante la sua quantità possa essere controllata, poiché dipende anche dalla composizione chimica e dalle curve CCT dell'acciaio. La gestione del processo garantisce un adeguato livello di durezza e proprietà meccaniche nella ruota. La formazione di bainite è inevitabile durante il raffreddamento continuo di acciai al C ipo-eutetoidici (ER7, ER8, ER8S, ER9) in cui il Carbonio Equivalente superi lo 0,6%. Al fine di ridurre la presenza di tracce bainitiche nel rotolamento della ruota, Lucchini RS

Nomenclature

C.YS	Cyclic yield strength
E	Elastic modulus
EPSILON f	Ductility parameter
HB	Brinell hardness
I.P.	Quality index
K_{EE}	Equivalent energy toughness
K_Q	Fracture toughness
M.YS	Monotonic yield strength
n	Plastic exponent
Z	Reduction of Area
PEEQ	Von Mises equivalent plastic strain
α	Conventional cyclic yield deformation
ΔK_{th}	Fatigue threshold

Summary - The aim of this paper is to clarify the effects of bainitic spots in the homogeneous lamellar pearlite structure of wheels located near the tread. Bainite is an intermediate structure, always in overlapping with pearlite, which is formed during the heat treatment of quenched and tempered steels, even though its quantity can be controlled depending also on the chemical analysis and CCT diagrams of the steel. The process management guarantees a proper level of hardness and mechanical properties in the wheel. The formation of bainite is inevitable during the continuous cooling of hypo-eutectoid C steel grades (ER7, ER8, ER8S, ER9) where the Carbon Equivalent is exceeding 0.6%. In order to mitigate the presence of bainitic islands on the tread, Lucchini RS is working since a long period toward the calibration of a special aim analysis and an adapted design. According to the hardenability of the new aim analysis, the cooling rate of the devices for rim chilling was defined, with the objective to both reduce bainitic

^(*) Lucchini RS, Via G. Paglia, 45, 24065 Lovere (BG), Italia.

^(**) Department of Materials, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, CH-8093 Zurich, Svizzera.

^(***) Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale, Università degli studi di Brescia, Via Branze, 38, 25123 Brescia, Italia.

^(*) Lucchini RS, Via G. Paglia, 45, 24065 Lovere (BG), Italy.

^(**) Department of Materials, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, CH-8093 Zurich, Switzerland.

^(***) Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Brescia, Via Branze, 38, 25123 Brescia, Italy.

sta lavorando da molto tempo alla calibrazione di un'analisi chimica mirata e ad un design idoneo. In base alla temprabilità data dalla nuova composizione chimica, è stata definita la velocità di raffreddamento per il rim chilling della corona, con l'obiettivo sia di ridurre le strutture bainitiche sia di ottenere proprietà idonee di durezza e tenacità nella corona. È stato proposto un metodo di misurazione del contenuto di bainite ed è stato utilizzato su ruote ER7, ER8 ed ER8S dopo l'attivazione di tutte le azioni di miglioramento. Inoltre, al fine di studiare qualitativamente l'effetto della presenza di bainite nelle ruote, sono state eseguite simulazioni 2D agli elementi finiti (FE) in stato di deformazione piana.

1. Introduzione

L'esame delle curve TTT (*Time-Temperature-Transformation*) di un acciaio euttettoide al carbonio, tenuto conto che la trasformazione perlitica ha luogo ad alta temperatura tra 550°C e 720°C e che la formazione della martensite avviene a bassa temperatura, rivela che c'è un ampio range di temperatura, solitamente tra 250°C e 550°C, in cui nessuna di queste strutture si forma. Questa è la regione nella quale si formano, in condizioni isoterme, fini aggregati aciculari di ferrite e cementite, mediante trasformazioni che possiedono alcune delle proprietà delle reazioni che hanno luogo ad alta temperatura per la ferrite e la perlite, insieme a caratteristiche della trasformazione martensitica. Il termine generico usato per queste strutture intermedie è bainite.

La bainite si può formare anche durante trattamenti termici anisotermi per effetto di velocità di raffreddamento più elevate di quelle che determinano la formazione della perlite, ma non abbastanza elevate per produrre martensite.

La natura della bainite cambia all'abbassarsi della temperatura di formazione. Se ne possono identificare due morfologie: bainite superiore e bainite inferiore [1],[2]. Tecnicamente, possiamo dire che la bainite è una struttura intermedia costituita da un aggregato non-lamellare di ferrite (α -Fe) e carburi (Fe_3C). La bainite può essere presente negli acciai legati e si forma per effetto di velocità di raffreddamento superiori rispetto a quelle che determinano la formazione della perlite anche per effetto della segregazione cioè di composizioni chimiche localmente differenti.

Ci sono buone ragioni per non volere bainite nella corona di una ruota ferroviaria. Il motivo più rilevante è il peggioramento del comportamento ad usura. La maggiore velocità di usura della bainite, documentata da Diener e Ghidini [3], la rende indesiderata. Le strutture perlitiche rimangono le migliori dal punto di vista della resistenza ad usura. Di conseguenza, l'intera circonferenza della corona dovrebbe avere la medesima microstruttura perlitica.

Una delle principali sfide nella produzione di ruote ferroviarie è il miglioramento della tenacità e della resi-

strutture and obtain hardness and toughness properties in the rim. A method of bainite content measurement was proposed and used on ER7, ER8 and ER8S wheels after the activation of all the improvement actions. Furthermore, in order to qualitatively investigate the effect of the presence of bainite structures in the wheels, 2D plain strain finite element (FE) simulations were carried out.

1. Introduction

Examination of the TTT (*Time-Temperature-Transformation*) diagram for an eutectoid carbon steel, bearing in mind that the pearlite reaction is essentially a high temperature one occurring between 550°C and 720°C and that the formation of martensite is a low temperature reaction, reveals that there is a wide range of temperature, usually from 250°C to 550°C, when neither of these phases forms. This is the region in which, in isothermal condition, lath-shaped fine aggregates of ferrite and cementite are formed which possess some of the properties of the high temperature reactions involving ferrite and pearlite as well as some of the characteristics of the martensite reaction. The generic term for these intermediate structures is bainite.

Bainite can also form during non-isothermal heat treatments at cooling rates higher than pearlite transformation, yet not rapid enough to produce martensite.

The nature of bainite changes as the formation temperature is lowered. Two main forms can be identified, upper and lower bainite [1],[2]. In technical terms, we can say that bainite is an intermediate structure and a non-lamellar aggregate of ferrite (α -Fe) and carbides (Fe_3C). Bainite can be found in alloyed steels and it forms by cooling rates which are higher than those to obtain pearlite also due to segregation which means locally different chemical compositions.

There are good reasons to have no bainite in a wheel rim. The important factor for railways is the reduced-wear behavior. The higher wear rates of bainite, documented by Diener and Ghidini [3], make it not desired. In this case, the pearlitic structure remains the best with respect to the wear behavior. As a consequence, the whole circumference of the wheel rim should have the same pearlitic microstructure.

One of the main challenges for the production of railway wheels is to improve toughness in parallel with yield strength by maintaining a desired microstructure of the material. The important correlation between structure and fracture toughness shows the manufacturer how properties can be tuned. Today the production of solid wheels, monitored over a long period, have confirmed the ability to guarantee both high and uniform values of mechanical characteristics and toughness. This is an important result concerning product quality and safety of railway wheels. Fracture toughness and yield strength represent an appropriate quality index for any material and steel grade and can be clearly represented as shown in Fig. 1 for the steel quality R7/ER7 [3]. To trace the quality of a material in produc-

stenza allo snervamento mantenendo la microstruttura del materiale desiderata. Oggi la produzione di ruote monoblocco, monitorata sul lungo periodo, ha confermato la capacità di garantire valori elevati ed uniformi di proprietà meccaniche e tenacità. Questo è un importante risultato per la qualità e la sicurezza delle ruote ferroviarie. Tenacità alla frattura e resistenza allo snervamento rappresentano un appropriato indice di qualità per ogni materiale e grado di acciaio e possono essere rappresentati chiaramente come mostrato in Fig. 1 per l'acciaio R7/ER7 [3]. Per tracciare la qualità di un materiale in fase di produzione è stato introdotto l'indice I.P. di produzione dato dal prodotto della resistenza allo snervamento per la tenacità alla frattura ($I.P. = M.YS \times K_Q$). L'indice di produzione descritto è in grado di monitorare nel tempo l'evoluzione dei materiali; come noto, la resistenza allo snervamento del materiale M.YS rappresenta il limite elastico dello stesso, cioè il valore al di sopra del quale il materiale si deforma permanentemente, mentre il parametro K_Q rappresenta la tenacità a frattura del materiale, cioè la capacità dello stesso di resistere a rotture fragili, in presenza di difetti che si propagano in modo sub-critico. Il prodotto dei due parametri M.YS e K_Q diviene una misura importante del bilanciamento tra resistenza e tenacità. Se si confrontano i valori di questo indice di produzione nel tempo, ci si rende conto che, grazie al miglioramento dei processi di fabbricazione dell'acciaio e di trattamento termico dei materiali, le curve si sono spostate verso destra e verso l'alto. In Fig. 1 sono riportati due valori di soglia importanti per il settore ferroviario e, in particolare, per le ruote frenate a ceppi in ER7 EN13262, che sono:

- il valore di snervamento M.YS minimo da garantire nel rotolamento della ruota per l'acciaio ER7 EN13262 ($R_{p02} \geq 520$ MPa);
- il valore del fattore di intensificazione degli sforzi K_Q minimo da garantire per evitare rotture fragili in ruote frenate a ceppi ($K_Q \geq 80$ MPa $\sqrt{m}$).

In Fig. 1 è rappresentata un'area tratteggiata, al di sopra dei valori minimi di M.YS = 520 MPa e di K_Q = 80 MPa $\sqrt{m}$. In questa area tratteggiata si collocano i materiali ER7 dell'ultima generazione, che mostrano un equilibrio ottimale tra resistenza allo snervamento e tenacità a frattura, raggiunto grazie all'evoluzione tangibile dei processi di progettazione dei materiali, di fabbricazione dell'acciaio, di trattamento termico di questi ultimi anni.

La composizione chimica e le condizioni di trattamento termico di una ruota sono specifiche per ogni grado di acciaio. Molteplici ragioni possono influenzare la scelta di un materiale di ruota, come la resistenza ad usura, la resistenza meccanica, ed ultimo ma non per importanza il costo. In ogni caso, la microstruttura è responsabile per l'ottenimento di adeguate caratteristiche meccaniche inclusa la tenacità alla frattura. La necessità di un valore di tenacità abbastanza alto associato ad una resistenza sufficiente è ben nota. L'introduzione della normativa EN13262 [4] è stata a suo tempo un passo importante verso la garanzia di migliori proprietà per gli acciai ER7/ER8/ER9.

tion, a so-called production index, which is the product of yield strength and fracture toughness ($I.P. = M.YS \times K_Q$), is introduced. The production index described is able to monitor the evolution of materials over time; as known, the yield strength M.YS of the material represents its elastic limit, that is the value above which the material permanently deforms, while the parameter K_Q represents the fracture toughness of the material, that is the ability of the material to avoid brittle fractures, in presence of defects that propagate sub-critically. The product of the two parameters M.YS and K_Q becomes an important measure of the balance between strength and toughness. If we compare the values of this production index I.P. over time, we realize that, thanks to the improvement of steel manufacturing processes and thermal treatment of materials, the curves have shifted to the right and upwards. In Fig. 1 two important threshold values are reported for the railway sector and, in particular, for shoe braked wheels in ER7 EN13262, which are:

- the minimum yield value M.YS to be guaranteed in the tread of the wheel for ER7 EN13262 steel ($R_{p02} \geq 520$ MPa);
- the value of the K_Q stress intensity factor to be guaranteed to avoid brittle fractures on braked wheels ($K_Q \geq 80$ MPa $\sqrt{m}$).

In Fig. 1 a hatched area is represented, above the minimum values of $R_{p02} = 520$ MPa and of $K_Q = 80$ MPa $\sqrt{m}$. In this dotted area we find the last generation ER7 materials, which show an optimal balance between yield strength and fracture toughness, achieved thanks to the tangible evolution of the materials design processes, steelmaking and heat treatment of these last years.

The chemical composition and the heat-treatment condition of a wheel are specified by the material grade. Many reasons can influence the choice of wheel material such as

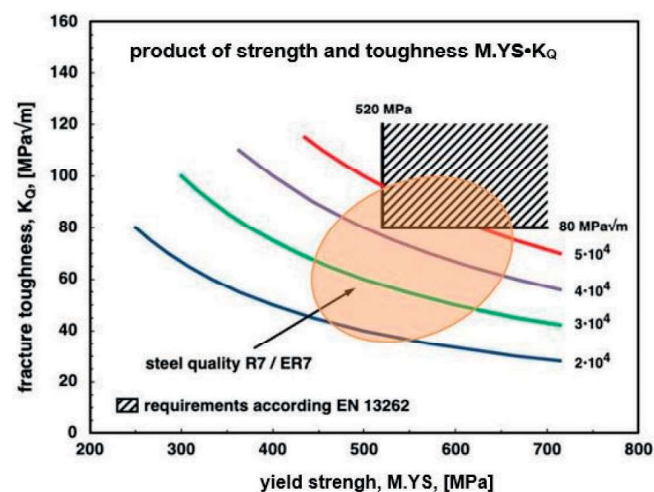


Figura 1 – Resistenza e tenacità delle ruote (acciaio R7/ER7) [3].

Figure 1 – Strength and toughness of wheels (steel quality R7/ER7) [3].

L'evoluzione ed il progresso tecnico nella fabbricazione delle ruote per l'alta velocità sono un buon esempio di come gli aspetti sopra menzionati siano stati acquisiti. In questo ambito si è sempre alla ricerca di una maggiore durata della ruota, per questa ragione le ruote per l'alta velocità sono andate incontro ad un continuo miglioramento nel tempo, che ha permesso loro di raggiungere performance impensabili fino ad una decina di anni fa. Richieste sempre più stringenti dal settore dei trasporti ferroviari ha spinto i produttori ad un continuo miglioramento dei loro processi produttivi e li ha spinti a lavorare estesamente sul *material design* delle ruote.

2. Materiali per ruote per l'alta velocità ed applicazioni speciali

I materiali per ruote più comunemente utilizzati per l'alta velocità e per applicazioni speciali sono ad oggi acciai al carbonio con un tenore di carbonio di circa 0,45-0,60 wt%, allo stato *rim chilled* (condizione di trattamento termico indicata con T) [5], così da ottenere una microstruttura prevalentemente perlitica in prossimità della superficie di rotolamento ed uno stato di tensioni residue di compressione nella corona. Esistono diverse normative e designazioni degli acciai, ma i gradi più utilizzati per l'alta velocità e per impieghi speciali sono quelli riassunti in Tab. 1, secondo la normativa EN13262 [4]. Tutti i gradi menzionati sono adatti per ruote frenate a disco, mentre quelli evidenziati in verde sono utilizzati anche per ruote frenate a ceppi.

In Europa sono due i gradi di acciaio prevalentemente utilizzati sui treni:

- il grado ER7 è quello dominante sui treni merci e su molti vagoni passeggeri che utilizzano la frenatura a ceppi;

Tabella 1 – Table 1

Principali materiali per ruote utilizzati per l'alta velocità e per speciali applicazioni

Main wheel materials use for high speed service and for special applications

Standard	Steel grade	LRS Brand	Carbon (wt%)
EN 13262	ER6*	E.R6 UPLOS®	≤ 0.48
	ER7*	E.R7 UPLOS®	≤ 0.52
		HYPERLOS®	
	ER8	E.R8 UPLOS®	≤ 0.56
		ARCTICLOS®	
	ERS8	SUPERLOS®	≤ 0.60
	ER9	E.R9 UPLOS®	

*Steel grades mostly used for block braking applications are marked in green

wear resistance, strength, and last but not least costs. Anyway, the microstructure is responsible for adequate mechanical properties including the fracture toughness. The need for a rather high toughness value together with a sufficient strength is generally known. The introduction of the standard EN13262 [4] was an important step forward to guarantee better properties for the steel qualities ER7/ER8/ER9.

The evolution and the technical progress in fabrication of wheels for High Speed service is a good example how the above-mentioned points were transferred. Such services are always in search of longer wheel life. For this reason, wheels for High Speed service have undergone continuous improvement over time, which has led them to achieve performances unthinkable up to ten years ago. Ever more stringent requirements from the railway sector have led wheel manufacturers to continuously implement their production processes and to work extensively on materials design of wheels.

2. Wheel materials for High Speed Service and special applications

The most common wheel materials used for High Speed service and for special applications today are carbon steels with around 0.45-0.60 wt% carbon content, all rim chilled (T heat treatment condition) [5], to give a prevalently pearlitic microstructure close to the tread surface and compressive stresses into the rim. Different standards and steel designations exist around the world, but the most used grades for High Speed service and for special applications are those summarized in Tab. 1, according to EN13262 standard [4]. All the mentioned steel grades are suited for disc braked wheelsets, while those underlined in green are also used for block braking applications.

In Europe, there are two grades that are mostly used on trains:

- ER7 grade is the dominating grade on freight trains and on many passenger coaches using block braking;
- ER8 grade, with slightly higher carbon content, is often used for passenger trains with driven wheels, so called EMUs (Electric Multiple Units).

Optimization of wheel materials design for High Speed applications in our professional experience is based on the improvement of EN13262 ER7, ER8, ERS8, ER9 standard grades, with the LRS brands: E.R7 UPLOS®, E.R8 UPLOS®, SUPERLOS®, E.R9 UPLOS®. In particular, SUPERLOS® steel is a silicon and manganese carbon steel [6] with peculiar pearlitic microstructure and allotropic characteristics. The chemical analysis and microstructure assure improvement of mechanical properties (wear and rolling contact fatigue (RCF) resistance) [7],[8],[9]. The particular allotropic characteristics also delay martensite formation, during the fast cooling, following sliding. SUPERLOS® has been successful in reducing wear and rolling contact fatigue and, after a period of in-service monitoring, have been approved by specific Railways (for example the BS 5892-3:

- il grado ER8, con un tenore di carbonio leggermente più alto, è spesso utilizzato per treni passeggeri con ruote motrici, chiamati EMUs (Electric Multiple Units).

L'ottimizzazione del design del materiale per ruote per applicazioni nell'alta velocità nella nostra esperienza professionale si basa sul miglioramento dei gradi standard ER7, ER8, ERS8, ER9, secondo normativa EN13262, con l'introduzione dei brand LRS E.R7 UPLOS®, E.R8 UPLOS®, SUPERLOS®, E.R9 UPLOS®. In particolare, il SUPERLOS® è un acciaio al carbonio, al silicio e manganese [6] con una specifica microstruttura perlitica e caratteristiche allotropiche. L'analisi chimica e la microstruttura assicurano un miglioramento delle proprietà meccaniche (resistenza all'usura e alla fatica da contatto (RCF)) [7],[8],[9]. Le particolari proprietà allotropiche ritardano anche la formazione della martensite durante il raffreddamento veloce, che segue lo slittamento della ruota. Con l'impiego del SUPERLOS® si è ottenuta una riduzione dell'usura e della fatica da contatto della ruota e, dopo un periodo di monitoraggio in servizio, è stato approvato da alcune specifiche Ferrovie (tra cui si annoverano la BS 5892-3: 1992 + A2.2009 e capitolati cinesi per l'alta velocità.). La normativa EN 13262 nella nuova revisione, che dovrebbe uscire nel corso del 2020, sta introducendo il grado ERS8, molto simile al SUPERLOS® in termini di requisiti di accettabilità di analisi chimica e proprietà meccaniche.

Grazie al positivo feedback raccolto nel tempo a livello mondiale dall'impiego nell'alta velocità dei gradi E.R7 UPLOS®, E.R8 UPLOS® and SUPERLOS® [6], si è deciso di lavorare ancora su questi gradi, per migliorarne le performance in ogni applicazione e condizione ambientale [10]. Una versione innovativa del tradizionale grado ER7 è l'HYPERLOS®, adatto non solo per specifiche applicazioni "sui generis" come le ruote frenate a ceppi per l'alta velocità, ma utilizzabile per tutte le ruote frenate sulla superficie di rotolamento [5], incluse applicazioni merci, con prestazioni che hanno un forte impatto sul *Total Life Cycle Cost* (TLCC).

Come mostrato in Fig. 2, la frenatura a disco è una tecnologia tipica dell'alta velocità, mentre la frenatura a ceppi è tipica dei vagoni merci. Nell'ultimo periodo, si sono visti vagoni per il trasporto pesante, che hanno introdotto la frenatura a disco sull'as-

1992 + A2.2009 and Chinese Standards for High Speed service). The standard EN 13262 in the new revision, that probably will be published in 2020, is introducing the ERS8 grade, very similar to SUPERLOS® in terms of chemical analysis and mechanical properties acceptability requirements.

Thanks to the positive feedback collected from High Speed service of E.R7 UPLOS®, E.R8 UPLOS® and SUPERLOS® worldwide over time [6], it was decided to work again on these grades, in order to improve performances in any application and environmental conditions [10]. An innovative version of the traditional ER7 steel grade is the HYPERLOS®, suitable not only to the "sui generis" specific applications as tread braked High Speed wheels, but adoptable for all tread-braked wheels [5], freight applications included, with collected performances that have a strong impact on Total Life Cycle Cost (TLCC).

As shown in Fig. 2, disc braking is a technology typical of High Speed, while shoe-braking is a technology typical of

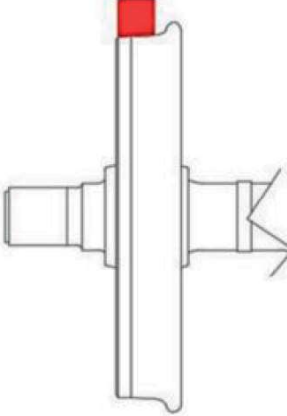
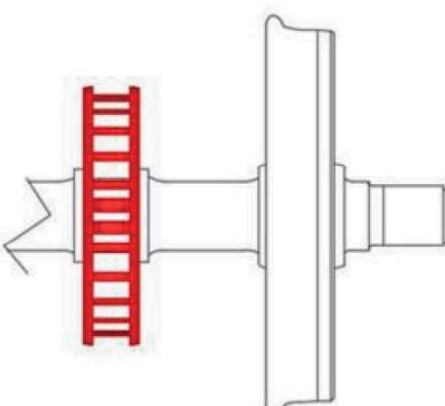
	Shoe braking implies: - additional and potentially too severe overheating and thermal stresses in the wheel rim; - high wear levels of brake shoes and wheels; - high noise emission. In any case, shoe braking grant some real advantages: - simple design, because it uses directly the wheel for heat transfer and as the friction partner; - weight advantage, due to not installing brake discs: rotating masses can be reduced up to 130 kg for wheelset; - the positive "cleaning action" of the brake shoe on the wheel tread surface removes RCF damages at their early stage and improves the adhesion between track and wheel.
The disc brake solution surpasses the tread brake one, due to several reasons: -thermo-mechanical stresses are not onto the wheel; -higher performance, especially at high speed, because the friction coefficient is less dependent on pressure and speed; -higher driving comfort and lower noise emission.	

Figura 2 – Ruota con freno a ceppo versus ruota con freno a disco: vantaggi e svantaggi.

Figure 2 – Wheelset with shoe brake versus wheelset with disc brake: advantages and disadvantages.

sile, per eliminare gli sforzi termici generati sulla ruota. La nostra azienda sta sviluppando particolari soluzioni frenanti per l'alta velocità, che combinano la frenatura elettro-magnetica con quella a ceppi, che vedono il ritorno della frenatura a ceppi applicata in un settore high-tech come quello dell'alta velocità. Per questa specifica applicazione, è nata la necessità di sviluppare gradi innovativi di acciai per ruote che possano resistere a carichi meccanici e termici per più di 2 milioni di km nel trasporto passeggeri.

3. Miglioramento metallurgico di materiali per ruote per l'alta velocità ed applicazioni speciali: stato dell'arte

Lucchini sviluppa da anni gradi di acciai per l'alta velocità e per applicazioni speciali, con l'obiettivo di rendere questi materiali sempre più tenaci, resistenti ed in linea con le richieste sempre crescenti del mercato del ferroviario. La storia evolutiva del grado di acciaio ER7 è, per esempio, descritta dettagliatamente in [3]: un ampio numero di prove su R7T e gradi simili sono state condotte e raccolte nel periodo 1986-2006 (circa 90 000 campioni) e dal 2007 in poi (circa 50 000 campioni nel periodo 2007-2018). I valori della tenacità alla frattura K_Q e K_{EE} della produzione di R7T, combinati con il controllo della micropulizia e della microstruttura, sono stati analizzati e lo scenario che si presenta è il seguente:

- una crescita progressiva dei valori medi;
- una riduzione progressiva della deviazione standard;
- nessun caso di cedimento in servizio dovuto al materiale.

I risultati ottenuti sono riassunti in Fig. 3. Il continuo miglioramento dei principali Indicatori di Qualità dell'acciaio R7T e gradi simili è principalmente dovuto al continuo miglioramento nel design del materiale, combinato con l'innovazione continua nel processo produttivo [11].

Per raggiungere i risultati richiesti dalle sempre più stringenti specifiche, la nostra azienda ha adottato per i processi produttivi degli acciai le seguenti principali linee guida:

- a) Processo produttivo di acciai *Super-Clean*;
- b) Stretto controllo dello stato microinclusionale;
- c) Appropriata calibrazione dell'analisi chimica;
- d) Appropriata ottimizzazione del processo di forgia;
- e) Un trattamento termico di *rim-chilling* ben bilanciato.

4. Effetto di tracce di strutture intermedie nella perlite e nella ferrite

Un aspetto molto importante in fase di sviluppo riguarda il voler ridurre il più possibile la presenza di strutture bainitiche o strutture intermedie nella zona superficiale della corona, che sono dovute alla velocità di

freight wagons. In the last period, we have seen more advanced heavy haul wagons, which have introduced the disc braking on the axle, to remove the wheel thermal stresses. In the main time, our Company is also going to develop very peculiar braking solutions for High Speed application trains, combining electro-magnetic braking with wheel tread braking, that see the return to the solution of the shoe-braking to such a high-tech sector like High Speed as well. Due to this peculiar application, the need arises to develop innovative wheel steel grades able to withstand mechanical and thermal loads for more than 2 million km in passenger transportation is born.

3. Metallurgical improvement of wheel materials for High Speed service and special applications: state of the art

Lucchini has been developing for years steel grades for High Speed service and for special applications, to make it ever more tough, resistant and in line with the ever-increasing needs of railway market. The evolutionary history of R7 steel grade is, for instance, well described in [3], to which reference is made for all the details of the case: a large number of tests on R7T and similar grades were measured and collected in the 1986 - 2006 timespan (about 90 000 samples) and since 2007 onwards (about 50 000 samples in the timespan 2007-2018). K_Q and K_{EE} fracture toughness values of R7T production, combined with the control of micro-cleanliness and microstructure, have been analyzed, showing the following scenario:

- *a progressive increasing of the average values;*
- *a progressive reduction in standard deviation;*
- *no failure cases in service due to the material.*

The obtained results are summarized in Fig. 3. The continuous improvement of the main important Quality Indicators of R7T and similar grades is mainly due to the continuous materials design and improvement, combined with the continuous manufacturing process innovation [11].

To reach the results required by the more and more stringent specification, our Company has adopted for the manufacturing processes of their steel grades the following main guidelines:

- 1) *Super-Clean steel grade manufacturing process;*
- 2) *Narrow control of the micro-inclusion state;*
- 3) *Proper calibration of chemical analysis;*
- 4) *Proper optimizing of the forging process;*
- 5) *A well-balanced heat treatment process of rim chilling.*

4. Effect of traces of intermediate structures in the pearlite and ferrite

A very important point in development is the effort to reduce as much as possible the presence of bainitic structure or intermediate structures at the surface of the rim,

raffreddamento impiegata durante il *rim chilling*. I principali motivi per cui è auspicabile avere la quantità più bassa possibile di strutture intermedie/bainitiche nella perlite e nella ferrite dell'acciaio UPLOS® sono:

- aumento dei valori di tenacità a frattura K_Q sul materiale base della ruota;
- miglior controllo della decrescita di K_Q , dopo esposizione ad elevate temperature, dovute al sovraccarico termico generato dalla frenatura a ceppi;
- riduzione dell'energia di innesco delle cricche (più elevati valori di ΔK_{th});
- aumento della resistenza all'usura e a fatica per contatto ciclico (RCF);
- diminuzione degli episodi di *Out of Roundness* (OOR) (poligonalizzazione).

La nostra azienda negli ultimi anni ha lavorato sulla progettazione dei materiali per migliorare i seguenti parametri:

- micro-omogeneità della struttura del materiale base, che deve essere prevalentemente perlite e ferrite con la quantità più bassa possibile di strutture residue, chiamate intermedie;
- omogeneità nella circonferenza sulla superficie della ruota, che dipende anche dalla lavorazione di finitura della stessa.

A volte osservando ad alto ingrandimento un campione metallografico, come mostrato in Fig. 4, nella perlite lamellare di ruote di tipo ER7/ER8/ER9 possono essere rilevate alcune zone di microstruttura intermedia o bainitica, localizzate vicino alla fascia di rotolamento.

La formazione di bainite durante il raffreddamento continuo è un processo di trasformazione complesso che produce una miscela di fasi di morfologia complessa. In Fig. 5 viene mostrato un esempio di curva CCT (*Continuous Cooling Transformation*) che descrive la trasformazione dell'austenite (in essa, la zona verde si riferisce al campo di trasformazione della struttura intermedia chiamata bainite, B = bainite, F = ferrite e P = perlite). Con velocità di raffreddamento elevate, solo una parte dell'austenite può trasformarsi in struttura ferritica o ferritico/perlitica, prima che la trasformazione cessi. Potrà poi ricominciare a temperature più basse con la formazione della bainite. Nel caso degli acciai con tenore di carbonio medio-alto (C = 0,5%), il periodo

due to the cooling rate during rim chilling. There are good reasons to have as low as possible amount of intermediate/bainitic structures in the pearlite and ferrite of UPLOS® steel grades. The main of which are described as follows:

- the increasing in fracture toughness K_Q values on the base material of the wheel;
- the improved control of K_Q degradation, after exposure to elevated temperatures, due to thermal overloading of shoe braking applications;
- the decreasing in potential initiation of cracks: higher fatigue threshold (ΔK_{th}) values;
- the increasing in wear and Rolling Contact Fatigue (RCF) resistance;
- the decreasing in potential stochastic Out of Roundness (OOR) occurrence.

During the materials design review performed in the last years, our Company has worked to improve the following parameters:

- the micro-homogeneity of the structure of the base material, that needs to be prevalently pearlite and ferrite with the amount of residual structure, called intermediate structures as low as possible;
- the homogeneity in the circumference at the surface of the wheel, that depends on the final machining process of the wheel.

YEAR	LRS Steel grade	M.YS [MPa]	C.YS [MPa]	Z [%]	EPSILON f	K _Q [MPa√m]	K _{EE} [MPa√m]
1986	R7T according to FS and UIC 812.3	500	350	51	0.71	80	91
1996	R7T According to FS	520	380	54	0.78	86	102
2006	ER7 UPLOS® I.T. MET R10 Rev. 3	550	410	56	0.82	89	126
2016	HYPERLOS® I.T. MET R116 Rev. 1	560	420	58	0.86	93	127

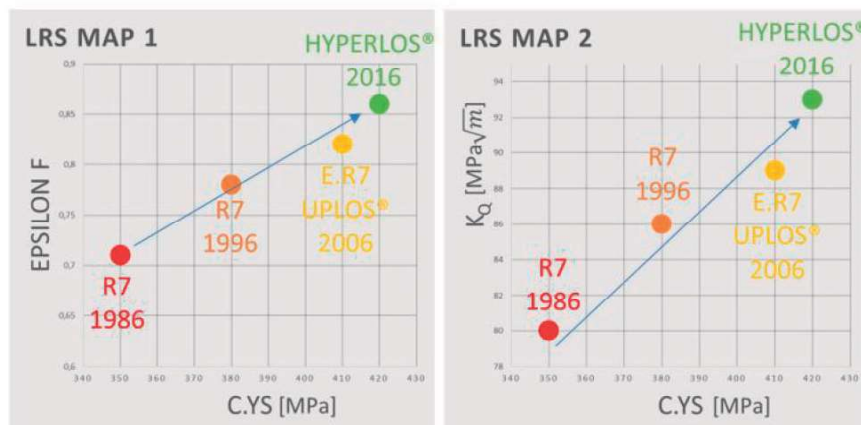


Figura 3 – I principali indicatori di qualità per ogni decade sono riportati e analizzati allo scopo di mettere in evidenza il trend di continuo miglioramento nel tempo, registrato nel design del materiale della classe R7T.

Figure 3 – The main quality indicators for every decade are plotted and analyzed in order to put in evidence the trend of continuous improvement over time, recorded in materials design of R7T grade family.

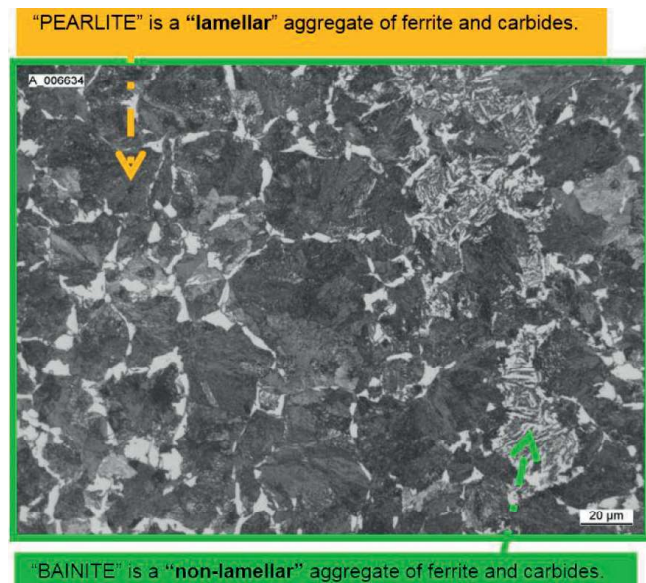


Figura 4 – Micrografia che mostra tracce di struttura bainitica nella struttura perlitica lamellare omogenea in prossimità della superficie di rotolamento di una ruota in ER7.
Figure 4 – Micrograph showing spots of bainitic structure in the homogeneous lamellar pearlite structure located near the tread of an ER7 type wheel.

di tempo per la trasformazione bainitica durante la fase di raffreddamento continuo è piuttosto lungo.

5. Miglioramenti recenti introdotti nel processo di fabbricazione

Ogni posizione lungo la sezione radiale della ruota è caratterizzata da una diversa velocità di raffreddamento che è più alta vicino alla fascia di rotolamento e decresce lungo il raggio. Questo fattore viene accentuato dal trattamento termico di *rim chilling*, condotto per ottenere elevata durezza (raffreddamento in acqua) nella corona ed elevate duttilità e tenacità nella cartella (raffreddamento in aria). Le diverse velocità di raffreddamento producono diverse microstrutture nella matrice dell'acciaio caratterizzate da diversi livelli di durezza.

Le curve CCT vengono anche influenzate localmente dalle micro-segregazioni (piccole differenze nella composizione chimica); che derivano naturalmente dalla solidificazione del lingotto, e dal contenuto di elementi che cambiano la posizione e l'estensione del campo bainitico (campo B in Fig. 5). Anche se la formazione di bainite è inevitabile durante il raffreddamento continuo di acciai al C ipo-eutetoidici, le azioni che sono state messe a punto per ridurre la quantità possono essere sintetizzate come segue:

- Progetto di una composizione chimica ottimizzata, aggiungendo alcuni elementi chimici (come C, Mn, Si) e riducendone altri (elementi residui come Cr, Ni, Mo, V, Nb) nella corretta combinazione e in quantità esattamente predefinita, allo scopo di produrre l'effe-

Sometimes, some spots of intermediate structure or bainitic structure in the homogeneous lamellar pearlite structure of ER7/ER8/ER9 type wheels, located near the tread, can be detected in a metallographic sample with high magnification, as shown in Fig. 4.

The formation of bainite on continuous cooling is a complex transformation process producing a microstructural phase mixture of complex morphology. An example of CCT (Continuous Cooling Transformation) diagram that describes the austenite transformation is shown in Fig. 5 (the green area refers to the field of transformation of the intermediate structure called bainite, B = bainite, F = ferrite and P = pearlite). Under rapid cooling, only a part of the available austenite may transform into ferritic or ferritic/pearlitic structures, before the transformation ceases completely. Transformation may then be restarted at lower temperatures by another mechanism, with bainite formation. In the cases of medium-high carbon steels ($C = 0.5\%$), the time period for bainitic transformation on continuous cooling is quite long.

5. Recent Improved actions introduced in the manufacturing process

Every position in a wheel tread radial section is affected by a different cooling rate, the highest cooling rate being on the tread surface and the lowest one close in the rim to web transition. This is even more accentuated by the rim chilling heat treatment, applied to obtain high hardness in the rim (water quenched) and high ductility and toughness in the web (air cooling). The different cooling rates on the tread generate different micro-structures in the steel matrix, characterized by different levels of hardness.

CCT diagrams are also locally influenced by micro-seg-

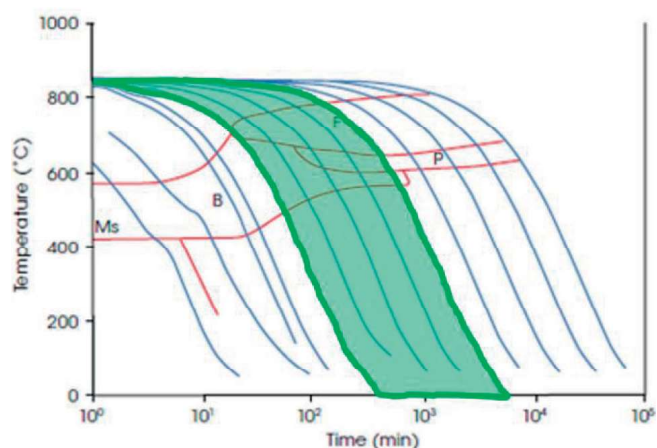


Figura 5 – I diagrammi CCT sono il principale strumento che consente di spiegare perché strutture intermedie o bainitiche si possono formare durante il raffreddamento in ruote sottoposte a *rim chilling*.

Figure 5 – CCT diagrams are the main tool, in order to explain why intermediate or bainitic structures can form during cooling in the rim chilled wheels.

to desiderato di alterare le curve CCT dell'acciaio, riducendo l'estensione del campo bainitico e spostando il più possibile verso sinistra tale campo;

- miglioramento e regolazione della velocità di raffreddamento durante il *rim chilling*;
- nuovo design dello spessore sul diametro della ruota prima del *rim chilling*, allo scopo di concentrare il massimo contenuto di strutture bainitiche in uno strato esterno, che viene rimosso dopo il *rim chilling* mediante lavorazione meccanica.

Nella Fig. 6 possiamo confrontare i risultati ottenuti in una vecchia produzione (2015) rispetto ad una nuova (2018) di ruote in ER8 UPLOS®. Gli effetti di un adeguato bilanciamento tra analisi chimica e parametri di trattamento termico sono tangibili: la giusta combinazione e quantità di alcuni elementi nell'acciaio altera l'estensione del campo bainitico provocando un effetto benefico.

L'esperienza nella produzione di gradi speciali derivati da acciai tipo ER7/ER8/ERS8 ed ER9 ha confermato la capacità della nostra azienda di sviluppare nuovi materiali, dotati di caratteristiche meccaniche e tenacità elevate e omogenee. Tutto questo è anche caratterizzato da un'elevata sostenibilità ottenuta attraverso la produzione di acciaio utilizzando i processi industriali più innovativi e le tecnologie più avanzate ed efficienti, il tutto nel rispetto della filosofia C2C (*Cradle to Cradle*) [12].

6. Modello Numerico

Per studiare qualitativamente l'effetto della presenza delle strutture bainitiche nelle ruote ferroviarie, sono state eseguite simulazioni agli elementi finiti (FE) 2D in stato di deformazione piana. Inoltre, è stata sfruttata la tecnica del *sub-modelling*. Questa tecnica richiede un primo modello, d'ora in poi chiamato "modello globale", i cui risultati costituiscono le condizioni al contorno di un modello più piccolo ("sottomodello"). Per i nostri scopi, il modello globale rappresenta un modello in scala 1:1 raffigurante l'accoppiamento ruota-rotaila con materiale omogeneo perlitico; mentre il secondo modello (il sottomodello) riproduce un'area localizzata nel substrato della ruota. Nel sottomodello vengono introdotte le fasi bainitiche nella matrice perlitica.

a. Proprietà del modello

La Fig. 7 mostra il modello agli elementi finiti. Nel modello globale, la ruota è rappresentata come un rettangolo, mentre la rotaia come una porzione di cerchio.

regation (small local changes in chemical composition), that naturally comes from ingot solidification, and by content of elements that change the position and the extension of the bainitic field (area B in Fig. 5). Even if the formation of bainite is inevitable in the continuous cooling of hypoeutectoid C steel grades actions to reduce its amount can be summarized as follows:

- *Design of a new optimized chemical analysis, adding some elements (like C, Mn, Si) and decreasing other elements (residuals like Cr, Ni, Mo, V, Nb) in the right combination and precise quantity, in order to produce the desirable effect of altering the CCT chart, reducing the extension of the bainitic field and moving as far as possible the field towards the left;*
- *Improvement and setting of the cooling rate during the rim chilling;*
- *New design of the amount of thickness on the wheel diameter before rim chilling in order to concentrate the maximum content of bainitic structures into an external layer, that is then fully machined after rim chilling.*

In Fig. 6 we can compare results obtained in an old production (2015) versus a new one (2018) of wheels in E.R8 UPLOS®. The effects of a suited balancing between chemical analysis and heat treatment parameters are tangible: adding or decreasing certain elements to steel, in the right combination and precise quantity, produces many desirable effects as well as altering the extension of the bainitic field.

The experience on the manufacturing of special grades derived from ER7/ER8/ERS8 and ER9 over time have confirmed the capacity of our Company to develop the new grades, with their high and homogeneous values of me-

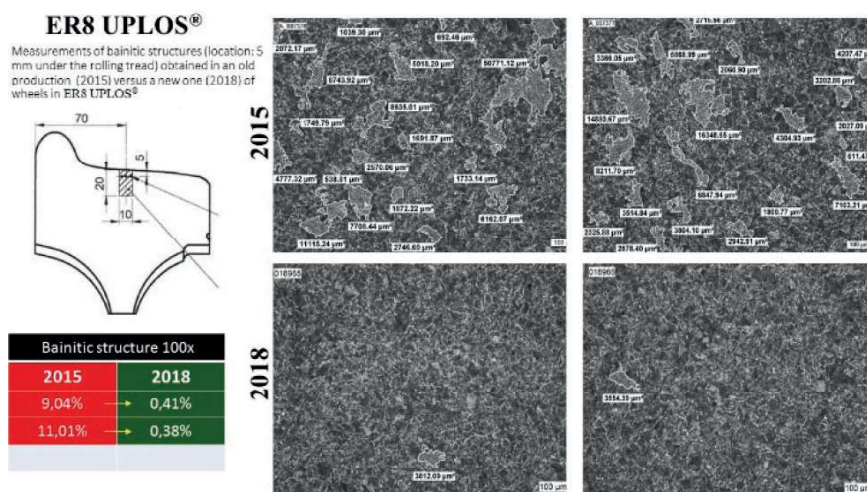


Figura 6 – Misure di strutture bainitiche (posizione: 5 mm sotto la fascia di rotolamento) ottenute in una vecchia produzione (2015) versus una recente (2018) di ruote in E.R8 UPLOS®.

Figure 6 – Measurements of bainitic structures (location: 5 mm under the rolling tread) obtained in an old production (2015) versus a new one (2018) of wheels in E.R8 UPLOS®.

Le dimensioni dei due sono state scelte in modo tale che le condizioni al contorno non influenzino la regione di interesse. La parte inferiore della ruota è fissa, mentre la porzione superiore della rotaia è vincolata ad un punto di riferimento (il centro del cerchio stesso); il coefficiente d'attrito tra le due superfici è posto pari a 0,5; il carico normale di 100 kN corrisponde ad un carico per asse di 20 t; lo spessore del modello di 6,12 mm comporta una pressione Hertziana massima di 1100 MPa e una semi-ampiezza di contatto $b = 8,74$ mm; la rotazione e la traslazione orizzontale della rotaia sono tali da simulare uno slittamento pari a 1%. La regione del sottomodello, ricavata dalla ruota, consiste in un rettangolo di dimensioni 1,18 mm x 0,9 mm il cui centro è collocato a 5 mm al di sotto della superficie. La dimensione del rettangolo è la medesima delle micrografie eseguite ad un ingrandimento di 100x (vedi Fig. 6).

L'analisi statistica della distribuzione della bainite nelle ruote realizzate in acciaio E.R8 ci ha permesso di scegliere la forma e la quantità di questo costituente. Va ricordato che i dati raccolti si riferiscono ad una profondità di 15 mm, mentre la regione del sottomodello è posta a 5 mm. Tuttavia, in seguito alle operazioni di riprofilatura, le regioni più profonde raggiungono la superficie e, di conseguenza, i risultati ottenuti a 15 mm dalla superficie possono essere trasferiti in zone meno profonde. Il parametro geometrico introdotto per studiare la dimensione delle bainiti è il "raggio equivalente" riferito ad un cerchio avente la stessa area delle isole bainitiche. La Tab. 2 riporta la media aritmetica e la deviazione standard di cinque provini ispezionati; poiché la media del raggio equivalente risulta pari a 74,78 μm , le fasi bainitiche vengono rappresentate nel modello come cerchi di raggio 75 μm (vedi Fig. 7b).

Per quanto concerne la quantità di fase bainitica, sono stati elaborati cinque modelli aggiungendo gradual-

mente le caratteristiche meccaniche e la tenacità allo stesso tempo. L'alta sostenibilità delle nostre soluzioni materiali è portata avanti grazie alla produzione d'acciaio integrata nei processi industriali più innovativi e alle tecnologie più avanzate ed efficienti, secondo la filosofia Cradle to Cradle (C2C) [12].

6. Numerical modelling

In order to qualitatively investigate the effect of the presence of bainite structures in train wheels, 2D plain strain finite element (FE) simulations were carried out. Moreover, the sub-modelling technique was exploited. This technique requires a former model, henceforth called "global model", used to generate a boundary condition for a smaller model. For our purpose the global model represents a full-scale model portraying wheel-rail coupling with homogeneous materials with pearlite properties; whereas the latter model ("the submodel") represents an area located in the subsurface of the wheel. In the submodel, bainite was considered too.

a. Model properties

Fig. 7 shows the FE models. In the global model, the wheel is represented as a rectangle, whereas the rail is modelled by a portion of circle.

The dimensions were chosen such that the boundary conditions may not influence the results in the region of interest. The bottom of the wheel is fixed, while the portion of the rail is constrained to a reference point (the center of the circle). The coefficient of friction between the contact surfaces is set to 0.5. Normal load is applied to 100 kN, corresponding to an axle load of 20 t. According to the model thickness of 6.12 mm, this results in a maximum Hertz pressure of 1100 MPa and a semi-amplitude of contact area $b = 8.74$ mm. Rotation and horizontal displacement of the rail model is determined as 1% slip ratio. The region for the submodel was extracted from the wheel component. It consists in a rectangle 1.18 mm x 0.9 mm whose center is set 5 mm below the wheel surface. The dimension of this rectangle is the same as the one of the micrographs made under 100x magnification (see Fig. 6). The shape and the quantity of bainite were chosen after a statistical study of the distribution of this phase in E.R8 wheels. It should be highlighted that the data were taken from a depth of 15 mm, while the region of the submodel is located at 5 mm. However, as a consequence of the reprofiling operation, the deeper regions reach the surface of the wheel and, therefore, the outcomes obtained at 15

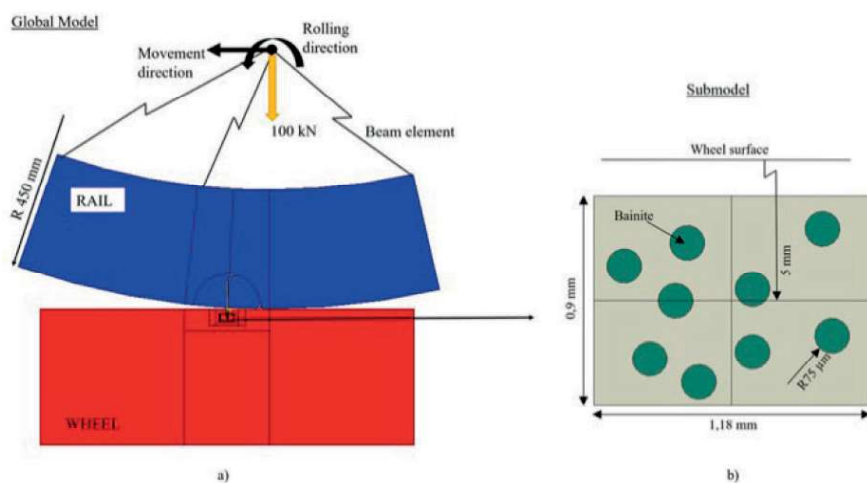


Figura 7 – Modello agli elementi finiti (FE): a) modello globale; b) modello con strutture bainitiche.

Figure 7 – Finite element analysis model: a) global model; b) submodel with bainitic phases.

Tabella 2 – Table 2

Media e deviazione standard del raggio equivalente e massima quantità di bainite nei cinque campioni analizzati
Mean and standard deviation of the equivalent radius and maximum quantity of bainite constituents in the five specimens analysed special applications

Specimen	Mean radius [μm]	St. Dev. [μm]	Bainite Max quantity
1	67.14	53.85	21%
2	80.19	41.97	17.50%
3	72.07	27.97	18.41%
4	66.06	25.70	10.35%
5	77.76	67.44	11%

mente il 5% di bainite fino al raggiungimento di una quantità pari al 25% dell'area del sottomodello.

b. Proprietà dei materiali

I materiali scelti per ruota e rotaia sono, rispettivamente, E.R8 UPLOS® e R350HT. Poiché l'interesse delle simulazioni risiede nell'effetto delle diverse fasi metallurgiche nelle ruote sulla deformazione plastica, le proprietà plastiche dei materiali devono essere note. Lo snervamento ciclico C.YS è stato definito come limite elastico del materiale [3],[6],[13].

Lo snervamento ciclico della matrice perlitica dell'acciaio E.R8 UPLOS® è stato ricavato sperimentalmente. Lo snervamento ciclico per la fase bainitica dell'E.R8 UPLOS® e per l'acciaio R350HT, invece, è stato stimato dalla seguente relazione che lega la durezza Brinell HB e lo snervamento ciclico C.YS [14]:

$$C.YS[MPa] = -0.0121 \cdot HB^2 + 10.84 \cdot HB - 1389 \quad (1)$$

ottenuta interpolando i dati degli acciai per ruote prodotti dalla nostra azienda [3],[6],[13].

Il modello costitutivo è stato approssimato tramite la legge di Ramberg-Osgood:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left(\frac{\sigma}{C.YS} \right)^n \quad (2)$$

dove σ e ϵ sono, rispettivamente, gli sforzi e le deformazioni, E è il modulo elastico di Young, α è la deformazione plastica ciclica convenzionale, $C.YS$ è lo snervamento ciclico e n è un parametro plastico del materiale. La deformazione plastica $\alpha \left(\frac{\sigma}{C.YS} \right)^n$ è presa in considerazione solo per sforzi oltre lo snervamento ciclico.

Le proprietà dei materiali sono riportate nella Tab. 3.

mm far from the surface can be transferred in less deep regions. The geometric parameter introduced to study the bainite dimension was the "equivalent radius" referred to a circle having the same area as the one of the bainite. Tab. 2 shows the arithmetical mean and the standard deviation of equivalent radius distribution for five inspected specimens; given the mean of the radius equal to 74.78 μm, the bainitic islands were represented in the models as circles of 75 μm radius (see Fig. 7b). When it comes to the quantity of bainite, five models were made by gradually adding the 5% of bainite till this constituent reaches the 25% of the investigated area.

b. Material properties

E.R8 UPLOS® and R350HT European steels were chosen for the wheel and the rail respectively. Since the interest of the simulations lies in the effect of different metallurgical phases in wheels on plastic strain, plastic properties of the material must be known. The elastic limit considered was the cyclic yield strength C.YS [3],[6],[13].

E.R8 UPLOS® pearlitic cyclic yield strength was obtained through experimental tests. C.YS for E.R8 UPLOS® bainite and R350HT were estimated by the means of the following relationship between the Brinell hardness HB and the cyclic yield strength C.YS [14]:

$$C.YS[MPa] = -0.0121 \cdot HB^2 + 10.84 \cdot HB - 1389 \quad (1)$$

obtained by interpolating the known data of a number of wheel steels produced by our Company [3],[6],[13].

The constitutive law was approximated through the Ramberg-Osgood model:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left(\frac{\sigma}{C.YS} \right)^n \quad (2)$$

where σ and ϵ are the stress and the strain, respectively, E is the elastic modulus, α is the conventional cyclic yield deformation, $C.YS$ is the cyclic yield strength and n is the plastic exponent. The plastic strain $\alpha \left(\frac{\sigma}{C.YS} \right)^n$ was considered only for stress exceeding the cyclic yield strength. Material properties are shown in Tab. 3.

c. Results

Fig. 8 shows the Von Mises equivalent plastic strain (PEEQ) calculated in the submodels in full pearlitic steel (0% of bainite) and in presence of bainite. At first sight we can notice that the bainitic structures are deformed less than the pearlitic matrix, in virtue of bainite higher cyclic yield strength. Bainitic equivalent plastic strain is about 20÷25% less than plastic strain in matrix according to the studied cases. However, if we compare the fully pearlitic model (Fig. 8a) with the non-homogenous ones, maximum plastic deformation in the model increases in presence of bainite. This behavior is due to the stress distribution in

Tabella 3 – Table 3

Proprietà del materiale per la perlite e la bainite negli acciai E.R8 UPLOS® e R350HT

Material properties for pearlite and bainite phases in E.R8 UPLOS® and R350HT

	Average HB	E [GPa]	C.YS [MPa]	α [%]	n
ER8 pearlite	275	206	470	0.2	5
ER8 bainite	283	206	495	0.2	5
R350HT	370	206	685	0.2	5

c. Risultati

La Fig. 8 mostra la deformazione plastica equivalente di Von Mises (PEEQ) calcolata nei sottomodelli nell'acciaio interamente perlitico (0% di bainite) e in presenza di bainite. Si può notare come le strutture bainitiche si deformino meno della matrice perlitica, grazie al maggiore snervamento ciclico della bainite rispetto alla perlite. La deformazione plastica equivalente della bainite è circa il 20÷25% inferiore alla deformazione plastica della matrice, nei casi analizzati. Tuttavia, se confrontiamo il modello interamente perlitico (Fig. 8a) con i modelli non omogenei, la massima deformazione plastica aumenta in presenza di bainite. Questo fenomeno è da imputare alla distribuzione degli sforzi all'interfaccia tra perlite e bainite, poiché la fase più dura esercita un effetto intaglio su quella più tenera.

La Fig. 9 mostra un esempio della distribuzione nel sottomodello: in ogni interfaccia ci sono regioni con sforzi maggiori e minori di quelli riscontrati nella perlite o nella bainite. In merito alla distribuzione delle isole bainitiche, anche la distanza tra queste sembra giocare un ruolo non trascurabile.

Quando le fasi più dure sono poche e abbastanza distanti, queste non interferiscono le une sulle altre e l'effetto degli sforzi all'interfaccia è limitato alle singole isole (vedi Fig. 8b-c).

Tuttavia, all'aumentare della quantità di bainite e con il diminuire della distanza tra le isole bainitiche (vedi Fig. 8 d-e-f), l'aumento degli sforzi all'interfaccia interessa l'intera regione tra le bainiti: il risultato è una più grande regione sottoposta ad un'elevata deformazione plastica. Questo suggerisce l'esistenza di una soglia critica di quantità di bainite al di sopra della quale le prestazioni della ruota sono drasticamente influenzate dalla presenza di questo costituente strutturale. Infatti, un peggioramento meccanico della ruota può essere previsto sia in termini di

the interface between bainite and pearlite, since the harder phase acts as a notch effect.

Fig. 9 shows an example of the stress distribution in the submodel and we can notice that in every interface there are regions with both higher and lower stress than pearlite and bainite. As for as the quantity and the distribution of bainitic islands are concerned, also the distance between them seems to play an important role. When the harder phases are few and far enough, they do not interfere one another and the effect of the stress in the interface seen above is limited to the single island (see Fig. 8b-c).

However, when the bainite amount increases and the bainites are nearer (see Fig. 8d-e-f), the stress increment in the interface effects the whole region between the bainites, giving as a result a bigger area with high plastic deformation. This suggests that there could be a threshold of bainite quantity over which the wheel performance is dramatically affected by this structural constituent. Indeed, a worse mechanical behaviour of the wheel can be foreseen with respect to both the fatigue behaviour, due to more extended regions with high plastic strain, and wear damage, because of the bainite higher wear rate than pearlite. In the simulations proposed here, the limit can be considered about 10%.

In conclusion, from the point of view of plastic deformation, bainitic structures are likely to improve the fatigue behavior of wheels. Indeed, a gradually increase of bainite quantity by a certain threshold results in a reduction of the mostly deformed area and, consequently, a progressive increase of the component fatigue resistance.

Anyway, the current study was unable to predict the wear behavior, which could not be neglected in presence of harder phases, like bainite. A more comprehensive study of

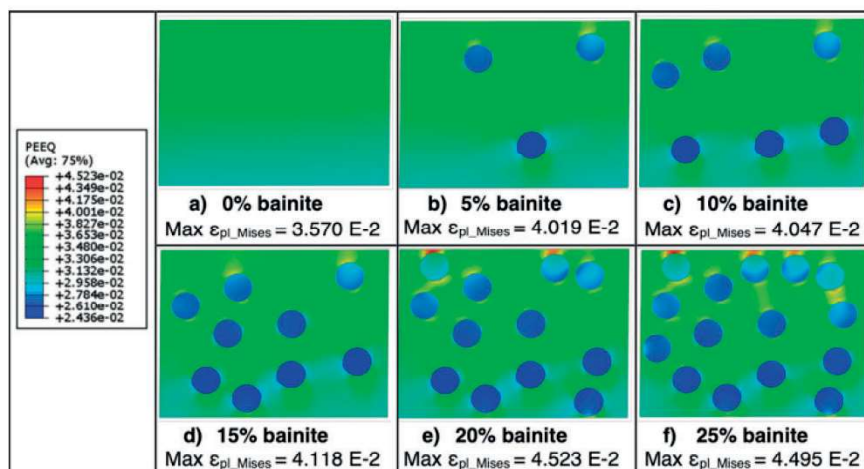


Figura 8 – Deformazione plastica equivalente di Von Mises nei modelli. Tutti i risultati sono riferiti alla stessa scala di misura.

Figure 8 – Von Mises equivalent plastic strain in the submodels. All the results are referred to the same scale of measure.

fatica, a causa di una maggiore zona interessata ad elevata deformazione plastica, sia in termini di usura, a causa del maggiore tasso di usura della bainite rispetto alla perlite. Nelle simulazioni qui proposte, la soglia limite può essere considerata del 10%.

In conclusione, dal punto di vista della deformazione plastica, le strutture bainitiche potrebbero migliorare il comportamento a fatica delle ruote. Un graduale incremento della quantità di bainite, entro una determinata soglia, comporta una diminuzione dell'area maggiormente deformata e, di conseguenza, un progressivo aumento della resistenza a fatica del componente.

Uno studio più approfondito riguardo la fatica potrebbe includere la presenza di cricche nella matrice perlitica e ulteriori simulazioni agli elementi finiti contribuirebbero a capire se la presenza di bainiti possa accelerare o rallentare la propagazione delle cricche.

7. Conclusioni

La bainite è una struttura intermedia che, insieme alla ferrite e alla perlite, si ottiene in acciai ipo-eutettoidici attraverso il raffreddamento continuo di componenti di grandi dimensioni, ad esempio ruote ferroviarie. Una parte esterna della corona avrà sempre una certa percentuale di suddette strutture intermedie che si ridurranno progressivamente a zero con il crescere della distanza dalla superficie esterna. Inoltre, la loro formazione è influenzata dalle micro-segregazioni (piccole variazioni locali nella composizione chimica) originate durante la solidificazione del lingotto e dalla presenza di alcuni elementi di lega che cambiano la posizione e l'estensione del campo bainitico nelle curve CCT.

Nonostante la formazione della bainite sia inevitabile durante il processo di raffreddamento continuo di un acciaio ipo-eutettoidico, come dimostrato anche da calcoli ottenuti con software commerciali (per es. JmatPro), è possibile adottare delle azioni selettive per ridurre la quantità delle strutture intermedie attraverso:

- l'elaborazione di una nuova composizione chimica ottimizzata;
- il perfezionamento e la regolazione della velocità di raffreddamento durante il *rim chilling*;
- una nuova progettazione dello spessore lungo il diametro della ruota prima del *rim chilling*.

Dalle simulazioni 2D agli elementi finiti si possono trarre le seguenti conclusioni:

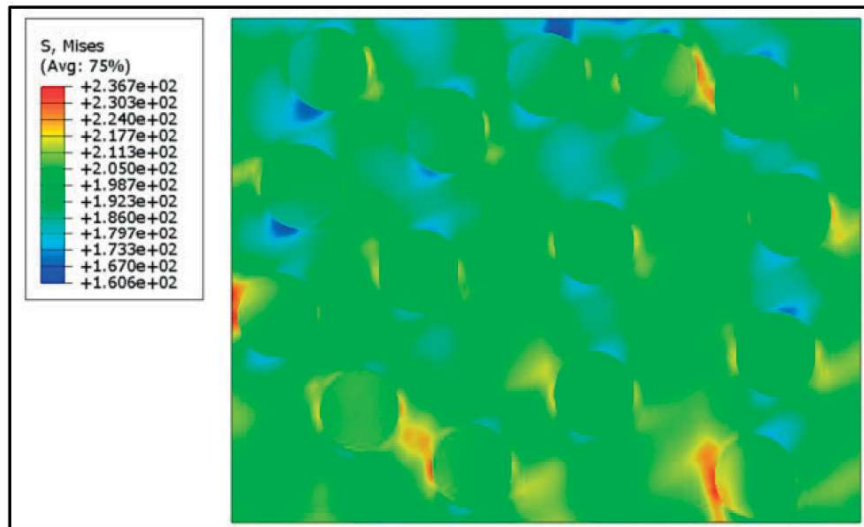


Figura 9 – Sforzo di Von Mises nel modello con 25% di bainite. Le aree all'interfaccia registrano uno sforzo più alto e più basso della perlite e del cuore della bainite.

Figure 9 – Von Mises stress in submodel with 25% of bainite. The interface areas record Chigher and lower stress than the pearlite and the core of bainite.

fatigue would include the presence of cracks in pearlitic phase; FE simulations should be carried out in order to understand whether the presence of bainite might accelerate or not the crack propagation.

7. Conclusions

Bainite is an intermediate structure, always in overlapping with ferrite and pearlite, during continuous cooling of large sizes, like wheels, in hypo-eutectoid C steel grades. An external part of the wheel rim will always have a certain content of intermediate structures, that will progressively be reduced to near zero with the increase of distance from the external surface. The formation is also locally influenced by micro-segregation (small local changes in chemical composition), that naturally comes from ingot solidification, and by content of elements that change the position and the extension of the bainitic field in CCT diagrams.

Even if the formation of bainite is inevitable in the continuous cooling of hypo-eutectoid C steel grades, as demonstrated also by calculation of steel data using software tools (for example JmatPro), selective actions to reduce the amount of intermediate structures can be successfully implemented:

- *Design of a new optimized chemical analysis,*
- *Improvement and setting of the cooling rate during the rim chilling,*
- *New design for the amount of thickness on the wheel diameter before rim chilling.*

From the 2D Finite Elements simulations we can draw the followings conclusions:

- le strutture bainitiche si deformano meno della matrice perlitica; tuttavia, in alcune zone all'interfaccia tra le due fasi si registrano sforzi di Von Mises maggiori di quelli riscontrati nella perlite e nella bainite;
- la soglia massima accettabile di quantità di bainite risulta essere del 10%; al di sopra di questa percentuale le isole bainitiche si influenzano le une con le altre e l'incremento degli sforzi interessa l'intera regione tra le bainiti, compromettendo il comportamento a fatica.

Ad ogni modo, la presenza di isole bainitiche di piccola entità e uniformemente distribuite nella matrice perlitica o di altre strutture intermedie osservate sulla fascia di rotolamento non pregiudica le prestazioni in servizio. Il riscontro positivo delle esperienze raccolte su di un gran numero di sale montate in servizio conferma ulteriormente l'impiego in sicurezza di questi componenti.

- *Bainitic structures deform less than the pearlitic matrix; however, in some areas of the interface between the two phases the Von Mises stress is higher than the ones calculated in both bainite and pearlite;*
- *The maximum threshold in bainite quantity turns out to be about 10%; beyond this value the bainitic structures may influence one another and the stress increase affects the whole region between these phases, undermining the fatigue behavior.*

In any case, limited bainitic or intermediate structure spots uniformly distributed in the pearlitic matrix observed on the wheel tread do not affect service performances. The positive return of experience collected from the large quantity of wheelsets in service since a long period confirms further the safe operation.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] HONEYCOMBE R.W.K., (1982), *Steels, Microstructure and Properties*, E. Arnold Ltd.
- [2] BHADESHIA H.K.D.H., (2015), *"Bainite in Steels", Third Edition*, Maney Publishing, ISBN 978-1-909662-74-2.
- [3] DIENER M., GHIDINI A., (2008), *"Reliability and Safety in Railway Products: Fracture Mechanics on railway solid wheels"*, LRS-TECHNO 1.
- [4] EN 13262 Standard, (2004), *Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheels - Product requirements*.
- [5] FACCOLI M., GHIDINI A., MAZZÙ A., (2018), *"Experimental and Numerical Investigation of the Thermal Effects on Railway Wheels for Shoe-Braked High-Speed Train Applications"*, *Metallurgical and Materials Transactions A* 49(10) 4544-4554.
- [6] GHIDINI A., DIENER M., GIANNI A., SCHNEIDER J., (2012), SUPERLOS®, *"Innovative steel by Lucchini RS for high-speed wheel application"*, LRS TECHNO 5.
- [7] FACCOLI M., PETROGALLI C., LANCINI M., GHIDINI A., MAZZÙ A., (2017), *"Rolling contact fatigue and wear behavior of high-performance railway wheel steels under various rolling-sliding contact conditions"*, *Journal of Materials Engineering and Performance* 26(7), 3271-3284.
- [8] FACCOLI M., C. PETROGALLI, GHIDINI A., (2017), *"A Pin-on-Disc Study on the Wear Behaviour of Two High-Performance Railway Wheel Steels"*, *Tribology Letters*, 65(4): 152.
- [9] MAZZÙ A., PETROGALLI C., LANCINI M., GHIDINI A., FACCOLI M., (2018), *"Effect of wear on surface crack propagation in rail-wheel wet contact"*, *Journal of Materials Engineering and Performance* 27(2) 630-639.
- [10] FACCOLI M., GHIDINI A., MAZZÙ A., (2018), *"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*, 49(10) 4544-4554.
- [11] DIENER M., GHIDINI A., (2014), *"Fracture Toughness: a quality index for railway solid wheels Materials Performances and Characterization"*, Vol. 3 N. 3, pp. 286-304 doi:10.1520/MPC20130047. ISSN 2165-3992.
- [12] MC DONOUGH W, BRAUNGARD M., (2002), *"Remaking the way to we make things"; Cradle to cradle*, A division of Farrar, Straus and Giroux, New York: North Point Press.
- [13] GHIDINI A., FACCOLI M., MAZZÙ A., (2017), *"SANDLOS® wheels for desert environments"*. LRS-TECHNO 10.
- [14] MAZZÙ A., GHIDINI A., ZANI N., FACCOLI M., (2018), *"Study of wheel/rail material coupling in presence of solid contaminants"*, *Proceedings of the 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, CM 2018, 701-710.