

Recenzované vědecké články

Únavové charakteristiky indukčně kalených náprav železničních dvojkolí

Fatigue Characteristics of Induction Hardened Railway Axles

Ing. Rostislav Fajkoš, Ph.D.^{1,2}, Ing. Radim Zima, Ph.D.¹, prof. Ing. Bohumír Strnadel, DrSc.^{2,3}

¹ BONATRANS GROUP a.s., Revoluční 1234, 735 94 Bohumín, Česká republika

² VŠB-Technická univerzita Ostrava, Centrum pokročilých inovačních technologií, 17. listopadu 15, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

³ VŠB-Technická univerzita Ostrava, Regionální materiálově technologické centrum, 17. listopadu 15, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

Pro zvýšení odolnosti náprav železničních dvojkolí proti únavovému poškození byla navržena technologie povrchového indukčního kalení. V práci jsou detailně prezentovány technologické aspekty indukčního kalení náprav. Zvýšení odolnosti proti únavě u kalených povrchů ve srovnání se standardním tepelným zpracováním oceli EA4T bylo ověřeno na kole nalisovaném na nápravě ve skutečné velikosti. 70% zvýšení meze únavy u indukčně kalených zkušebních těles oceli EA4T ve srovnání s materiálem se standardním tepelným zpracováním jasně prokazuje účinnost této technologie.

Klíčová slova: mez únavy; design na únavu; železniční náprava; indukční zpevnění; uhlíková ocel

A new surface induction hardening technology was designed for the purpose of increasing the resistance of railway wheelsets to fatigue damage. This paper gives a detailed presentation of the technological aspects of induction hardening of axles. The increased fatigue resistance in hardened surfaces compared with standard heat treatment of the EA4T steel was verified using press-fitted wheel/axle joints at actual size. The verification of the technology of surface induction hardening of the EA4T steel axles has confirmed the benefits of this method for increasing fatigue resistance and lifespan in railway wheelsets. The thickness of the surface induction hardened layer is decisively affected by the inductor frequency. Lower inductor frequency combined with a reduction in tempering temperature from 230°C to 200°C increased residual compressive stresses in the surface layers of the axle, thus increasing resistance to fatigue crack initiation. The increase of almost 200% in the strength of the EA4T steel after heat treatment simulating induction hardening is accompanied by an increase of up to 70 % in fatigue strength and only a 20 % increase in notch sensitivity. These benefits of surface induction hardening were also reflected in the results of fatigue tests performed on press-fitted wheel seat/axle joints on an actual-size wheel press-fitted to an axle. For the actual-size wheel/axle joint, there was an up to 50 % increase in the maximum level of local stress for the induction hardened specimens compared with standard surface treatment. This increase is strongly dependent on the geometry of the joint, especially on the wheel seat diameter/axle body diameter ratio. The lower this value is, the more the seat becomes damaged by fretting fatigue on the contact area rather than by the initiation of fatigue micro-cracks. The higher notch sensitivity of the EA4T steel after induction hardening accelerates the initiation stage of fatigue damage in comparison with standard treated surfaces. However, the higher fatigue limit and the better tensile strength/yield strength ratio of the EA4T steel after induction

Key words: fatigue limit; fatigue design; railway axles; induction hardening; carbon steel

Únavové poškození náprav železničních dvojkolí je jedním z limitujících faktorů bezpečnosti kolejových vozidel [1-5]. To je hlavní důvod vývoje nových koncepcí designu náprav s vyšší odolností proti iniciaci a šíření únavových trhlin. Protože lomové selhání náprav při giga-cyklové únavě, tedy po dlouhé době provozu, může být iniciováno podstatně nižší amplitudou napětí,

než jakou je mez únavy pro 10^7 cyklů, koncepce únavové pevnosti [1-3] musí být pro zajištění bezpečnosti náprav vždy doplněna o limity únavového poškození [2-9]. Tento přístup zohledňuje výskyt únavových mikrotrhlin, které se mohou během provozu vyvinout v nebezpečné, dlouhé únavové trhliny [4]. Limit únavového poškození proto zahrnuje minimální velikosti trhliny detekovatelné

NDT, ale i odpovídající intervaly inspekčních prohlídek v závislosti na lokalizaci a době provozu. Kromě těchto základních koncepcí designu jsou intenzivně studovány i vlivy konstrukčního materiálu, povrchových úprav, technologických postupů tepelného zpracování a následného opracování, ale i geometrických parametrů, zejména podílu průměru dříku nápravy a sedla kola na únavovou pevnost zejména železničních náprav vysokorychlostních vlaků [9-18].

Jednou z technologií zvyšování únavové pevnosti náprav je technologie povrchového indukčního kalení, která spočívá v relativně rychlém ohřevu povrchových vrstev již opracovaných náprav pomocí induktoru nad kalicí teplotu a v prudkém ochlazení nápravy jednak proudem vody z vodní sprchy, která je umístěna za induktorem a jednak odvodem tepla tělem nápravy. Výsledkem je vznik martenzitické struktury v povrchové vrstvě, kde se až trojnásobně ve srovnání s jádrem zvyšuje tvrdost, a vznikají i tlaková napětí až do hodnoty -800 MPa [1,3,11,14,15]. Důsledkem je to, že se podstatným způsobem zvyšuje mez únavy a krátké únavové trhliny se v povrchových vrstvách prakticky nemohou šířit. Tato technologie se uplatňuje i u výrobce železničních dvojkolí BONATRANS GROUP a.s. s cílem uspokojit požadavky zákazníků na dodávku především hnacích náprav určených pro vysoké rychlosti s vysokou mírou bezpečnosti proti únavovému poškození a dlouhou provozní životností [19]. Povrchově kalené nápravy snižují provozovatelům kolejových vozidel nezbytný počet servisních ultrazvukových prohlídek pro kontrolu režimu limitu únavového poškození. To významně redukuje finanční náklady spojené s pravidelnou odstávkou a prohlídkou vozového parku.

Cílem této práce je ověřit účinky indukčního kalení na zvýšení meze únavy hnacích a vysoce namáhaných náprav železničních dvojkolí vyráběných z oceli jakosti EA4T. Základním záměrem práce je zjistit zejména, jak zvýšení meze únavy náprav ve skutečné velikosti koresponduje s únavovým chováním materiálu oceli EA4T testované před a po indukčním kalení na standardních tahových vzorcích. Znalosti skutečných rozdílů v únavovém chování povrchově zakalené vrstvy a vnitřní oblasti nápravy nebo po standardním tepelném zpracování nápravy umožní nalézt parametry, které jsou nutné pro efektivní design dvojkolí s delší životností.

1. Technologické aspekty indukčního kalení náprav

Technologie povrchového indukčního kalení, spočívá v relativně rychlém ohřevu povrchových vrstev již předem opracovaných náprav pomocí induktoru na kalicí teplotu. Ta se na rozdíl od běžného tepelného zpracování (30-50 °C nad A_{C3}) z důvodu velmi krátkých časů austenitizace volí vyšší, přibližně 150 °C nad A_{C3} , a dosahuje tak hodnot v rozmezí od 940 do 960 °C [19]. Rychlého ohřevu se dosahuje působením střední nebo vysoké frekvence induktoru, což je v případě kalení náprav cívka, jejíž tvar je přizpůsobený kalené části nápravy. Při průchodu střídavého proudu induktorem

vzniká na povrchu kaleného předmětu střídavé magnetické pole doprovázené vířivými proudy, které ohřívají povrch nápravy. Po ohřevu na kalicí teplotu následuje prudké ochlazení nápravy jednak proudem vody z vodní sprchy, která je umístěna za induktorem, a jednak odvodem tepla tělem nápravy. Tím vznikne v povrchové vrstvě do tloušťky až 6 mm martenzitická struktura a v blízkosti povrchu se až trojnásobně zvýší tvrdost. Kromě toho vznikají v povrchových vrstvách i tlaková napětí až do hodnot -800 MPa [1,3,11,14,15,19]. Úroveň reziduálních tlakových napětí v povrchových vrstvách a gradient tvrdosti jsou v technologického hlediska silně závislé na použité kalicí frekvenci induktoru [1, 3].

Při nižší frekvenci induktoru dochází k prokalení do větší hloubky pod povrchem, a tak tvrdost ve větších hloubkách pod kaleným povrchem je vyšší. Při aplikaci nižší kalicí frekvence induktoru se dosahuje vyšší hodnoty tlakových reziduálních pnutí [1,3,11]. Tato zjištění u indukčně kalených náprav středně uhlíkové oceli S38C [20] (ekvivalent AISI 10308) vedla k redukci kalicí frekvence induktoru z 10 kHz na 3 kHz [1]. Současné snížení teploty popouštění z 230 °C na 200 °C zvýšilo tlaková reziduální pnutí v povrchových vrstvách nápravy. Ke stejným závěrům, nutnosti snížit kalicí frekvenci induktoru a teplotu popouštění pro dosažení odolnosti náprav proti únavě, dospěl i Fajkoš a Bartoš [19] u oceli pro nápravy jakosti EA4T [21] (ekvivalent 25CrMo4).

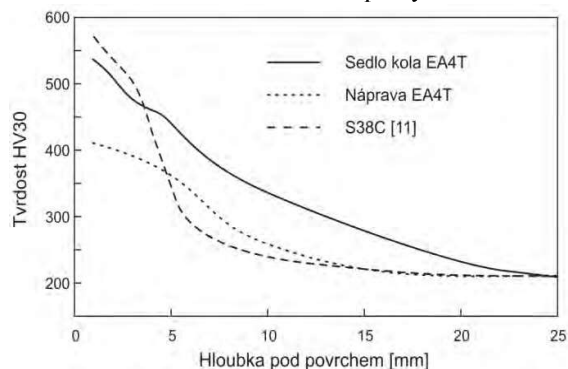
Kromě kalicí frekvence induktoru a teploty popouštění ovlivňuje úroveň vnitřních napětí a povrchovou tvrdost nápravy také rychlost posuvu induktoru a časová změna jeho výkonu. Zejména v oblastech přechodových rádií nápravy je pro řádné prokalení povrchových vrstev řízení technologických faktorů ovlivňujících hloubku prokalení nevyhnutelné. Při nedodržení této podmínky může docházet vlivem mezery mezi induktorem a nápravou k nedostatečnému prohřátí přechodových rádií a ke zmenšení tloušťky zakalené vrstvy.



Obr. 1 Makrolept řezu nápravy z oceli EA4T oblasti přechodu ze sedla pohonu (větší průměr) do dříku, leptáno 10% HNO_3 (se svolením výrobce BONATRANS GROUP a.s.)

Fig. 1 Macro-etch of a section of an EA4T steel axle – area of wheel seat (bigger diameter)/axle body transition, etched with 10% HNO_3 (with the permission of the manufacturer BONATRANS GROUP a.s.)

Například v oblasti přechodu ze sedla pohonu do dříku nápravy, jak je to zřejmé z obr. 1, je při stejné rychlosti posuvu induktoru tloušťka zakalené vrstvy v oblasti sedla pohonu větší než v oblasti dříku nápravy.



Obr. 2 Závislost tvrdosti HV30 na hloubce pod povrchem nápravy z oceli EA4T po indukčním kalení [19] ve srovnání s indukčně kalenou nápravou z oceli S38C [11] (Se svolením výrobce BONATRANS GROUP a.s.)

Fig. 2 Dependence of HV30 hardness on depth below the surface of an EA4T steel axle after induction hardening [19] compared with an induction hardened S38C steel axle [11] (with the permission of the manufacturer BONATRANS GROUP a.s.)

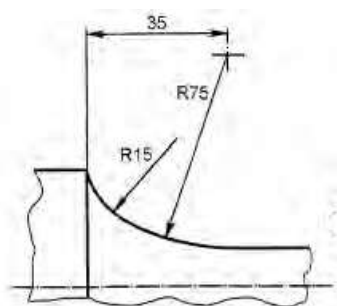
To potvrzuje i průběh tvrdosti HV30 se vzdáleností od povrchu nápravy z oceli jakosti EA4T po indukčním kalení [19] ve dvou různých místech, v sedle pohonu (levá strana obr. 1) a v dříku nápravy (pravá strana obr. 1) uvedený na grafech obr. 2. Grafy jsou doplněny závislostí tvrdosti HV30 na hloubce pod povrchem indukčně kalené nápravy z oceli S38C (ekvivalent AISI 10308) [11]. Vyšší povrchová tvrdost po indukčním kalení nápravy z oceli S38C ve srovnání s povrchově kalenou nápravou z oceli EA4T [19] je způsobena odlišným chemickým složením, především vyšším obsahem uhlíku u oceli S38C.

Správná volba technologických parametrů během indukčního kalení zohledňující tvarové přechody vychází z individuálního tvarového řešení nápravy, zejména z podílu průměru sedla kola a průměru nápravy d . Hodnoty těchto základních tvarových charakteristik náprav u vlaků Shinkansen, TGV a ICE jsou shrnuty v tab. 1. Na obr. 3 je znázorněn standardní složený přechodový rádius R75/R15 definovaný v normě ČSN EN 13103. Takovýto přechodový rádius je konstruktéry používán v Evropě při změně průměru nápravy v oblasti přechodu z většího průměru sedla pro kolo, do oblasti střední části dříku nápravy.

Tab. 1 Základní geometrické charakteristiky náprav [1]

Tab.1 Basic geometric characteristics of axles [1]

	Shinkansen	TGV	ICE
Průměr sedla kola D [mm]	209	212	190
Průměr nápravy d [mm]	190	184	160
D/d	1.10	1.15	1.19
Přechodový poloměr [mm]	100	75/15	75/15



Obr. 3 Příklad provedení složeného přechodového rádiusu

Fig. 3 Example of the transition radius (fillet) design

Nápravy vlakových souprav Shinkansen mají ve srovnání s nápravami evropských TGV a ICE nižší podíl D/d a tím i větší přechodový rádius mezi sedlem pohonu a dříkem nápravy. Potenciální únavové trhliny se proto u vlakových souprav Shinkansen lokalizují spíše v oblasti lisovaného spoje sedla pohonu než v oblasti volného povrchu nápravy, jako tomu je u ostrých přechodů náprav evropských vlaků TGV a ICE [3]. Kromě podílu průměru sedla kola a průměru nápravy D/d , je nutné pro dodržení nízké koncentrace napětí zvolit vhodně i maximální přechodový rádius mezi sedlem pohonu a dříkem nápravy. Minimální hodnota tohoto složeného zaoblení,

označovaná také jako přechodový rádius, by neměla být pro nápravy evropských vlaků TGV a ICE vyšší než 75/15 mm [22].

U náprav vlaků Shinkansen je přechodový rádius-vyšší, a to až 100 mm [1].

Tvarová členitost náprav hnacích dvojkolí, změny jejich průměru v délce (obr. 4), způsobují při ohřevu i změny proudové hustoty na povrchu nápravy. Velká mezera mezi induktorem a povrchem nápravy v oblasti čepu má za následek nedostatečný ohřev, a nelze ji proto v této oblasti povrchově kalit. Indukčně kalený povrch nápravy je na obr. 4 vyznačen tmavě šedou barvou.



Obr. 4 Tmavě šedě vyznačená oblast povrchově indukčně kalené nápravy

Fig. 4 Area of surface induction hardening marked in dark grey

2. Materiál pro výrobu náprav a experimentální postupy

Všechny experimenty prezentované v této práci proběhly na vzorcích komerčně vyrobené oceli jakosti EA4T používané pro výrobu náprav železničních dvojkolí. Chemické složení oceli odpovídá standardu EN 13261 [22] a je uvedeno v tab. 2.

Tab. 2 Chemické složení ocelí pro výrobu železničních dvojkolí v hm. %

Tab. 2 Chemical composition of steels used in railway wheelset manufacture in mass %

Jakost	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]
EA4T (25CrMo4)	0.26	0.27	0.72	1.0	0.23
S38C (AISI 1038)	0.41	0.27	0.76	-	-

Pro porovnání je v tab. 2 uvedeno i chemické složení jakosti S38C používané pro výrobu indukčně kalených náprav v Japonsku [1]. Ocel jakosti EA4T byla vyrobena technologií kontilitů do kruhového kontislitku průměru 410 nebo 525 mm, a to v závislosti na průměru zkoušené nápravy. Kontislitky byly předválcovány do předválek, ze kterých byly následně vykovány nápravy, které byly dále standardně tepelně zpracovány kalením do vody s následným popuštěním v peci na normou [22] požadované mechanické hodnoty. Po standardním tepelném zpracování byly nápravy ohrubovány

s minimálním technologickým přídavkem nutným pro indukční kalení.

Odezva na cyklické zatěžování materiálu byla vyšetřována na standardních tahových zkušebních tělesech válcovitého tvaru o průměru 10 mm. Aby bylo možné vzhledem k malé tloušťce a ostrému gradientu mikrostruktury pod povrchem indukčně kalené nápravy kvantifikovat účinky indukčního zpevnění, byla zkušební tělesa podrobena laboratornímu tepelnému zpracování, které simulovalo postup indukčního zpevnění používaného při tepelném zpracování náprav. Výsledky základních mechanických vlastností při zkoušce tahem a únavové charakteristiky získané ze standardně vyráběných náprav jakosti EA4T po standardním tepelném zpracování jsou uvedeny ve druhém řádku tab. 3. Ze srovnání s mechanickými vlastnostmi, které jsou vyžadovány normou EN13261[22] a které uvádí první řádek této tabulky, je zřejmé, že všechny sledované charakteristiky komerčně vyráběné oceli vyhovují předepsaným požadavkům. Tab. 3 je doplněna o výsledky stejných sledovaných mechanických charakteristik získaných po tepelném zpracování simulující indukční zpevnění, tedy po ohřevu na kalicí teplotu 840 °C, zakalení do vody a po následném popuštění na nízké popouštěcí teplotě. Tyto výsledky jsou pod označením EA4T-IH uvedeny ve třetím řádku tab. 3. V této tabulce jsou uvedeny i mechanické vlastnosti oceli S38C používané pro výrobu náprav rychlovlaků Shinkansen [11].

Tab. 3 Základní mechanické charakteristiky při kvazistatickém a cyklickém zatěžování ocelí pro výrobu železničních dvojkolí

Tab. 3 Basic mechanical characteristics under quasistatic and cyclical loading of steels used in railway wheelset manufacture

Jakost	R_{fL} [MPa]	R_{fE} [MPa]	$q=R_{fL}/R_{fE}$ [-]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]
EA4T (EN13261 [22])	350	215	1.63	≥ 420	650-800	≥ 18.0
EA4T	387	297	1.30	611	795	19.8
EA4T-IH	660	420	1.57	852	1563	13.2
S38C[11]	-	-	-	325	612	33.8

Zkouška tahem na hladkých vzorcích o průměru 10 mm probíhala při pokojové teplotě, při rychlosti zatěžování $\dot{\varepsilon} = 0.5 \text{ min}^{-1}$ na trhacím stroji Zwick Z150. V obou případech jak pro standardně tepelně zpracovanou ocel EA4T, tak i pro její stav po simulaci indukčního kalení EA4T-IH, bylo testováno pět těles. Ze souboru hodnot meze kluzu, R_e , meze pevnosti, R_m , a tažnosti, A_5 , byly stanoveny střední hodnoty (tab. 3). Únavové zkoušky byly provedeny na vzorcích průměru 10 mm na akreditovaném zkušebním stroji UZOR 20 ohybem za rotace při frekvenci zatěžování $f = 35 \text{ Hz}$ a součiniteli nesouměrnosti kmitu $R = -1$ na hladkých R_{fL} a na

vrubovaných R_{fE} zkušebních tělesech v souladu s definicí normy ČSN EN 1321. Vrub o hloubce 0,1 mm s poloměrem v kořeni 0,04 mm a vrcholovým úhlem 30° působí jako koncentrátor napětí, a tak podíl $R_{fL}/R_{fE} = q$ reprezentuje dostatečně přesně vrubovou citlivost.

Zkouškou tahem odebranou ze sedla indukčně kalené nápravy byly vyšetřovány změny meze kluzu R_e , meze pevnosti R_m , a tažnosti, A_5 v jejím řezu směrem od povrchu do středu, ve třech místech uvedených v tab. 4.

Tab. 4 Výsledky zkoušky tahem těles odebraných z nápravy v oblasti sedla kola

Tab. 4 Results of tensile tests on specimens taken from the axle in the area of the wheel seat

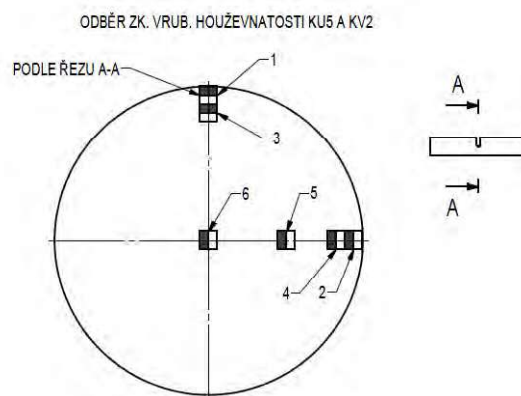
Lokalizace	R_e [MPa]	R_m [MPa]	Tažnost [%]
EA4T (EN13261[22])	≥ 420	650-800	≥ 18.0
1 – v blízkosti zpevněného povrchu	778	1055	9.6
5 – ve středu poloměru	480	675	21.6
6 – v jádru nápravy	474	706	20.7

Zkouška tahem byla provedena na standardních, běžně používaných tělesech průměru 10 mm se způsobem odběru zkušebních těles ze sedla kola v souladu s normou EN 13261 [22]. Tahové zkoušky byly provedeny na trhacím stroji ZD40 při rychlosti zatěžování $\dot{\epsilon} = 0.5 \text{ min}^{-1}$.

Z porovnání výsledků zkoušky tahem s požadavky normy EN 13261 je zřejmé, že nevyhovující hodnotou je jen tažnost A_5 stanovená v blízkosti indukčně kaleného povrchu. Pevnost vzorku odebraného v blízkosti indukčně kaleného povrchu, přesně 15 mm pod povrchem [22], je ve srovnání s pevností vzorku po tepelném zpracování simulujícím povrchové indukční kalení, kde se dosahuje hodnoty $R_m = 1563 \text{ MPa}$ (tab. 3), nižší. To je způsobeno tím, že do průřezu vzorku zasahuje povrchově zpevněná vrstva jen omezeně. Ilustruje to i závislost tvrdosti HV30 na hloubce pod povrchem nápravy oceli EA4T po indukčním kalení uvedená na obr. 2. V hloubce 15 mm pod povrchem dosahuje tvrdost přibližně hodnoty HV30 = 280 a to po přepočtu na odpovídající pevnost [24] dává hodnotu 980 MPa, což přibližně odpovídá experimentálně stanovené hodnotě 1055 MPa.

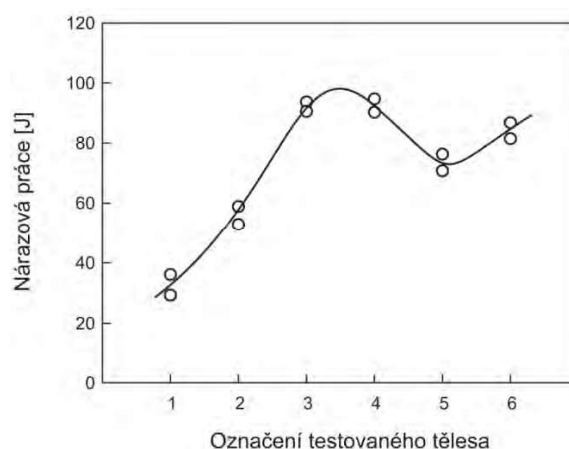
Dalším způsobem, jak posoudit průběh zpevnění v podpovrchových vrstvách nápravy po indukčním kalení, je hodnocení nárazové práce u těles s U vrubem pro Charpy zkoušku tříbodovým ohybem. K tomuto účelu byla zkušební tělesa odebrána v podélném směru v šesti rozdílných místech podle odběrného schématu uvedeného na obr. 5. Hodnoty nárazové práce KU5 byly stanoveny vždy u dvou těles ve stejném místě, při zkušební teplotě 20 °C. Lokalizace odběru zkušebních těles v ose nápravy byla zvolena v oblasti sedla pohonu, kde je hloubka prokalení největší, jak je to zřejmé z obr. 1.

Nižší hodnota nárazové práce, až 29 J, se projevila výrazně pouze na tělesech odebraných těsně pod kaleným povrchem sedla pohonu, lokalita 1. V lokalitách 3 a 4 dosahovala nárazová práce maxima, až 95 J. Závislost nárazové práce KU5 na lokalizaci odběru zkušebních těles od místa v blízkosti zpevněného povrchu směrem do středu nápravy je zřejmá z obr. 6.



Obr. 5 Schéma odběru těles pro Charpy zkoušku rázem v ohybu v řezu nápravy

Fig. 5 Diagram of sampling locations for Charpy notch toughness tests – axle section



Obr.6 Závislost nárazové práce KU5 na lokalizaci odběru zkušebních těles u povrchově zpevněného sedla nápravy po indukčním kalení

Fig. 6 Dependence of impact energy (Charpy impact energy) KU5 on sampling location of test specimens in surface induction hardened wheel seats

3. Únavové charakteristiky náprav ve skutečné velikosti

Po získání výsledků únavových testů materiálu EA4T po standardním tepelném zpracování a po simulaci indukčního kalení byly na únavu testovány nápravy skutečné velikosti. Celkem bylo testováno 6 identických hnacích náprav s podílem průměru sedla kola a průměru nápravy $D/d = 207/180 = 1,15$ a se standardně navrženým přechodem R75/R15. První sada tří náprav byla testována ve stavu po standardním tepelném zpracování, které spočívalo v kalení a následném popuštění náprav dle vlastní technologie firmy BONATRANS GROUP a.s. Druhá sada tří náprav byla standardně tepelně zpracována a po ohrubování indukčně zakalena a nízkoteplotně popuštěna na teplotu 200 °C. Po oprávnění při úběru finální třísky v rozmezí od 0,50 do 0,75 mm a broušení povrchu byly nápravy nalisovány do upínacích kotoučů a připraveny k únavové zkoušce. Mez únavy na nápravách opracovaných dle normy EN 13261 musí přesáhnout 240 MPa [22] a mez únavy v tlakovém spoji kola a nápravy musí být větší než 145 MPa [22].

Nápravy byly zkoušeny na rezonančním zkušebním zařízení Inova s volitelnou hladinou amplitudy napětí při součiniteli nesouměrnosti kmitu $R = -1$ v ohybu za rotace. Zkušební frekvence při rotačním pohybu se pohybovala v závislosti na zvolené hladině zatížení od 23 do 25 Hz.

Ke kontrole skutečného lokálního napětí, které zohledňuje koncentraci napětí v přechodové oblasti dříku do sedla nápravy, se změnou poloměru zaoblení R75/R15 byl použit řetízkový tenzometr firmy HBM, 1-

KY11-4/120. Nominální napětí vypočítané na základě statické kalibrace pro oblastí hrany sedla kola lisovaného spoje nebo oblasti dříku bylo stanoveno na základě analytických výpočtů. Při statické kalibraci změříme siloměrem zatěžující sílu i rameno, jejichž součin dává ohybový moment, a na základě znalosti průměru dříku nápravy, resp. průměru sedla pro kolo vypočítáme modul odporu průřezu nápravy. Další tenzometry pro stanovení zpětné vazby a řízení únavové zkoušky byly umístěny na dříku nápravy ve vzdálenosti 450 mm od hrany sedla kola.

Tab. 5 Hladiny zkušebního napětí testovaných náprav z oceli EA4T a odpovídající počty cyklů
Tab. 5 Levels of test stress in tested EA4T steel axles and corresponding number of cycles

	Číslo nápravy	Lokální napětí [MPa]	Nominální napětí [MPa]	Napětí v nalisovaném spoji [MPa]	Počet cyklů [x 10 ³]
Standard A4T	1	285	243	156	10 000
		310	264	170	10 000
		335	286	183	2 600
	2	310	266	171	10 000
		335	288	184	6 300
	3	310	264	170	10 000
335		286	183	8 100	
A4T IH povrch	1	360	307	197	10 000
		420	359	230	10 000
		460	393	251	396*
	2	400	343	219	10 000
		460	394	252	120*
	3	400	345	221	10 000
460		397	254	9 800*	

Zkouška probíhala tak, že na zvolené zkušební hladině byla náprava zatěžována 1×10^7 cykly. Poté byla magnetickou fluorescenční metodou zkontrolována oblast přechodového rádiu R75/R15, zda nedošlo k iniciaci mikrotrhlin. Pak byla zkušební hladina zvýšena (o 25 MPa u Standard A4T, resp. o 60/40 MPa u A4T IH povrch) a únavová zkouška pokračovala až do vzniku trhliny, příp. do ukončení zkoušky z důvodu uvolnění nápravy v oblasti lisovaného spoje. Při uvolnění nápravy doprovázené jejím viditelným axiálním povytažením z náboje kotouče již nebylo možno dále pokračovat v únavové zkoušce. K tomuto povytažení došlo u IK náprav na zkušební hladině 460 MPa a počty cyklů jsou v tomto případě označeny symbolem *.

Výsledky únavových zkoušek náprav ve skutečné velikosti jsou shrnuty v tab. 5. Z výsledků zkoušení povrchově zpevněných náprav indukčním kalením je zřejmé, že mají ve srovnání se standardně tepelně zpracovanými nápravami mnohem vyšší odolnost proti iniciaci únavového poškození. Při testu povrchově indukčně kalených náprav ve skutečné velikosti se neiniciovala v průběhu testu žádná únavová trhlina, přestože lokální zkušební napětí v oblasti přechodového rádiu R75/R15 dosahovalo hodnoty 400 MPa.

Přepočítané nominální napětí na dříku tak bylo přibližně 340 MPa a napětí v oblasti lisovaného spoje až 220 MPa. Abychom mohli zjistit skutečnou mez únavy IK náprav, bylo zapotřebí vyvinout speciální zafixování náprav, jež znemožní její vylisování vlivem mikropohybů na vysokých hladinách v průběhu únavové zkoušky.

Při zkoušce dalších dvou náprav provedených jak na zkušebně firmy BONATRANS GROUP, tak v Německé zkušebně SincoTec byly nápravy zkoušeny na hladině lokálního napětí 450 MPa/ 10^6 cyklů a následně i na hladině lokálního napětí 500 MPa. Na tak vysoké hladině napětí již ale zkoušku nebylo možno provozovat z důvodu nízkého výkonu zkušebního zařízení a zkouška byla ukončena po $0,5 \cdot 10^6$ cyklech. Následná kontrola pomocí magnetické polévací práškové metody neprokázala vznik trhlin v nápravě.

Mez únavy náprav po indukčním kalení tak leží v rozmezí od 450 do 500 MPa, a je tedy o hodně vyšší než mez únavy u náprav vyrobených z oceli EA4T bez povrchové úpravy (tab. 5). Více než 1,5násobné zvýšení meze únavy u náprav s indukčně kalenou povrchovou vrstvou jednoznačně prokazuje pozitivní účinek této technologie na životnost.

4. Diskuse

Cílem této studie bylo prověřit, jak povrchové indukční kalení ovlivňuje únavovou pevnost náprav železničních dvojkolí. Speciálně je práce orientována na hledání vztahu únavové pevnosti před a po indukčním kalení oceli EA4T a náprav s nalisovaným kolem. Ve všech případech byl prokázán příznivý účinek indukčního kalení na zvýšení únavové pevnosti. Ve srovnání s mezí únavy R_L u standardních těles (tab. 3) je odpovídající parametr u těles po indukčním kalení 1,7x vyšší.

U zkoušky únavových charakteristik spoje sedla kola a nápravy ve skutečné velikosti je v prvním přiblížení mez únavy po indukčním kalení asi 1.35x vyšší než u tepelně nezpracovaného povrchu. Tady je nutné poznamenat, že toto zvýšení velmi silně závisí na geometrii spoje, zejména na podílu průměru sedla kola a vlastní nápravy D/d . Čím je tato hodnota nižší, a neměla by být podle normy EN 13261 [22] menší než 1,12, tím více se namísto iniciace únavových mikrotrhlin uplatňuje proces poškození sedla nápravy frettingem na kontaktní ploše [1,3,18]. Pokles meze únavy s klesajícím podílem D/d potvrzuje i porovnání výsledků únavové pevnosti lisovaného spoje oceli EA4T získané Linhartem a Černým [18], kde pro $D/d = 1,06$ dosahuje mez únavy maximálně 105 MPa, zatímco v této práci pro podíl $D/d = 1,15$ je to hodnota vyšší než 145 MPa. U oceli 34CrNiMo6 s vyšší vrubovou citlivostí $q = 1,92$ [23] pak ve srovnání s ocelí EA4T s parametrem $q = 1,30$ dochází k snadnější a rychlejší iniciaci únavových trhlin v oblasti lisovaného spoje sedla a nápravy.

Přitom rozdíl ve standardní mezi únavy stanovené na únavové zkušební tyči průměru 10 mm v ohybu za rotace hovoří jednoznačně ve prospěch oceli-34CrNiMo6, která dosahuje meze únavy 455 MPa [23], zatímco u jakosti EA4T je to pouze 387 MPa (tab. 3). Podobně tomu je i při srovnání meze únavy lisovaného spoje sedla a nápravy vyrobené z oceli EA4T ve standardním stavu a po indukčním kaleném povrchu. Vyšší vrubová citlivost oceli EA4T po indukčním kalení (tab. 3) způsobuje ve srovnání se standardně opracovaným povrchem urychlení iniciačního stádia únavového poškození. Avšak vyšší mez únavy a také příznivější podíl meze pevnosti a meze kluzu R_m/R_e oceli EA4T po indukčním kalení jednoznačně preferuje technologii indukčního kalení pro prodloužení životnosti náprav.

Úspěšně byla ověřena i úroveň nárazové práce KU5 indukčně kalené nápravy v oblasti sedla. Z obr. 6 je zřejmé, jak v závislosti na lokalizaci zkušebního tělesa směrem od povrchu do středu nápravy nárazová práce narůstá. Hodnoty nárazové práce, a to i v blízkosti indukčně kaleného povrchu, nepodkročily hodnotu 25 J.

Povrchové indukční kalení má kromě zvýšení únavové pevnosti i řadu dalších technologických výhod. Je to zejména vysoká odolnost proti zadření při nevhodné manipulaci v průběhu lisování kola na sedlo nápravy. Jediná technologie je tak využitelná jak pro zvýšení

odolnosti sedel proti frettingové únavě, tak i pro zvýšení mechanické únavy vlastních náprav a není nutné používat další technologie zpevnění povrchu sedel, jakou je například aplikace Mo vrstvy. Velmi důležitá je technologie finálního broušení povrchu indukčně kalených sedel kola a ložiskových čepů, která musí splňovat podmínku minimálního lokálního ohřevu, aby nebyla snížena tlaková pnutí [3,15]. Celkový úběr broušené vrstvy byl tak redukován z původních 0,5 na 0,15 mm.

Technologie indukčního kalení je perspektivní metodou zvyšování únavové pevnosti železničních náprav. Vyšší odolnost proti únavě je docílena nejen zpevněním povrchových vrstev, ale také rozvojem tlakových pnutí během vytvrzování. Zpevnění povrchu a hodnoty tlakových reziduálních pnutí pod povrchem se tak stávají důležitými designovými parametry při tvarovém návrhu náprav s vyšší životností a do budoucna je nutné studiu této problematiky věnovat dostatečnou pozornost.

Závěry

Ověřená technologie indukčního povrchového kalení náprav oceli EA4T potvrdila její vhodnost pro zvyšování únavové životnosti železničních dvojkolí. Téměř dvojnásobné zvýšení pevnosti oceli EA4 po tepelném zpracování simulujícím indukční kalení je doprovázeno až 70% zvýšením meze únavy a příznivým, jen asi 20% zvýšením vrubové citlivosti. Tyto přínosy povrchového indukčního kalení se odrazily i ve výsledcích únavových zkoušek lisovaného spoje sedla kola a nápravy ve skutečné velikosti. U nalisovaného spoje kola a nápravy ve skutečné velikosti dosahoval nárůst počtu cyklů po indukčním kalení ve srovnání se standardní úpravou povrchu až 50 %.

Poděkování

Tato práce byla podpořena ze zdrojů projektu CZ.1.05/2.1.00/01.0040 "Regionální materiálově technologické výzkumné centrum" a je výsledkem řešení projektu Příležitost pro mladé výzkumníky CZ.1.07/2.3.00/30.0016, v rámci Operačního programu vzdělávání pro konkurenceschopnost.

Literatura

- [1] HIRAKAWA, K., TOYAMA, K., KUBOTA, M. The analysis and prevention of failure in railway axles. *International Journal of Fatigue*, 1998; 97: 135-144
- [2] ZERBST, U., MÄDLER, K., HINTZE, H. Fracture mechanics in railway applications - an overview. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005; 72:163-194
- [3] MAKINO, T., KATO, T., HIRAKAWA, K. Review of the fatigue damage tolerance of high-speed railway axles in Japan. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011; 78:810-825
- [4] ZERBST, U., SCHÖDEL, M., BEIER, H. T. Parameters affecting the damage tolerance behavior of railway axles. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011; 78: 793-809
- [5] MADIA, M., BERETTA, S., SCHÖDEL, M., ZERBST, U., LUKE, M., VARFOLOMEYEV, I. Stress intensity factor solutions for cracks in railway axles. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011; 78:764-792

Čekání na zelený hospodářský zázrak

VDI Nachrichten

28. 11. 2014

Německé hospodářství má trvale růst a být orientované do budoucna. Musí se ale řádně uspořádat, aby se zelené hospodaření orientovalo na správný kurs. Spolková ministryně pro výzkum a vývoj Johanna Wanka a spolková ministryně pro životní prostředí Barbara Hendrich představily své cíle. Tvrdí, že německé hospodářství stále ještě akceptuje energetické a materiálové ztráty při výrobě jako cennou produkci, a způsobuje tak zbytečné škody, zvyšuje náklady a zatížení životního prostředí. Kvůli nedostatku efektivních technologií a procesů se 80 % nákladů na zhotovení výrobků ztrácí při výrobním procesu. Jen málo německých podniků se systematicky zabývá tím, jak a s jakými metodami by se daly snížit emise CO₂. Spolková vláda reaguje na toto zjištění a spolu se zástupci politiků, ekonomiky, vědy a odborů sestavila výzkumnou agendu. Namátkou jmenujme jen některé body jejího pracovního zaměření: využívání procesních plynů z vysokých pecí, chemické procesy, využití CO₂ nebo využití strusky.

Oceláři chtějí mít jasno

Rheinische Post

4. 12. 2014

Venkovní teplota nula stupňů, ale bohatě žhavé pocity před sídlem ředitelství ThyssenKrupp Steel v Bruckhausenu. Starosti o jednotlivá zařízení a provozy, ale také starosti o budoucnost ocelářské divize byly hlavním tématem protestního shromáždění, svolaného odbory IG Metal kvůli výrokům celokoncernového šéfa Heinricha Hiesingera. O částečné uklidnění se postaral Andreas J. Goss, předseda představenstva ThyssenKrupp Steel Europe. Ocelářská divize přispěla k návratu koncernu do ziskové zóny. Do oceli se investuje jako v časech nejvyšší konjunktury, totiž 500 mil. € ročně. Stejná suma plyne do údržby a ošetřování zařízení.

Georgsmarienhütte uzavírá slévárnu oceli Gröditz

www.mdr.de

5. 12. 2014

Dozorčí rada Georgsmarienhütte (GMH) Guss GmbH na svém řádném zasedání jednomyslně rozhodla uzavřít slévárnu oceli. Bezprostředně na to byla započata jednání o sociálně smluvním zajištění 72 postižených zaměstnanců. Všechny ještě běžící zakázky budou podle toho zpracovány až do úplného uzavření provozu v roce 2015. Uzavření slévárny nepřichází zcela překvapivě, bylo to již dříve naznačeno. Kovárny Gröditz – rovněž dceřiný podnik Georgsmarienhütte, nejsou tímto opatřením nijak postiženy. Gröditz je tradiční ocelářský region, v dobách NDR zde v ocelářském průmyslu pracovalo 5 000 lidí.

METEC
www.metec.com
www.tbwom.com

DÜSSELDORF/GERMANY
16-20 JUNE 2015
METEC
9TH INTERNATIONAL METALLURGICAL
TRADE FAIR WITH CONGRESSES

NI
worldwide

eco Metals
EFFICIENT PROCESS SOLUTIONS

METEC & 2ND ESTAD 2015

Emc 2015
June 14 - 17

PbZn

Kout žhavé železo
9. mezinárodní specializovaný veletrh metalurgie, odlévání a výroby oceli s doprovodnými kongresy přetváří vize na zařízení a produkty.

Metalurgie - motor růstu
Jde-li o stroje, zařízení a produkty pro výrobu surového železa, oceli a neželezných kovů, je veletrh METEC se svými doprovodnými akcemi vrcholnou událostí.

Srdečně vítáme v Düsseldorfu!

Informace pro návštěvníky, prodej vstupenek, komplexní cestovní služby:
BVV FAIR TRAVEL s.r.o.
Výstaviště 1, 647 00 Brno
Tel. +420 541 159 190, Fax +420 541 159 172
kozmar@fairtravel.cz
www.fairtravel.cz

Messe Düsseldorf

- [6] ZERBST, U., VORMWALD, M., ANDERSCH, CH., MÄDLER, K., PFUFF, M. The development of a damage tolerance concept for railway components and its demonstration for a railway axle. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005; 72:209-239
- [7] ZERBST, U., SCHÖDEL, M., HEYDER, R. Damage tolerance investigations on rails. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009; 76:2637-2653
- [8] ZERBST, U., KLINGER, C., KLINGBEIL, D. Structural assessment of railway axles - A critical review. *Engineering Failure Analysis*, 2013; 35:54-65
- [9] ZERBST, U., BERRETA, S., KÖHLER, G., LAWTON, A., VORMWALD, M., BEIER, H. T., KLINGER, C., ČERNÝ, I., RUDLIN, J., HECKEL, T., KLINGBEIL, D. Safe life and damage tolerance aspects of railway axles – A review. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013; 98:214-271
- [10] MADIA, M., BERRETA, S., ZERBST, U. An investigation on the influence of rotary bending and press fitting on stress intensity factors and fatigue crack growth in railway axles. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008; 75:1906-1920
- [11] SAKAMOTO, H., ISHIDUKA, H., AKAMA, M., TANAKA, K. Fatigue crack extension under large cyclic compressive stress in medium frequency induction hardened axles. In. *16th International Wheelset Congress*, Cape Town; March 14–19, 2010
- [12] VARFOLOMEEV, I., LUKE, M., BURDACK, M. Effect of specimen geometry on fatigue crack growth rates for the railway axle material AE4T. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011; 78:742-753
- [13] LUKE, M., VARFOLOMEEV, I., LÜTKEPOHL, K., ESDERT, A. Fatigue crack growth in railway axles: Assessment concept and validation tests. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011; 78:714-730
- [14] KRISTOFFERSEN, H., VOMACKA, P. Influence of process parameters for induction hardening on residual stress. *Materials and Design*, 2001; 22:637-644
- [15] RUM, J. A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001; 114:212-226
- [16] KLINGER, C., BETTGE, D. Axle fracture of an ICE3 high speed train. *Engineering Failure Analysis*, 2013; 35:66-81
- [17] KENDALL, CLARKE, C., HALIMUNANDA, D. Failure analysis of induction hardened automotive axles. *Failure and Analysis and Prevention*, 2008; 8:386-396
- [18] LINHART, V., ČERNÝ, I. An effect of strength of railway axle steels on fatigue resistance under press fit. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011; 78:731-741
- [19] FAJKOŠ, R., BARTOŠ, P. Vývoj technologie indukčního kalení náprav vysokorychlostních vlaků. [Výzkumná zpráva P-0/1-B-32 2013]; VŠB-TU Ostrava, 20 s.
- [20] S38C (equivalent AISI 10308) JIS G4051-1 S38C Japanese standard Carbon steel for machinery
- [21] EA4T (equivalent DIN 25CrMo4) defined in standard EN 13261: Railway applications. Wheelsets and bogies. Axles. Product requirements
- [22] EN 13261: Railway applications. Wheelsets and bogies. Axles. Product requirements
- [23] LINHART, V., ČERNÝ, I. Únavové zkoušky tyčí z 34CrNiMo6 oceli pro výrobu náprav se dvěma úrovněmi pevnosti, [Výzkumná zpráva pro BTG], 2003, 26 s.
- [24] JECH, J. Tepelné zpracování ocelí – metalografická příručka, Praha: SNTL, 1983



© 2015 TANGER, spol. s r.o.

**31. ročník konference o teorii a praxi
výroby a zpracování oceli**

1. OZNÁMENÍ
2. - 3. dubna 2015
Hotel Relax
Rožnov p. Radhoštěm, Česká republika

**Oceláři
Steelcon**

tanger

TANGER, spol. s r.o.
VŠB - Technická univerzita Ostrava