

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2011-1/6

ZAKLJUČNO POROČILO O REZULTATIH RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	L2-9752
Naslov projekta	Modeliranje trajne nihajne trdnostni vzmetnih jekel in napoved uporabne dobe listnatih vzmeti
Vodja projekta	8195 Borivoj Šuštaršič
Tip projekta	L Aplikativni projekt
Obseg raziskovalnih ur	3.150
Cenovni razred	C
Trajanje projekta	07.2007 - 06.2010
Nosilna raziskovalna organizacija	206 Inštitut za kovinske materiale in tehnologije
Raziskovalne organizacije - soizvajalke	1610 ŠTORE STEEL podjetje za proizvodnjo jekel, d.o.o.
Družbeno-ekonomski cilj	06. Industrijska proizvodnja in tehnologija

1.1. Družbeno-ekonomski cilj¹

Šifra	06.
Naziv	Industrijska proizvodnja in tehnologija

2. Sofinancerji²

1.	Naziv	Štore Steel, Podjetje za proizvodnjo jekel, d.o.o.
	Naslov	Železarska cesta 3, 3220 Štore
2.	Naziv	
	Naslov	
3.	Naziv	
	Naslov	

B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

3. Poročilo o realizaciji programa raziskovalnega projekta³

V okviru prvega leta projekta smo se osredotočili predvsem na tri aktivnosti: analizo stanja izhodne mikrostrukture vzmetnega jekla (vključki, izceje), optimiranje toplotne obdelave, izdelavo S-N krivulj na CVN preizkušancih oz. določitev njihove trajne nihajne trdnosti. Zato, da bi natančneje spoznali in lahko analizirali tehnološki postopek izdelave vzmetnega jekla smo dvakrat obiskali jeklarno Štore Steel in si natančno ogledali vse faze postopka. Sofinancer projekta nam je dobavil vzorce vzmetnega jekla v obliki ploščatih profilov (6 šarž) in za primerjavo še vzorec tujega vzmetnega jekla. Iz vzorcev smo izdelali statistično verodostojno število preizkušancev (po 30 kosov) za določevanje S-N krivulj na VF pulzatorju. Preizkušance smo vzeli v vzdolžni smeri glede na smer valjanja v izhodnem stanju. Preizkuse utrujanja smo izvajali pri frekvenci 180 Hz in dveh pogojih obremenjevanja ($R=0,05$ in $R=0,1$). Ugotovljena zarezna upogibna trajna nihajna trdnost (S_{bnv}) preiskovanega jekla je v izhodnem stanju 235 MPa in v toplotno obdelanem stanju na najvišji trdnostni razred cca 310 MPa. CVN preizkušanci z nebrušeno V zarezo imajo S_{bnv} samo 95MPa. Iz ploščatih profilov smo izrezali tudi vzorce za izdelavo metalografskih obrusov (v prečni in vzdolžni smeri). Izvedli smo metalografski pregled s pomočjo optičnega mikroskopa (LM) medtem, ko smo avtomatsko analizo slike in izdelavo statistične ocene velikostne porazdelitve nekovinskih vključkov in oceno porazdelitve največjih vključkov z metodo, ki temelji na teoriji ekstremov izvedli v drugem letu projekta. Ugotovitve so pokazale, da je ocenjena največja velikost vključkov cca 50 mikronov, kar je precej manj kot je ocenjena kritična velikost vključkov, ki je bila izvedena s pomočjo analize prelomov tehnološko testiranih vzmeti in genetskim programiranjem. Izvedli smo tudi SEM/EDS mikrokemično analizo vključkov. Analizirali smo karakteristične tipe vključkov. Prevladujejo alumo-silikatni in sulfidni, mikročistost jekla je relativno dobra. Problem pa je izbira ustreznega postopka za določitev makro čistosti (ekstremno veliki vključki, ki jih je težko najti v relativno majhnem metalografskem vzorcu) zato so se pri sofinancerju usmerili tudi na iskanje ustrezne kontinuirane analize vključkov (ultrazvok) v konti litih gredicah. Optimiranje toplotne obdelave vzmetnega jekla je potekalo pri različnih pogojih (avstenitizacija $820-890^{\circ}\text{C}/20-30'$, popuščanje $350-650^{\circ}\text{C}/30-60'$). Izvajali smo jo s standardno (segrevanje/ohlajanje na zraku, kaljenje v olju), vakuumsko toplotno obdelavo s kaljenjem pod tlakom N_2 in v vrtinčasti plasti. Sledila je določitev standardnih in lomno-mehanskih lastnosti. Ugotovili smo, da so optimalni pogoji toplotne obdelave za dosego trdnostnega razreda 1800 MPa naslednji: avstenitizacija $860^{\circ}\text{C}/20'$, kaljenje v olju in popuščanje pri $350^{\circ}\text{C}/60'$, pri vakuumski toplotni obdelavi smo dosegli ta trdnostni razred pri avstenitizaciji na 890°C , hitrem ohlajanju v $\text{N}_2/5$ barov in popuščanju na $350^{\circ}\text{C}/60'$. Razlika je vidna v doseženi mikrostrukturi. Pri kaljenju v olju je v celoti martenzitna, pri kaljenju v toku dušika pa je prisoten tudi določen delež bainita. To vpliva na končne mehanske lastnosti jekla (predvsem žilavost in duktilnost). S temi preiskavami smo dokazali, da je z obstoječo sestavo jekla možno doseči tudi najvišji zahtevani trdnostni razred jekla (1800 MPa) vendar pa je duktilnost (raztezek 8 %) na spodnji dovoljeni meji. Dvig duktilnosti je možen samo s povečanjem globalne čistosti jekla. Zaradi lažje, enostavnejše in cenejše mehanske obdelave preizkušancev smo v drugi in tretji fazi projekta preizkušance toplotno obdelovali samo v vakuumu s hitrim ohlajanjem v dušiku. Izbrali smo dva nivoja popuščanja pri katerih smo dosegli dva trdnostna razreda 1450 in 1600 MPa, ki smo jih tudi lažje primerjali z rezultati testiranja končno izdelanih vzmeti pri vzmetarju (MBHA, Španija), ki uporablja predvsem ta dva trdnostna razreda. Izvajali so se tudi preizkusi kaljenja v vodi in polimeru (preostri kalilni sredstvi-pojav razpok). Iz posameznih šarž vzmetnega jekla (razlike v kemični sestavi) smo v izhodnem stanju izrezali statistično verodostojno število vzorcev v vzdolžni smeri glede na smer valjanja. Iz teh vzorcev smo izdelali CVN preizkušance z dodatkom za brušenje in jih toplotno obdelali. Sledilo je ploskovno in profilno brušenje, kontrola dimenzij in V zareze po brušenju, meritve hrapavosti površine in utrujanje z VF pulzatorjem. Na osnovi rezultatov utrujanja pri različnih obremenitvah smo izdelali S-N krivulje. Analiza rezultatov je pokazala, da je trajna nihajna trdnost precej odvisna od izhodne mikrostrukture in načina izcejenosti jekla. Določili smo tudi faktor koncentracije napetosti za popolno elastično in elasto-plastično obnašanje vzmetnega jekla v realnih pogojih preizkušanja CVN preizkušancev na VF pulzatorju. Za to smo uporabili različne numerične metode znotraj komercialno in akademsko dostopnih MKE (Abaqus+FEMFAT, Ansys, Solidworks). Ocenili smo, da nam vsi programi

dajejo podobne rezultate in vrednosti faktorja zarezne občutljivosti. Izračuni so pokazali, da je teoretični faktor (čista elastična deformacija) koncentracije napetosti K_{te} med 3,8 in 3,9 (vpliv zamreženja) in K_{tp} med 3,2 in 3,3 upoštevajoč rahlo lokalno plastično deformacijo. Načrtovali smo tudi izdelavo S-N krivulj preiskovanega jekla na gladkih cilindričnih preizkušancih. Ta del projekta smo začeli in končali šele v tretjem letu projekta, ker se je precej zavlekla izgradnja novega mehanskega laboratorija in postavitve novega dinamičnega +/- 250 kN preizkuševalnega stroja Instron 8802. Posneli smo realni geometriji dveh tipov (eno-listnata in dvo-listnata izvedba) vzmeti in ju digitalizirali ter simulirali njihovo utrujanje s pomočjo MKE pri različnih robnih pogojih. Doba trajanja vzmeti oziroma napoved njihove življenjske dobe je temeljila na modelu linearne akumulacije poškodb (DAT); Damage Accumulation Theory). Rezultate simulacij smo primerjali z rezultati doseženimi pri tehnološkem testiranju. Preizkušene dvo-listaste vzmeti so zdržale pri definiranih pogojih utrujanja med 60- in 90-tisoč nihajev, kar se je dobro ujemalo (znotraj cca 10 %) z napovedmi na osnovi MKE, kljub temu, da smo zanemarili vpliv gume, ki povezuje (podpira) spodnji list dvo-listnate vzmeti, ker ni bilo na razpolago dinamičnih lastnosti gume. Zanemarili smo tudi vpliv površinskega utrjevanja vzmeti s peskanjem, ki po literarnih podatkih poviša trajno nihajno trdnost za cca 10 do 15 %. Ta vpliv se je verjetno kompenziral z vplivom razogljichenja površine, saj s peskanje delno razogljičene površine povrnemo na enak trdnostni nivo kot ga ima nerazogljičeno jekla. Mi pa smo uporabljali za modeliranje eksperimentalne podatke popolnoma nerazogljičenega na IMT Ljubljana poboljšane jekla. Poleg tega koncepta smo uporabili tudi nov lasten in enostaven pristop ocene dobe trajanja vzmeti z izračunom (oceno) nezarezane trajne nihajne upogibne trdnosti jekla S_{bnv} na osnovi na VF pulzatorju eksperimentalno določene S_{bnv} . Tudi ta koncept določevanja življenjske dobe vzmeti je dal popolnoma zadovoljive rezultate (znotraj 15%). S tem smo verificirali to relativno hitro metodo določevanja trajne nihajne trdnosti in jo pričeli redno uporabljati za oceno uporabne dobe vzmeti, upoštevajoč stanje izhodne mikrostrukture in toplotne obdelave. V tej fazi projekta smo se povezali tudi s skupino prof. dr. Wielfrieda Eichlsederja iz TU v Leobnu (Institut für Allgemeinen Maschinenbau Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau an der Montanuniversität Leoben), ki deluje na podobni problematiki in skupaj uspešno prijavili in realizirali dveletni bilateralni Slo-At projekt z naslovom: Uporaba koncepta lokalnega napetostnega gradienta za napoved dobe trajanja vzmetnega jekla. Njihove izkušnje, znanje in oprema sta nam še dodatno koristila pri uspešni realizaciji pričujočega projekta. Predvsem pri izvajanju utrujanja preiskovanega materiala v vrtilno-upogibnem (R/B) načinu in osvajanju statistične obdelave eksperimentalnih podatkov za konstrukcijo S-N krivulj (arcsin P metoda in normalno log metoda).

V okviru drugega leta projekta smo se osredotočili predvsem na izdelavo S-N krivulj na gladkih in zarezanih cilindričnih preizkušancih pri dveh karakterističnih stanjih mikrostrukture in toplotne obdelave, izvedbo in analizo novih tehnoloških preizkusa utrujanja vzmeti pri vzmetarju, izdelavi S-N krivulj z VF pulzatorjem na vzorcih izrezanih iz izdelanih novih in tehnološko preizkušenih vzmeti, MKE modeliranje utrujanja vzmeti in izračunu dobe trajanja.

Mikrostrukturne analize jekla so pokazale, da je ključen dejavnik za izboljšanje kakovosti jekla njegova čistost. Analizirani vključki so na tehnološko testiranih vzmeteh na nekaterih mestih močno presežali izračunano kritično velikost napake, poleg tega pa so bili vključki predvsem aluminatnega in alumo-silikatnega tipa, ki so ostrorobi, trdi in krhki. Njihov nastanek je pogojen predvsem z naravo tehnološkega postopka (pomirjanje jekla z Al). Močen vpliv na kakovost jekla ima tudi strjevanje in nastanek izcej (njihova velikost in porazdelitev). V tovarni so zato prešli na osvajanje tehnologije pomirjanja vzmetnega jekla s silicijem (Si). Osvajanje te tehnologije je bilo možno le s pridobivanjem novih kadrov in znanj. Poleg tega so se osredotočili tudi na iskanje vzrokov za nastanek vključkov nadkritične velikosti in opreme za njihovo detekcijo. Izkazalo se je, da velik delež vključkov nadkritične velikosti nastaja tudi zaradi nestabilnosti (prekinitiv) v proizvodnji med kontinuiranim litjem jekla. Vzrok zanje je lahko tudi reakcija ognjevarne obloge s talino. Izdelane so nove šarže jekla z modificiranim postopkom pomirjanja in povečanim obsegom kontrole v primeru prekinitiv. Rezultati analiz so bili takoj vzpodbudni. Iz novih šarž jekla so bile izdelane vzmeti, ki so na tehnološkem preizkušanju zdržale tudi preko 200.000 ciklov utrujanja pri

izbranih pogojih obremenjevanja. Zato smo se odločili, da se bomo tudi v okviru projekta osredotočili na nove šarže jekla, ki so izdelane po modificiranem postopku pomirjanja. Iz novih šarž (št. 50540 in 50541) smo iz ploščatega jekla s presekom 90×20 mm v dveh smereh (vzporedno in vzdolžno s smerjo valjanja) glede na izcejanje jekla izrezali vzorce za izdelavo standardnih CVN in cilindričnih preizkušancev. Istočasno smo iz izdelanih in tehnološko preizkušenih vzmeti, ki so zdržale znano število ciklov z vodnim curkom tudi izrezali vzorce za izdelavo enakih preizkušancev. Sledila je izdelava preizkušancev. Cilindrični preizkušanci so bili dveh vrst. Zarezani s faktorjem $K_t=2$ in gladki ($K_t=1$). Medtem, ko smo z MKE analizo za CVN preizkušance ugotovili $K_t=3,85$. Sledila je vakuumaska toplotna obdelava. Standardno se toplotna obdelava te vrste jekla izvaja s kaljenjem v olju in popuščanjem. Primerjalne analize so nam pokazale, da nam tudi vakuumaska toplotna obdelava daje ustrezne oz. primerljive mikrostrukture in statične mehanske lastnosti. Za vakuumasko toplotno obdelavo smo se odločili, ker po izdelavi preizkušancev ni potrebna draga naknadna mehanska obdelava za odstranitev razogljíčene plasti nastale med kaljenjem v olju. Izbrali smo dve toplotni obdelavi za dva trdnostna razreda (1600 in 1450 MPa). Jeklo najprej austenitiziramo pri $870^\circ\text{C}/10'$, kalimo v toku dušika pri 5 barih in nato popuščamo pri $425^\circ\text{C}/1\text{h}$ (HT1) oz. $475^\circ\text{C}/1\text{h}$ (HT2). Sledila je dokončna mehanska izdelava preizkušancev s serijo finih brušenj in poliranjem v predelu zarez oz. konusu (gladki preizkušanci). Nato je sledila določitev S/N krivulj v treh različnih načinih obremenjevanja upogibnem (B), natezno-tlačnem (T/C) in vrtilno-upogibnem (R/B) pri dveh pogojih obremenjevanja ($R=-1$ in $R=0,1$). Za vsak način preizkušanja smo izdelali statistično dokaj relevantno število preizkušancev (po 75 kosov). Veliko število preizkušancev in dolgotrajnost preizkusov predvsem v R/B načinu, ki je potekalo v Avstriji in T/C načinu, ki potekalo na novem Instronu 8802 na IMT je dolgotrajno (frekvenca 30 Hz). Potrebno je bilo tudi osvojiti vsa znanja na novem preizkuševalnem stroju, metodologijo preizkušanja in programsko opremo. Analize so pokazale relativno majhen vpliv izbrane toplotne obdelave na trajno nihajno trdnost (do 10 %). Bolj nanjo vpliva smer valjanja oziroma izcejenosti jekla. V drugem letu projekta se nam je pokvaril tudi Cracktronik, ki smo ga uspešno popravili šele v tretjem letu projekta, ko smo končali tudi z določevanjem S_{bnv} na CVN preizkušancih iz novih vzmeti, ki so zdržale večje število nihajev. Izdelali smo tudi standardne natezne preizkušance, določili trdoto, udarno žilavost in raztržne lastnosti jekla za obe vrsti toplotni obdelave. Iz ostankov preizkušancev smo izdelali metalografske vzorce in jih okarakterizirali pod optičnim mikroskopom. Novo jeklo je metalurško čistejše, brez večjih vključkov. Opravljena je tudi SEM/EDS analiza, ki je pokazalo veliko fluktuacijo koncentracije glavnih legirnih elementov (0,3 do 0,45 % Si, 0,6-1,3 % Mn in 0,6-1,2 % Cr) preko pozitivnih in negativnih izcej.

V tretjem letu projekta smo se v okviru eksperimentalnega dela osredotočili na določevanje S/N krivulj na standardiziranih nezarezanih in zarezanih preizkušancih v vseh načinih preizkušanja in MKE modeliranje utrujanja dvo-listaste vzmeti ter izračuna dobe trajanja vzmeti za izbrane pogoje utrujanja in geometrijo vzmeti z uporabo novih eksperimentalnih podatkov. Rezultati preiskav so pokazali, da je na primer trajna nihajna trdnost preiskovanega jekla v R/B načinu pri $R=-1$ in 50 % verjetnosti v smeri izcej na gladkih preizkušancih 473 MPa za HT1 in 416 MPa za HT2. Podobno je v C/T načinu in enakih pogojih preizkušanja 478 MPa. Raztros je relativno majhen saj je pri 10 % verjetnosti vrednost 504 MPa in 90 % verjetnosti 453 MPa. Na cilindričnih zarezanih preizkušancih so trajne nihajne trdnosti v C/T načinu ustrezno manjše. Za HT1 225 MPa (vzdolžno) in 184 MPa (pravokotno na izceje) oz. za HT2 214 MPa (vzdolžno) in 171 MPa (pravokotno). Nagib S-N krivulj se pri teh preizkusih giblje med 3,8 in 4,6. Iz eksperimentalnih rezultatov lahko izračunamo K_t in vidimo, da je ta nekaj večji (cca 2,15) kot teoretični $K_t=2$. S pomočjo MKE modeliranja in eksperimentalnih rezultatov smo določili tudi faktor zmanjšanja trajne nihajne trdnosti zaradi vpliva zarez, ki je med 0,6 in 0,65. Ključna je ugotovitev, da je trajna nihajna trdnost jekla v smeri izcej cca 25 %

višja kot pravokotno nanje. Z ustreznim vodenjem tehnologije valjanja lahko tako vedno izdelamo in uporabljamo material z najboljšimi dinamičnimi lastnostmi. Tudi prispevek ustrezne toplotne obdelave je očiten. Najvišji trdnostni razred 1800 MPa je dosegljiv z obstoječo sestavo in tehnologijo vendar strogo omejen s čistostjo jekla. Trajna nihajna trdnost določena na CVN preizkušancih iz novih vzmeti je ustrezno višja in napoved dobe trajanja dvo-listaste vzmeti izbrane geometrije ustrezno daljša. Izračun dobe trajanja z ADT konceptom se je izkazal kot ustrezen. V okviru MKE modeliranja dvo-listaste vzmeti smo spreminjali tudi pogoje zamreženja in robne pogoje (način vpetja in obremenjevanja vzmeti) ter ugotavljali njihov vpliv na porazdelitev napetosti in deformacij ter dobo trajanja vzmeti. Analize so pokazale njihov nezanemarljivo velik vpliv, zato je postavitve robnih pogojev, ki se čim bolj ujemajo z realnostjo predpogoj za dobre rezultate. V nadaljnji natančnejši opis rezultatov projekta se ne bomo več spuščali, najdemo ga v ustrezni do sedaj predstavljeni bibliografiji (članki in predavanja). Ker je eden še v tisku ga podajamo v prilogi. Nameravamo objaviti vsaj še enega, ki bo v celoti posvečen modeliranju utrujanja vzmeti na osnovi MKE.

V okviru novih projektov bi bilo primerno sistematično analizirati vpliv razogljčenja površine jekla in njegove površinske utrditve s peskanjem. S tem bi lahko v okviru simulacij uporabili še bolj realne podatke za dinamične in statične mehanske lastnosti vzmetnega jekla. V okviru pričujočega projekta smo uporabili pri vrednotenju odziva materiala na dinamične obremenitve koncept visoko cikličnega utrujanja (angl.: high cycle fatigue) ali napetostnega utrujanja, kjer zasledujemo odvisnost med napetostjo in številom ciklov (Wöhlerjeva ali S-N krivulja). V okviru pričujočega projekta smo s pristopom genetskega programiranja določili tudi kritično velikost vključkov, z SEM/EDS analizami določili njihovo sestavo ter fluktuacijo in sestavo izcej, z novo izboljšano metodo pa lomno žilavost K_{IC} v odvisnosti od toplotne obdelave. Zato bi lahko v okviru novega projekta preizkusili MKE modeliranje z lomno mehanskim konceptom (angl.: Fracture Mechanics Fatigue), kjer zasledujemo hitrost napredovanja razpoke (da/dN) v odvisnosti od faktorja intenzitete napetosti (ΔK) oz. na kritičnem mestu lociranega kritično velikega vključka z znanimi mehanskimi lastnostmi in kohezijsko trdnostjo s kovinsko osnovo.

4. Ocena stopnje realizacije zastavljenih raziskovalnih ciljev⁴

V pričujočem projektu smo analizirali vrsto vplivnih faktorjev, ki vplivajo na lokalno trajno nihajno trdnosti σ_{fn} vzmetnega jekla. Prvi je bil vpliv koncentracije napetosti, ker so imeli preizkušanci, ki smo jih uporabljali na VF pulzatorju V zarezo, zato da smo lahko ocenili pravo σ_{fn} vzmetnega jekla in tudi iz njega izdelanih vzmeti, ki takšnega koncentracije napetosti nimajo. Poleg tega smo upoštevali, da vzmetno jeklo lahko vsebuje neko napako metalurškega ali mehanskega izvora, ki deluje kot koncentracija napetosti (iniciator razpoke) ter zaradi tega potencialno prihaja do dodatnega lokalnega zmanjšanja σ_{fn} materiala, ki lahko povzroči prehitro odpoved vzmeti. Zato smo v projekt vgradili raziskave, ki so pokazale kašen je vpliv izhodne mikrostrukture in toplotne obdelave. Rezultati projekta so pokazali, da najbolj vplivata na lokalno σ_{fn} usmerjenost izcej legirnih elementov in način toplotne obdelave, če je velikost vključka pod kritično velikostjo (140 mikronov). V okviru projekta smo uspešno analizirali stanje izhodne mikrostrukture vzmetnega jekla v povezavi s poznavanjem in analizo obstoječe tehnologije izdelave vzmetnega jekla, optimirali njegovo toplotno obdelavo, izdelali S-N krivulje in določili σ_{fn} preiskovanega jekla z VF pulzatorjem na CVN preizkušancih, izdelali S-N krivulje na gladkih in zarezanih cilindričnih preizkušancih v T/C in R/B načinu pri dveh mejnih stanjih mikrostrukture in toplotne obdelave ter izdelali S-N krivulje na VF pulzatorju iz vzorcev izrezanih iz izdelanih in tehnološko preizkušenih vzmeti. Na osnovi MKE smo modelirali preizkus na VF pulzatorju in Instronu 8802 ter določili faktorje koncentracije napetosti za popolno elastično (K_e) in elasto-plastično (K_p) obnašanje jekla. Izvedli smo primerjave z rezultati tehnološkega preizkusa

utrujanja zbrane geometrije pri proizvajalcu vzmeti. Z MKE smo modelirali utrujanje vzmeti dveh izbranih geometrij in uporabo eksperimentalnih rezultatov določevanja S-N krivulj ter upoštevanjem izračunanih faktorjev. Primerjali smo dobe trajanja vzmeti izbrane geometrije dobljene s praktičnimi tehnološkimi preizkusi in izračunane z modeliranjem na osnovi MKE. Na osnovi zgoraj navedenih preizkusov in rezultatov smo potrdili uporabnost hitre metode določevanja trajne nihajne trdnosti z VF pulzatorjem in možnost njene redne uporabe v kombinaciji z MKE modeliranjem za oceno uporabne dobe vzmeti, upoštevajoč stanje izhodne mikrostrukture in toplotne obdelave. V okviru projekta smo osvojili tudi nekaj novih pristopov obravnave utrujanja materialov z uvedbo MKE in novih aspektov statistične analize na osnovi teorije ekstremnih vrednosti. Rezultati projekta so bili tudi osnova za izboljšave obstoječe tehnologije izdelave vzmetnega jekla in kontrolo njegove kvalitete v proizvodnji. Ocenjujemo, da so zastavljeni raziskovalni cilji v celoti realizirani, glede na znanstvena izhodišča ter plan in cilje raziskav.

5. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine⁵

Bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega plana v zadnjem letu izvajanja RR projekta ni bilo.

6. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁶

		Znanstveni rezultat	
1.	Naslov	SLO	B.Šuštaršič, B. Senčič, V. Leskovšek: Trajna nihajna trdnost vzmetnih jekel in napoved življenjske dobe listnatih vzmeti
		ANG	B.Šuštaršič, B. senčič, V. Leskovšek: Fatigue strength of spring steels and life-time prediction of leaf springs
	Opis	SLO	Analizirali smo različne načine določevanja trajne nihajne trdnosti Sf. Pri zarezanih preizkušancih moramo upoštevati faktor koncentracije napetosti kt oz. faktor zarezne občutljivosti kf. Pokazali smo kako lahko z MKE določimo porazdelitev napetosti in deformacij ter kt in kf in ocenimo Sf nezarezanega materiala. Upoštevajoč dejanske obremenitve lahko nato ocenimo dobo trajanja vzmeti. Izračunane vrednosti se dobro ujemajo z realno dobo trajanja, dobljeno s tehnološkimi preizkusi vzmeti izbrane geometrije
		ANG	The FEM based numerical simulation was used for the determination of stress and strain distribution in V-notched specimens as well as for the calculation of stress concentration and notch-sensitivity factors. Bend fatigue strength of the selected spring steel was then determined considering concentration in the notch. Simultaneously, structural testing of real mono and two-leaf springs for trucks was performed at selected conditions of fatigue and their life time was assessed. The FEM based calculated life-time of the springs is in a good agreement with its real life time.
	Objavljeno v	Assessment of Reliability of Materials and Structures - RELMAS '2008, St. Petersburg, Russia, June 17-20, 2008, Problems and solutions; Int. Conference. Vol. 1, St. Petersburg: Polytechnic Publishing House, 2008, 361-366	
	Tipologija	1.06 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (vabljen predavanje)	
	COBISS.SI-ID	684202	
2.	Naslov	SLO	B. Šuštaršič, P. Borković, W. Eichseder, et al: Trajna nihajna trdnost in mikrostrukturne značilnosti vzmetnih jekel
		ANG	B. Šuštaršič, P. Borković, W. Eichseder, et al: Fatigue strength and microstructural features of spring steel
	Opis	SLO	Trajna nihajna trdnost izboljšane (bolj čistega) vzmetnega jekla 51CrV4Mo, toplotno obdelanega na dva različna načina in v dveh karakterističnih smereh izcej legirnih elementov je bila določena v različnih načinih obremenjevanja. Utrujanje (S-N krivulje) je bilo izvedeno na cilindričnih gladkih in zarezanih preizkušancih z različnim faktorjem kt. Izvedene so bile tudi mikrostrukturne preiskave z optičnim in elektronskim mikroskopom. Dobljeni eksperimentalni rezultati so omogočili boljšo napoved dobe trajanja vzmeti na osnovi MKE, upoštevajoč izbrano geometrijo vzmeti

			in pogoje utrujanja.
		ANG	Fatigue strength of the improved 51CrV4Mo steel was determined in different loading modes for two heat-treatments conditions and two directions of segregations. For determination of S-N curves smooth and notched cylindrical and CVN specimens with different kt factors were used. Microstructural characterisation by LM and SEM of selected steel was performed. The obtained experimental results enabled a better FEM-based fatigue life prediction of leaf springs of the selected geometry; taking into account loading conditions and experimentally determined dynamic properties of spring steel.
	Objavljeno v	Proceedings of New trends in Fatigue Fracture, NT2F10, Metz, France, 2010	
	Tipologija	1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci	
	COBISS.SI-ID	824490	
3.	Naslov	SLO	M. Kovačič, S. Senčič: Kritična velikost vključka v vzmetnem jeklu in genetsko programiranje
		ANG	M. Kovačič, S. Senčič: Critical inclusion size in spring steel and genetic programming
	Opis	SLO	Uporabljena je bila metoda genetskega programiranja za določitev korelacije med dobo trajanja vzmeti in velikostjo ter lokacijo vključkov. V skladu z najboljšo genetsko razvitim modelom za dobo trajanja vzmeti je bila izračunana kritična velikost vključka 140 mikronov. Na osnovi tega spoznanja je lahko oblikovati strategijo izbire ustrezne tehnologije izdelave vzmetnega jekla. Rezultate smo primerjali tudi z drugimi bolj eksperimentalno usmerjenimi raziskavami.
		ANG	The genetic programming method was used to determine the correlation between spring tool life and inclusion size and inclusion location. According to the best genetically developed spring life model it was easily to calculate the critical size of inclusion on the spring surface. This value is 0.14 mm. According to known critical inclusion size value the right spring steel and steel plant technology could be easily selected. The results are compared with more experimentally oriented research.
	Objavljeno v	RMZ – Materials and Geoenvironment, 57(2010)1, 17-23	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
COBISS.SI-ID	1439995		
4.	Naslov	SLO	B. Senčič, V. Leskovšek: Lomna žilavost vakuumsko toplotno obdelanega vzmetnega jekla 51CrV4
		ANG	B. Senčič, V. Leskovšek: Fracture toughness of the vacuum-heat-treated spring steel 51CrV4
	Opis	SLO	Predstavljene so možnosti vakuumske toplotne obdelave vzmetnega jekla 51CrV4. Izvedeno je bilo določevanje lomne žilavosti na cilindričnih nateznih preizkušancih z zarezo po obodu in utrujenostjo razpoko v dnu zareze. Rezultati raziskave so pokazali, da s predlagano metodo lahko konstruiramo ustrezne diagrame popuščanja. S fraktografsko in metalografsko analizo preizkušancev smo ugotovili prisotnost pozitivnih in negativnih izcej v jeklu. Ugotovljeno je bilo, da širina izcej in razdalja med njimi pomembno vplivata na lomno žilavost, zaradi prisotnosti bainita v negativnih izcejah.
		ANG	The possibilities of the vacuum heat-treatment of spring steel 51CrV4 are presented. Testing has been performed on circumferentially notched and fatigue-precracked tensile specimens. The results of investigation have shown that the use of the proposed method enables to draw tempering diagrams. Metallographic analyses of the specimens used shows in steel the presence of positive and negative segregations. It was found that the width of the segregations and the distance between segregations influence significantly the KIC due to the presence of bainite in the negative segregations.
	Objavljeno v	Mater. tehnol., 45(2011)1, 67-73	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
COBISS.SI-ID	851370		
5.	Naslov	SLO	
		ANG	

Opis	SLO	
	ANG	
Objavljeno v		
Tipologija		
COBISS.SI-ID		

7. Najpomembnejši družbeno-ekonomsko relevantni rezultati projektne skupine⁶

Družbeno-ekonomsko relevantni rezultat			
1.	Naslov	SLO	B. Šuštaršič, B. Senčič: Napoved dobe trajanja listnatih vzmeti z določevanjem upogibne trajne nihajne trdnosti na zarezanih preizkušancih
		ANG	B. Šuštaršič, B. Senčič: Life-time prediction of leaf springs based on determination of fatigue bend-strength of notched samples of spring steel
	Opis	SLO	Predstavili smo določevanje trajne nihajne trdnosti izbranega vzmetnega jekla z VF pulzatorjem in konstrukcijo S-N krivulj. Istočasno je bilo izvedeno tehnološko testiranje določeno število dvojnih listastih vzmeti pri izbranih pogojih utrujanja in določena je bila njihova doba trajanja. Z MKE smo modelirali vpliv zareze med preizkusom utrujanja CVN preizkušancev na VF pulzatorju in rezultate uporabili za določitev dobe trajanja dvojne listaste vzmeti z upoštevanjem obremenitev in robnih pogojev tehnološkega testiranja.
		ANG	Fatigue strength of selected spring steels has been determined with a resonant pulzator. The corresponding S-N curves were also constructed. Simultaneously, structural testing of real double-leaf springs for trucks was performed at selected conditions of fatigue and their life time was determined. FEM numerical based simulation of the notch effect in V-notched specimens and fatigue life-time prediction of leaf springs has also been performed and presented.
Šifra		B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci	
Objavljeno v		1-st International Conference on Materials and Technology sponsored by FEMS and IUUSTA, 13-15 October 2008, Portorož, Slovenia. Program in knjiga povzetkov. Ljubljana: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, 2008, 51.	
Tipologija		1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci	
COBISS.SI-ID		702890	
2.	Naslov	SLO	B. Šuštaršič, B. Senčič, R. Kunc: Napovedovanje dobe trajanja listnatih vzmeti na osnovi MKE metode
		ANG	B. Šuštaršič, B. Senčič, R. Kunc: FEM based life-time prediction of leaf springs
	Opis	SLO	Za numerično simulacijo porazdelitve napetosti in deformacij v CVN vzorcih smo uporabili MKE, ki omogoča tudi izračun koncentracije napetosti in faktorja zarezne občutljivosti. MKE smo uporabili tudi za simulacijo utrujanja in za napoved dobe trajanja listnate vzmeti izbrane geometrije. Za simulacije smo uporabili eksperimentalno določene mehanske lastnosti izbranega vzmetnega jekla. Izračunana doba trajanja vzmeti se dobro ujema z dejansko dobo trajanja vzmeti, ki je dobljena s strukturnim testiranjem vzmeti za težke tovornjake.
		ANG	The FEM has been used for the numerical simulation of stress and strain distribution in V-notched specimens as well as the calculation of stress concentration and notch-sensitivity factors. FEM simulation of fatigue has also been used for the prediction of life time of springs, taking into the account the mechanical properties of spring steel and conditions of fatigue. The calculated life time of the springs is in a good agreement with its real life time obtained with the structural testing of real leaf springs for trucks.
Šifra		B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci	
Objavljeno v		17. konferenca o materialih in tehnologijah, 16.-18. november 2009, Portorož, Slovenija, Program in knjiga povzetkov, Ljubljana: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, 2009, 93.	
Tipologija		1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci	
COBISS.SI-ID		789418	

	COBISS.SI-ID		
3.	Naslov	SLO	P. Borkovič, B. Šuštaršič: Napoved dobe trajanja vzmetnih jekel z uporabo koncepta <u>localnega napetostnega gradienta</u>
		ANG	P. Borkovič, B. Šuštaršič: Fatigue life prediction of spring steels using the <u>local stress gradient concept</u>
	Opis	SLO	Napoved dobe trajanja strojnega elementa z MKE je običajna pot v procesu oblikovanja. Obremenitve običajno opišemo z njihovim gradientom. Podatek o mehanskem obnašanju uporabljenega materiala pa dobimo z njegovim preizkušanjem v našem primer z določitvijo S/N krivulj. Preizkuse utrujanja smo izvajali na zarezanih preizkušancih v dveh karakterističnih smereh valjanja in dveh toplotnih obdelav. Rezultati testiranja so pokazali pomemben vpliv orientacije izcej na trajno dinamično trdnost preiskovanega vzmetnega jekla.
		ANG	The prediction of fatigue life of components by FEM calculation is a common step within the design process of machine. Loads are mostly described by means of load spectra. The information about the strength behaviour of the material is based on test results and in our case described by S/N curves. Fatigue tests on notched specimens longitudinal and perpendicular relative to rolling direction and two HT conditions were carried out. According to obtained fatigue results it is obviously that segregation orientation has the most important influence on the fatigue behaviour of the spring steels.
	Šifra	B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci	
	Objavljeno v	18-th Conference on Materials and Technology, 15-17 November 2009, Portorož, Slovenia. Program in knjiga povzetkov. Ljubljana: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, 2010, 44	
	Tipologija	1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci	
	COBISS.SI-ID	844202	
4.	Naslov	SLO	
		ANG	
	Opis	SLO	
		ANG	
	Šifra		
	Objavljeno v		
	Tipologija		
	COBISS.SI-ID		
5.	Naslov	SLO	
		ANG	
	Opis	SLO	
		ANG	
	Šifra		
	Objavljeno v		
	Tipologija		
	COBISS.SI-ID		

8. Drugi pomembni rezultati projektne skupine ⁸

<p>1.01 Izvirni znanstveni članek</p> <p>B. Šuštaršič et al: Fatigue strength and microstructural features of spring steel</p> <p>Journal – Structural Integrity and Life, Belgrade, Serbia, potrjeno za objavo (glejte prilogo)</p> <p>Drugi učinki znanstvenih in aplikativnih rezultatov projekta:</p> <p>D09 Mentorstvo doktorandov - vodja projekta je mentor mlademu raziskovalcu, delo je sofinancirano s strani AARS (Predrag Borkovič), sodelavec na projektu (prof. dr. Vojteh</p>
--

leskovšek) je mentor doktorandu iz industrije in sodelavcu na projektu (Bojan Senčič)

D10 Pedagoško delo - vodja projekta in ostali sodelavci sodelujejo v pedagoškem procesu MP IJS - napredni kovinski materiali; praktične vaje študentov na lomni mehaniki in utrujanju visokolegiranih jekel, predavanja in vaje iz mehanske karakterizacije kovinskih materialov, gostovanje prof. dr. Peter Jurčija in njegovo sodelovanje v pedagoškem procesu (predavanja)

D01 Vodenje in koordiniranje mednarodnega projekta - aplikativni projekt je odprl možnost njegove nadgraditve z mednarodnim bilateralnim projektom Slo-At (TU Leoben, Avstrija)

F01 Pridobitev novih praktičnih znanj - v okviru projekta je potekalo tudi osvajanje metodologije preizkušanja na novem dinamičnem računalniško podprtem preizkuševalnem +/- 250 kN stroju Instron 8802, osvajala so se programska orodja za malo in velikociklično utrujanje, simulacijo termodinamskih ravnotežij (ThermoCalc, Dictra) in MKE metod (Abaqus, FEMFAT, Deform, Ansys)

F10 Izboljšanje obstoječega izdelka - osvojena je modificirana tehnologija izdelave vzmetnega jekla, ki daje večjo čistost jekla in zato njegovo višjo trajno dinamično trdnost

G.01.02 Razvoj pin dodiplomskega izobraževanja - v okviru projekta se je izvajalo eksperimentalno delo za doktorsko disertacijo

G.03.03 Uvajanje novih tehnologij - v tovarni je uvedena nova modificirana tehnologija

9. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁹

9.1. Pomen za razvoj znanosti¹⁰

SLO

Raziskovalni rezultati pričujočega projekta omogočajo nov pristop k obravnavanju utrujanja kovinskih materialov in napovedovanju njihove življenske dobe s pomočjo napovedi kritične velikosti vključkov na osnovi genetskega programiranja. Ugotovljena kritična velikost vključkov je 140 mikronov. Medtem, ko je standardni metalografski pregled pod optičnim mikroskopom z upoštevanjem teorije ekstremov pokazal, da se v preiskovanem volumnu ne nahajajo vključki večji kot cca 50 mikronov. Rezultati projekta so tudi pokazali, da je mogoče dokaj natančno napovedati dobo trajanja vzmeti z realno geometrijo s pomočjo MKE modeliranja na osnovi koncepta linearne akumulacije poškodb, če so znane lokalne S-N krivulje materiala v odvisnosti od vrste toplotne obdelave, kvalitete površine in trdnostnega nivoja doseženega z izbrano toplotno obdelavo. Rezultati dobe trajanja MKE modeliranja enolistaste in dvolistaste vzmeti z izbrano geometrijo in pogoji utrujanja se dobro ujemajo z dejansko dobo trajanja vzmeti dobljeno s standardnim tehnološkim testiranjem. Oba pristopa temeljita na teoretičnem in praktičnem poznavanju obnašanja visokokvalitetnih vzmetnih jekel, ki je rezultat tega projekta. Rezultati projekta so pokazali, da na trajno nihajno trdnost vzmetnega jekla močno vpliva smer vroče predelave (valjanja) oz. smer izcej legirnih elementov. Z ustrezno toplotno obdelavo je možno varirati trdnostni nivo preiskovanega vzmetnega jekla med 1300 in 1800 MPa in s tem proporcionalno spreminjati njegovo trajno nihajno trdnost, duktilnost in lomno žilavost.

ANG

The research and investigation results of present project enable a new approach to the treatment of fatigue of metallic materials and fatigue life prediction with the help of critical inclusion size based on genetic programming. The determined critical inclusion size is approximately 140 microns. On the other side, standard metallographic investigation under light microscope does not give an adequately large enough investigated volume and therefore the result is much smaller maximal inclusion size (approx. 50 microns) determined with the help of extreme value statistics. The results of project have also shown that relatively accurate prediction of fatigue life of leaf springs with definite geometry and loading (fatigue) conditions is possible with FEM modeling based on linear accumulation damage concept if experimentally determined S-N curves of investigated material are known which strongly depend on heat-treatment conditions (the obtained strength level), segregation orientation and surface condition. The results of calculated fatigue life based on FEM modeling for the selected mono and two-leaf spring with the selected geometry and fatigue conditions are in a good agreement with the real fatigue life of leaf springs tested by the standard technological test. Both approaches are based on the good theoretical and practical knowledge and understanding of behaviour of high-quality spring steel, which is the result of this project. The experimental results of project have shown strong (dominant) influence of segregation and rolling direction,

respectively, on fatigue strength of steel. With the appropriate heat-treatment one can vary strength level of investigated spring steel between 1350 and 1800 MPa and proportionally it change its fatigue strength, ductility and fracture toughness.

9.2. Pomen za razvoj Slovenije¹¹

SLO

Tovarna Štore Steel d.d. je eden največjih proizvajalcev visokokvalitetnih jekel za izdelavo listnatih vzmeti težkih tovornjakov. Kakovost svojega jekla in konkurenčnost lahko zagotavljajo samo preko ulaganja v novo znanje. V okviru projekta smo pokazali, da lahko z novejšo, cenejšo in hitrejšo metodo ocenimo trajno nihajno trdnost vzmetnega jekla in s tem vpliv metalurških faktorjev (mikrostruktura, čistost jekla) nanjo. Neodvisno od proizvajalca vzmeti in njegovih rezultatov tehnološkega testiranja lahko ocenimo dobo trajanja vzmeti, če je znana geometrija vzmeti in njeni pogoji obratovanja (obremenjevanja). To je neprecenljivo v primeru reklamacij. Poleg tega nam uvedba določevanja trajne nihajne trdnosti oz. določevanje S-N krivulj v medfazno kontrolo in končno kontrolo zagotavlja stalen nadzor nad kakovostjo izdelanega jekla, povečanje njegove kakovosti in dvig konkurenčne sposobnosti. Metoda ni uporabna samo za ugotavljanje odpornosti proti utrujanju dinamično obremenjenih jekel temveč tudi drugih kovinskih in keramičnih materialov. Poznavanje in obvladovanje teh postopkov testiranja je tako pomembno tudi za druge slovenske izdelovalce in uporabnike dinamično obremenjenih strojnih in konstrukcijskih elementov. Rezultat projekta so tudi spoznanja o vplivu metalurških napak (izeje, vključki) na trajno dinamično trdnost izbranega vzmetnega jekla, ki so privedla do modifikacije proizvodnega postopka izdelave jekla, povečanja čistosti jekla in posledično pri vzmetarju bistvenega povečanja dobe trajanja vzmeti.

ANG

The Štore Steel plant is one of the biggest EU producers of high-quality steels for leaf springs of heavy trucks. The quality of steel and its competitiveness can be assured only by the investment into a new knowledge. In the frame of the present project has been shown that newer, cheaper and faster method can assure better assessment of fatigue strength of produced steel, as well as the influence of metallurgical factors (microstructure, cleanness) on it. It is also possible to assess the fatigue life of certain leaf spring on the basis of FEM modeling if the appropriate geometry of springs is known, as well as its loading conditions independently on leaf spring producer and its results of technological testing of finally produced leaf springs. This is invaluable in the case of quality complaint of spring producer. The introduction of the determination of fatigue strength and S-N curves of steel batch to batch and final control enables constant quality control of produced steel, increase of its quality and competitive ability of steel producer. The method is not useful only for the determination of resistance against dynamic loading of steels but also other metallic and composite materials. The new knowledge as a result of the present project is also important for the other Slovenian producer of metallic materials (for example Al alloys) and user of dynamically loaded elements and structures. The effect of the present project is not only progress in testing and modeling methodology but also new insight into the influence of metallurgical defects (segregation, inclusions, surface effects etc.) on fatigue strength of steel and fatigue life of leaf springs. This has already led to the modification of existent production procedure of spring steel, the increase of its cleanness resulting also in a significantly increased fatigue life of certain leaf springs tested by the spring producer.

10. Samo za aplikativne projekte!

Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri aplikativnem projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni

Cilj	
F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin
	Zastavljen cilj <input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat <input type="text" value="Dosežen"/>
	Uporaba rezultatov <input type="text" value="V celoti"/>
F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj
	Zastavljen cilj <input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat <input type="text" value="Dosežen"/>

	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih
F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.04	Dvig tehnološke ravni	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	Delno
F.05	Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	Delno
F.06	Razvoj novega izdelka	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.07	Izboljšanje obstoječega izdelka	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.08	Razvoj in izdelava prototipa	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.09	Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.10	Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.11	Razvoj nove storitve	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.12	Izboljšanje obstoječe storitve	

	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.13	Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen bo v naslednjih 3 letih <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	Delno <input type="text"/>
F.14	Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	Delno <input type="text"/>
F.15	Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.16	Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.17	Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE

	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.23	Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.24	Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen bo v naslednjih 3 letih <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih <input type="text"/>
F.25	Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.26	Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.27	Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.28	Priprava/organizacija razstave	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.29	Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.30	Strokovna ocena stanja	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	

		<input type="text"/>
F.31	Razvoj standardov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.32	Mednarodni patent	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.33	Patent v Sloveniji	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.34	Svetovalna dejavnost	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.35	Drugo	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

Komentar

11. Samo za aplikativne projekte!

Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv	
G.01	Razvoj visoko-šolskega izobraževanja					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.01.03.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02	Gospodarski razvoj					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	

G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.07.	Večji delež izvoza	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.08.	Povečanje dobička	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.09.	Nova delovna mesta	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.12.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03	Tehnološki razvoj					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.04.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04	Družbeni razvoj					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.06.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete					
G.06.	Varovanje okolja in trajnostni razvoj					
G.07	Razvoj družbene infrastrukture					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.03.	Energetska infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.04.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva					
G.09.	Drugo:					

Komentar

--

12. Pomen raziskovanja za sofinancerje, navedene v 2. točki [12](#)

1.	Sofinancer	Štore Steel, Podjetje za proizvodnjo jekel, d.o.o.
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje	36.222,00
		EUR

		trajanja projekta je znašala:	
		Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:	25,00 %
Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja			Šifra
	1.	Sofinancer je pridobil nova znanja na področju metodologije dinamičnega preizkušanja (utrujanja) in modeliranja kovinskih materialov (vzmetnih jekel)	F.01
	2.	Raziskovalci v okviru RO sofinancerja so pridobili nova specifična znanstvena spoznanja o vplivu segregacij, vključkov in drugih napak kovinskih materialov na dinamične lastnosti vzmetnih jekel	F.03
	3.	Na osnovi rezultatov pričujočega projekta je izboljšana tehnologija izdelave in tehnološka raven kontrole kvalitete vzmetnih jekel	F.04
	4.	Na osnovi rezultatov pričujočega projekta je izboljšana kvaliteta in konkurenčna sposobnost obstoječega izdelka	F.07
	5.	Na osnovi znanstvenih spoznanj in rezultatov projekta sta postavljeni hipotezi za dve novi doktorski disertaciji, ki sta v teku in bosta predvidoma zaključeni drugo leto	D.09
Komentar		Sofinancer ocenjuje, da je opravljeno delo in rezultati v okviru njegovih pričakovanj	
Ocena		Iz priloženega mnenja sofinancerja je razvidno, da rezultati projekta opravičujejo v projekt vložena finančna sredstva	
2.	Sofinancer		
		Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:	EUR
		Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:	%
Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja			Šifra
	1.		
	2.		
	3.		
	4.		
	5.		
Komentar			
Ocena			
3.	Sofinancer		
		Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:	EUR
		Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:	%
Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja			Šifra
	1.		
	2.		
	3.		

		4.	
		5.	
Komentar			
Ocena			

C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja, za objavo 6., 7. in 8. točke na spletni strani <http://sicris.izum.si/> ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

Podpisi:

Borivoj Šuštaršič	in	
podpis vodje raziskovalnega projekta		zastopnik oz. pooblaščen oseba RO

Kraj in datum:

Ljubljana

21.4.2011

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2011-1/6

¹ Zaradi spremembe klasifikacije družbeno ekonomskih ciljev je potrebno v poročilu opredeliti družbeno ekonomski cilj po novi klasifikaciji. [Nazaj](#)

² Samo za aplikativne projekte. [Nazaj](#)

³ Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja ter rezultate in učinke raziskovalnega projekta. Največ 18.000 znakov vključno s presledki (približno tri strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

⁴ Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

⁵ V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta (obrazložitev). V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

⁶ Navedite največ pet najpomembnejših znanstvenih rezultatov projektne skupine, ki so nastali v času trajanja projekta v okviru raziskovalnega projekta, ki je predmet poročanja. Za vsak rezultat navedite naslov v slovenskem in angleškem jeziku (največ 150 znakov vključno s presledki), rezultat opišite (največ 600 znakov vključno s presledki) v slovenskem in angleškem jeziku, navedite, kje je objavljen (največ 500 znakov vključno s presledki), izberite ustrezno šifro tipa objave po Tipologiji dokumentov/del za vodenje bibliografij v sistemu COBISS ter napišite ustrezno COBISS.SI-ID številko bibliografske enote.

Navedeni rezultati bodo objavljeni na spletni strani <http://sicris.izum.si/>.

PRIMER (v slovenskem jeziku):

Naslov: Regulacija delovanja beta-2 integrinskih receptorjev s katepsinom X;

Opis: Cisteinske proteaze imajo pomembno vlogo pri nastanku in napredovanju raka. Zadnje študije kažejo njihovo povezanost s procesi celičnega signaliziranja in imunskega odziva. V tem znanstvenem članku smo prvi dokazali... (največ 600 znakov vključno s presledki)

Objavljeno v: OBERMAJER, N., PREMZL, A., ZAVAŠNIK-BERGANT, T., TURK, B., KOS, J.. Carboxypeptidase cathepsin X mediates $\beta 2$ - integrin dependent adhesion of differentiated U-937 cells. Exp. Cell Res., 2006, 312, 2515-2527, JCR IF (2005): 4.148

Tipologija: 1.01 - Izvirni znanstveni članek

COBISS.SI-ID: 1920113 [Nazaj](#)

⁷ Navedite največ pet najpomembnejših družbeno-ekonomsko relevantnih rezultatov projektne skupine, ki so nastali v času trajanja projekta v okviru raziskovalnega projekta, ki je predmet poročanja. Za vsak rezultat navedite naslov (največ 150 znakov vključno s presledki), rezultat opišite (največ 600 znakov vključno s presledki), izberite ustrezen rezultat, ki je v Šifrantu raziskovalnih rezultatov in učinkov (Glej: <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/sif-razisk-rezult.asp>), navedite, kje je rezultat objavljen (največ 500 znakov vključno s presledki), izberite ustrezno šifro tipa objave po Tipologiji dokumentov/del za vodenje bibliografij v sistemu COBISS ter napišite ustrezno COBISS.SI-ID številko bibliografske enote.

Navedeni rezultati bodo objavljeni na spletni strani <http://sicris.izum.si/>. [Nazaj](#)

⁸ Navedite rezultate raziskovalnega projekta v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ker se ga v sistemu COBISS ne vodi). Največ 2.000 znakov vključno s presledki. [Nazaj](#)

⁹ Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani: <http://sicris.izum.si/> za posamezen projekt, ki je predmet poročanja. [Nazaj](#)

¹⁰ Največ 4.000 znakov vključno s presledki [Nazaj](#)

¹¹ Največ 4.000 znakov vključno s presledki [Nazaj](#)

¹² Rubrike izpolnite/prepišite skladno z obrazcem "Izjava sofinancerja" (<http://www.arrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>), ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2011-1 v1.01

4A-AE-0D-34-63-C0-E4-69-BF-34-BD-8A-97-FE-77-AA-40-82-76-B4

Štore, 07.04.2011

MNENJE SOFINANCERJA PROJEKTA

Naslov projekta: Modeliranje trajne nihajne trdnosti vzmetnih jekel in napoved uporabne dobe listnatih vzmeti

Izvajalca: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana
Štore Steel - Tehnični razvoj, Štore

Odgovorni nosilec: doc. dr. Borivoj Šuštaršič

Štev. projekta: I.2-9752

Štev. pogodbe: 1000-07-219752

Kot je razvidno iz tekočih delovnih poročil, zaključnega poročila, domačih in mednarodnih predavanj ter objav so bile v okviru projekta opravljene vse predvidene raziskave. Rezultati projekta pa omogočajo nadgradnjo znanja ter izboljšanje obstoječe izdelave in kontrolo kakovosti visoko-kvalitetnih vzmetnih jekel. S tem rezultati projekta se v celoti opravičujejo vložena sredstva.

V okviru prve faze projekta je bila izvedena analiza stanja izhodne mikrostrukture, optimirana je bila konvencionalna in vakuumška toplotna obdelave ter določene so bile statične mehanske lastnosti in trajna nihajna trdnost ($K_f=3,9$; $f=180$ Hz, $R=0,05$ in $0,1$) na visokofrekvenčnem pulzatorju (VF) pulzatorju na vzorcih izbranega vzmetnega jekla. Določen je bil faktor koncentracije napetosti za popolno elastično in elasto-plastično obnašanje vzmetnega jekla v realnih pogojih preizkušanja preizkušancev izbrane geometrije in velikosti na VF z različnimi numeričnimi metodami na osnovi končnih elementov (MKE), kot izhodišče za napoved uporabne dobe listnatih vzmeti. Posnete in digitalizirane so realne geometrije dveh tipov (eno-listnata in dvo-listnata izvedba) vzmeti in izvedene so prve simulacijami utrujanja na osnovi MKE. Izvedena je bila primerjava rezultatov, ki so bili doseženi pri tehnološkem testiranju na vzmeteh z realno geometrijo.

V okviru druge faze projekta je v tovarni potekala modifikacija (izboljšava) postopka izdelave vzmetnega jekla, ki bo verjetno predmet patenta. Rezultati tehnološkega preizkušanja vzmeti so pokazali bistveno izboljšanje dobe trajanja vzmeti (2 do 3-krat). Izdelano je predvideno statistično relevantno število ploščatih (CVN) in cilindričnih preizkušancev z različnimi faktorji zareznega učinka ($K_f=1, 2$ in $3,9$) za izvedbo preizkusov utrujanja izbranega vzmetnega jekla, ki je bilo izdelano po novem modificiranem postopku. Preizkušanci so bili vakuumsko toplotno obdelani na dva trdnostna razreda (1400 in 1600 MPa) in dinamično preizkušeni v treh različnih načinih obremenjevanja (B - upogibnem, T/C - natezno-tlačnem in R/B - rotacijsko upogibnem) pri dveh različnih načinih obremenitvah ($R=-1$ in $R=0,1$). Določena je bila trajna nihajna trdnost v R/B načinu za obe vrsti toplotne obdelave. Ta je od 382-386 MPa pri $K_f=1$. Toplotna obdelava vpliva predvsem na nagib S/N krivulje. Tako je $N_d=1,03 \cdot 10^6$ pri toplotni obdelavi na višji trdnostni razred in $N_d=0,56 \cdot 10^6$ pri toplotni obdelavi na nižji trdnostni razred. V teku 1. in 2. faze projekta je potekala tudi

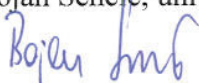
prenova mehanskega laboratorija na IMT Ljubljana in nabavljen je nov modern računalniško podprt ± 250 kN dinamični preizkuševalnega stroj Instron 8802. Končano je bilo spoznavanje stroja in programske opreme ter osvojena metodologija dinamičnega preizkušanja tako, da se je pričelo tudi preizkušanje na cilindričnih preizkušancih v T/C načinu ($K_t=2$, $f=5-25$ Hz). V drugi fazi projekta je bilo osvojeno tudi raziskovalno delo z novo programsko opremo za izračun termodinamskih ravnotežij kompleksnih zlitinskih sistemov Thermocalc s katero se lahko teoretično napovedujejo oz. predvidijo učinki spremembe tehnologije izdelave jekla in nastanek različnih faz. Programska oprema omogoča tudi napoved pogojev strjevanja in toplotne obdelave. V okviru projekta so nadaljevali z modeliranjem utrujanja na osnovi MKE in izvedene so bile že primerjave rezultatov, ki so bili doseženi pri tehnološkem testiranju na vzmeteh z realno geometrijo. Napoved dobe trajanja (angl.: fatigue life) temelji na teoriji akumuliranja poškodb (DAT; angl.: Damage Accumulation Theory). Teorija predpostavlja, da izmenični napetostni cikli nad trajno trdnostjo povzročajo merljive trajne poškodbe. Prav tako privzema, da je celotna poškodba posledica vsote posameznih poškodb, ki so nastale pri utrujanju materiala na posameznih napetostnih nivojih. Rezultati simulacij z upoštevanjem eksperimentalnih preizkusov kažejo zadovoljivo ujemanje z rezultati tehnološkega testiranja.

V 3. fazi projekta so potekali in bili končani praktični preizkusi določevanja S-N krivulj v T/C načinu na nezarezanih in zarezanih cilindričnih preizkušancih izdelanih iz izbranega vzmetnega jekla, toplotno obdelanega na dva trdnostna razreda in v dveh smereh (vzporedno s smerjo valjanja in pravokotno na smer valjanja oz. izcej glavnih zlitinskih elementov). Preizkusi so pokazali odločujoč vpliv izcej na dinamične lastnosti jekla. Trajna dinamična trdnost jekla je v smeri valjanja do 25 % višja kot v smeri pravokotno nanj. Dodaten vpliv ima ustrezna toplotna obdelava. Jeklo obdelano na višji trdnostni nivo ima do 10 % višjo trajno nihajno trdnost. Vsi ti rezultati služijo za uspešno napoved dobe trajanja vzmeti z izbrano geometrijo na osnovi MKE, kakor tudi pomagajo pri ustreznem ukrepanju ter vodenju proizvodnje in izdelave superčistega visokokakovostnega vzmetnega jekla. V zadnji fazi projekta so bili izdelani tudi modeli cilindričnih preizkušancev in izvedena je simulacija dinamičnega preizkušanja na novem Instronu z MKE. Rezultati praktičnih preizkusov se zelo dobro ujemajo z numeričnimi simulacijami, kar potrjuje uporabnost DAT za napoved dobe trajanja strukturnih in strojnih elementov izdelanih iz visokotrdnih vzmetnih jekel. Poleg numeričnih simulacij na osnovi MKE in napovedovanja dobe trajanja vzmeti z realno geometrijo je v okviru projekta razvit tudi inovativen pristop določevanja dobe trajanja na osnovi kritične velikosti vključkov s pomočjo genetskega programiranja. Rezultati so pokazali, da je kritična velikost vključka za izbrane pogoje preizkušanja dvolistaste vzmeti cca 140 μ m. Ta kritična velikost vključkov je bila potrjena tudi z lomnomehanskimi preiskavami na cilindričnih zarezanih preizkušancih. Metalografske preiskave pod optičnim in elektronskim mikroskopom so pokazale, da je velikost vključkov v preiskovanem jeklu (50 μ m) izdelanem po modificirani tehnologiji precej pod to kritično velikostjo in posledično je precej daljša doba trajanja vzmeti pri izbranih pogojih preizkušanja.

Realizacija programa projekta je potekala po predvidenem programu. Zaradi zamud pri nabavi novega preizkuševalnega stroja in kompletne prenove mehanskega laboratorija ter nepričakovane okvare VF pulzatorja je prišlo do nekaterih zamud v 2. fazi projekta, ki pa so bile z nadpovprečnim angažmajem raziskovalcev nadoknadene predvsem v 3. (zaključni) fazi projekta, saj je izvajanje praktičnih preizkusov potekalo tudi preko vikendov. Kot je bilo zapisano že uvodoma je realizacija celotnega projekta v obsegu pričakovanj sofinancerja.

Koordinator projekta:

Bojan Senčič, univ.dipl.ing.



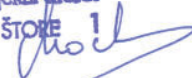
Glavni direktor:

Marjan Mačkošek, univ.dipl.ing.

ŠTOREQSTEEL

Podjetje za proizvodnjo jekel d.o.o.

Železarska cesta 3, 3220 ŠTORE



Borivoj Šuštaršič¹ (*Times New Roman 10 italic – style – autori*)
Predrag Borković¹
Wifried Echlseeder²
Gerhard Gerstmayr²
Ataollah Javidi²
Bojan Senčič³
.....³ (*last author 6 pt spacing after*)

FATIGUE STRENGTH AND MICROSTRUCTURAL FEATURES OF SPRING STEEL

Originalni naučni rad / Original scientific paper
UDK /UDC:
Rad primljen / Paper received:

Adresa autora / Author's address:
1) Institute of Metals and Technology, Ljubljana, Slovenia
2) Institute of Mechanical Engineering, Leoben, Austria
3) Štore Steel, Štore, Slovenia

Ključne reči

- Opružni čelik
- S-N krive
- Jačina zamaranja (dinamička izdržljivost)
- zarezni efekat
- mikrostruktura

Keywords

- Spring steel
- S-N curves
- fatigue strength
- notch effect
- microstructure

1.7 cm

8.5 cm

0.6 cm

8.5 cm

1.7 cm

Izvod

Poznavanje lokalnih dinamičkih osobina čelika, kao i lokalnih uslova opterećenja je neophodno za analizu zamaranja i predviđanje životnog veka komponenata od opružnog čelika. U našem slučaju od velikog značaja su jednolisnate i dvolisnate opruge karakteristične geometrije napravljene od 51CrV4 čelika za opruge, proizvedenog u slovenačkoj fabrici čelika "Štore Steel". Dinamička izdržljivost izabranog čelika je određena na dva načina zamaranja za dva različita uslova toplotne obrade i za dva krajnja pravca segregacija legiranih elemenata. Izvedeno je određivanje mikrostrukture izabranog čelika kao i fraktografska ispitivanja površine loma. Rezultati dobijeni zamaranjem opružnog čelika omogućavaju predviđanje životnog veka čelika upotrebom koncepta lokalnog naponskog gradijenta.

Abstract

Knowledge about the local dynamic properties of steel, as well as the local loading conditions is absolutely necessary for the fatigue analysis and life time prediction of spring steel components. Mono-leaf and double-leaf springs of specific geometry made of 51CrV4 spring steel, manufactured in the Slovenian steel plant Štore Steel are of interest in this case. Fatigue strength of the selected steel was determined in different loading modes for two different heat-treatment conditions and two outmost directions of segregations of alloying elements. Microstructural characterisation of the selected steel was performed, as well as fractographic examination of fractured surfaces. The experimental results enable fatigue life prediction of spring steels using the local stress gradient concept.

INTRODUCTION

Spring manufacturers use different types of spring steels in the range of strength level from 1200 up to 1800 MPa. Parabolic double and mono-leaf springs made of the highest strength, quality and safety level are a very important market product for many spring steel producers. The highest quality level of spring steel requires the appropriate fine grained microstructure, without segregations, large inclusions and surface defects. However, the final quality of the manufactured spring does not depend on steel quality only. It also depends significantly on the springs manufacture (hot forming; i.e.: profiling, eye making, punching etc), as well as final heat- and surface-treatment (shot-peening). Therefore, high quality steel profile (semi product) does not necessarily mean a high quality spring (final product). Standardized dynamic (fatigue) testing on steel specimens and structural testing of springs is a time consuming and expensive task. Frequently, the information about a definite steel batch quality based on accelerated (up to approx. 2×10^5 cycles at frequency approx. 1-5 Hz) structural testing of springs is too late for the steel producer, as well as spring consumer. The testing results can generally be used only for complaint purposes. Former investigations clearly showed that the spring steel producer has to perform not only regular conventional tensile testing and hardness measurements but also dynamic testing (batch to batch) of the produced steel. It was shown that determination of fatigue bend strength on standard Charpy V-notched (CVN) samples with a high frequency pulsator is relatively fast, long-term cost acceptable and gives adequate data about steel quality (1). It can even serve for life time assessment of springs with given or selected loading conditions based on simple stress concentration and notch-sensitivity factors approach (2) although geometry, surface quality and other influencing factors (roughness, shot peening, larger defects, etc.) are not taken into consideration. This simple approach considers only experimental S-N curves determined on CVN samples (cut off from the actual spring or steel profile) obtained at selected loading conditions (similar as performed with structural testing of springs) and its transfer to flat un-notched profiles. However, this approach and microstructure investigations showed some incompleteness especially if larger defects (inclusions, decarburized surface (3), strong change of segregation orientation and width) are present in the steel. A new scientific Austria-Slovenia bilateral collaboration between IMT, Ljubljana and IME, University of Leoben, Austria started last year. This was an opportunity to use a local stress gradient concept for fatigue life analysis of the selected spring steel and assess its usability for finite element method (FEM) based life-time prediction of mono-leaf and double-leaf springs of the selected size and geometry. Nowadays, FEM based analysis of mono and multi-leaf springs is very often used and it has been performed by different authors (4-8) in the last ten years. The approaches to FEM are very different and based on different concepts. Some commercial computer codes based on the stress or strain life approach and cumulative damage analysis (9) are already accessible (FEMFAT,

Ansys, Abaqus, SolidWorks, Deform etc.) for the life time prediction of dynamically loaded structural elements. But, without adequate understanding of the problem and experimental results these tools are useless. Recently (10), very interesting approach based on genetic programming and analysis of defect size at the fracture surface has also been used.

The term *clean steel* or even *super-clean steel* has become a standard in the modern production of P/M high-strength tool and high-speed steels (11). For spring steels one can notice a similar tendency (12). The investigations showed (13) that in order to avoid the formation of larger inclusions in the production of clean steel, the following factors are very important: the proper selection and quality of insulation bricks, knowledge of the metal-slag-refractory interactions and the type of deoxidation process used during steel production. Interruptions during continuous casting (CC) of steel can also cause formation of larger inclusions (14, 15). All these factors can drastically influence the steel quality. Metallographic control of steel can even show sound and relatively clean steel without larger inclusions. But a standard metallurgical sample for regular quality control is relatively small and can not show the real state. In some parts of large 60-tons or even larger batches regions with extra large inclusions can be hidden. Especially if interruptions in the steel production occur but not enough large parts of CC steel billets are refused. The complete (100 %) control of steel billets is practically impossible or too expensive. Some tests have been done with ultrasonic immersion testing (16-18), but so far, this kind of control has been very expensive and not completely successful for large CC or hot rolled billets with insufficiently smooth and oxidized surface. An additional negative effect on fatigue strength of spring steel (19-20) is caused by the formation of segregations. Segregations; i.e. changes of alloying elements (Cr, Mn) concentrations across the cross-section of CC billets are formed because of nonuniform solidification of steel billet during CC and can not be completely removed during hot working (rolling). Some investigations have even shown that besides the segregation orientation also thickness of negative to positive segregations has some effect on the mechanical properties of spring steel. Recently, for the reduction of segregations the so called continuous soft reduction (CSR) devices adapted to continuous casting systems have been developed. However, this demands high investment. Therefore, at the moment the only solution is very precise and in all phases as much as possible continuous well defined and controlled process of steel manufacturing. Recently, Štore Steel plant has made considerable efforts to increase the cleanliness and quality of produced spring steels. The steel manufacturing technology was modified and cleanliness of steel was significantly improved. This was confirmed by the customers' technological tests of leaf springs. The springs survived more than 2×10^5 cycles at the selected loading conditions compared to the previous tests below 10^5 cycles. This provided a good opportunity to investigate and analyse deeply the steel quality regarding fatigue.

In this paper results of fatigue strength determination of the selected spring steel manufactured with a modified technology are presented. Microstructural characterisation by light (LM) and scanning electron microscopy (SEM/EDS) of the selected steel, as well as fractographic examination of fractured surfaces are also presented. The results enable fatigue life prediction of spring steels using the local stress gradient concept (9), taking into account the selected leaf spring geometry, the mechanical properties of spring steel and the conditions of fatigue.

EXPERIMENTAL WORK

The investigated spring steel is designated as standard DIN 51CrV4 (W. Nr.:1.8159, EN 10089). It is produced with a modified deoxidation technology in the steel plant Štore Steel, Slovenia. The final ladle-treatment (degassing, refinement, alloying, etc.) of liquid steel and continuous casting of steel melt into ingots with the dimensions 140×140×3750 mm are performed after melting of steel scrap in a 60-ton electro-arc furnace. Finally, CC ingots are preheated, hot rolled and cut into semi finished profiles with dimensions of 90×28 mm and with the length of either 1318 or 1618 mm. Nominal and actual chemical compositions are given in Table 1. Steel is relatively clean with low content of phosphorus (P) and sulphur (S). The content of other oligo elements (Sn, As, Sb) is below 0.01 wt. %. However, it has also a small content of Cu and Ni (0.19 wt. % of Cu and 0.13 wt. % of Ni). The aluminium content is 0.006 wt. %.

Tabela 1. Nominalni i stvarni hemijski sastav ispitivanog opružnog čelika.

Table 1. Nominal and actual chemical compositions of the investigated spring steel.

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
51CrV4	Wt. %							
Nominal	0.47-0.55	0.15-0.40	0.7-1.0	0.9-1.2	0.05-0.10	0.1-0.2	<0.015	<0.01
As analysed	0.52	0.35	0.96	0.94	0.05	0.12	0.011	0.004

The selected matrix of experiments is shown in Table 2. Specimens for mechanical testing are cut off of hot rolled profiles. As can be seen, fatigue strength (S-N curves) of the selected steel was determined in two different loading modes; i.e. tension-compression (T/C) and rotating-bending (R/B) for two different heat-treatment conditions (HT1 and HT2) and two outmost directions of alloying element segregations. For the determination of S-N curves standard smooth (Fig 1 a) and notched (Fig. 1 b) cylindrical specimens with different stress concentration factors were used. Fatigue testing of T/C specimens was performed at IMT, Ljubljana with the ±250 kN Instron 8802 universal servo-hydraulic testing machine. The dynamic four-point R/B testing of smooth cylindrical specimens was performed at IME, University of Leoben, Austria in the frame of Austria-Slovenia bilateral collaboration.

Tabela 2. Matrica eksperimenata
Table 2. Matrix of experiments

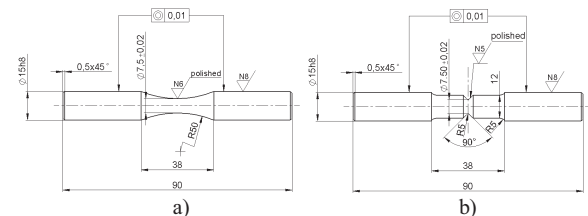
Material	Spring steel – 51CrV4							
	870 ⁰ C/10 ⁴ /475 ⁰ C/1h				870 ⁰ C/10 ⁴ /425 ⁰ C/1h			
Heat-treatment	0 ⁰		90 ⁰		0 ⁰		90 ⁰	
Segregation orientation λ*	0 ⁰		90 ⁰		0 ⁰		90 ⁰	
Type of fatigue**	T/C	R/B	T/C	R/B	T/C	R/B	T/C	R/B
Stress gradient γ*	2.5	0.27	2.5	0.27	2.5	0.27	2.5	0.27

* 0⁰ ... parallel to rolling direction,

90⁰ ... perpendicular to rolling direction

** T/C ... tension-compression, R/B ... rotating bending

For this type of steels, generally oil or water quenching from austenizing temperature followed by the tempering in a batch furnace is performed. This gives the steel a complete tempered martensite structure. Previous investigations (2) showed that in this case this steel can give very high strength at an acceptable ductility ($R_m \approx 1800$ MPa, $R_{p0.2} \approx 1700$ MPa, $A \approx 8\%$ in $Z \approx 45\%$ at $HRC \approx 50$ and $CVN = 8-9$). In the present case vacuum heat-treatment (21) was used. This enabled easier mechanical preparation of specimens and only surface mechanical polishing of specimens was performed after heat-treatment. In this case, the cooling rate ($t_{8/5} \approx 42-46''$) during fast cooling in nitrogen (5 bars) is lower. The result is presence of a small content of lower bainite in tempered martensite structure. Therefore, a little lower tensile strength and yield point are obtained, but they are still in the required strength region (1400-1600 MPa). One author (22) even suggests improvement of dynamic properties if small amount of bainite is present in the steel matrix.



Slika 1. Standardni glatki (a) i zarezani cilindrični uzorak (b) dimenzija $\phi 15/7.5 \times 90$ mm, korišteni za određivanje S-N kriva ispitivanog opružnog čelika.

Figure 1. Standard smooth (a) and notched cylindrical specimen (b) dimensions of $\phi 15/7.5 \times 90$ mm, used for determination of S-N curves of investigated steel.

Standard metallographic samples have been prepared for microstructural and micro-chemical investigations of steel matrix and inclusions under light (LM) and scanning electron microscope (FE SEM/EDS). The microstructures were observed at different magnifications in the rolling and perpendicular directions. SEM fractographic examinations of characteristic broken specimens after fatigue were also made.

RESULTS AND DISCUSSION

In Table 3 the results of tensile tests and hardness measurements of the investigated steel are given. Tensile tests were performed on standard cylindrical specimens with dimensions of M12/ $\phi 8 \times 75/48$ mm with the Instron 1255/8800 universal servo-hydraulic testing machine.

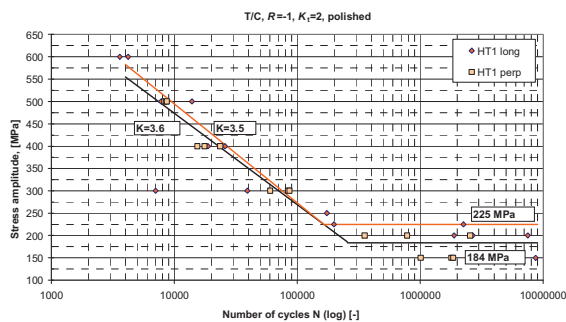
Tabela 3. Prosečne vrednosti testa na kidanje i tvrdoće ispitivanog čelika.

Table 3. Average tensile properties and hardness of the investigated steel.

Specimen orientation	Heat treatment	Yield strength	Tensile strength	Fracture elongation [%]	Fracture contraction [%]	Hardness HRc
		[MPa]				
Perpendicular ($\lambda=90^\circ$)	HT1	1502	1591	5.16	15.8	45.8
	HT2	1373	1448	7.04	24.6	43.0
Longitudinal ($\lambda=0^\circ$)	HT1	1502	1606	9.9	42	45.0
	HT2	1366	1442	10.6	41	43.4

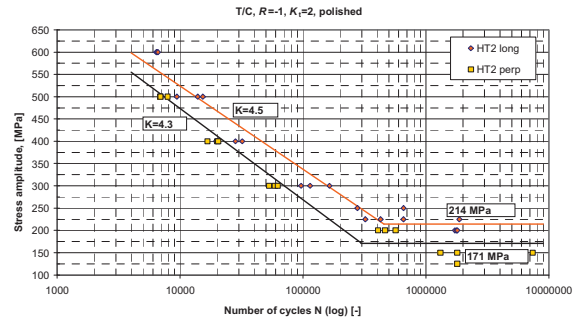
Heat-treatment HT1 (austenizing at 870°C for 10', fast cooling in N_2 and tempering at 425°C for 1 hour) gives higher Rockwell hardness (HRc), tensile strength (R_m) and yield point ($R_{p0.2}$) but lower ductility (A and Z) compared to HT2 (austenizing at 870°C for 10', fast cooling in N_2 and tempering at 475°C for 1 hour). As one can be seen, with two different tempering conditions, two different strength levels (1450 and 1600 MPa) of spring steel were obtained. However, segregation orientation does not influence significantly the static mechanical properties of the investigated steel.

Figs. 2 and 3 show S-N curves obtained in T/C fatigue regime on notched cylindrical samples for two different heat-treatment conditions and segregation orientation. It can be seen that the fatigue strength of longitudinally oriented material is higher. HT1 also gives a little higher fatigue limit compared to HT2. Interestingly, in both cases the slopes of S-N curves are almost the same for the same heat-treatment independently of the segregation orientation.



Slika 2. S-N krive za HT1 materijal za T/C način zamaranja ($R=-1$), dobijenih iz uzoraka sa zarezom, koji su uzeti u dva segregacijska pravca.

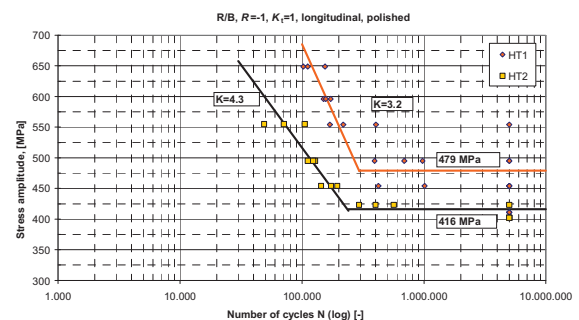
Figure 2. S-N curves of HT1 material for T/C mode of fatigue ($R=-1$) obtained on notched samples with two different orientations of segregations.



Slika 3. S-N krive za HT2 materijal za T/C način zamaranja ($R=-1$), dobijenih iz uzoraka sa zarezom, koji su uzeti u dva segregacijska pravca.

Figure 3. S-N curves of HT2 material for T/C mode fatigue ($R=-1$), obtained on notched samples with two different orientations of segregations.

Figure 4 shows the S-N curve obtained in the R/B regime on smooth cylindrical samples for two different heat-treatment conditions and longitudinal segregation orientation. As one can see the fatigue strength of the HT1 material is significantly higher. Again, the slopes for both heat-treatments conditions are similar to the slopes obtained in the T/C fatigue mode.



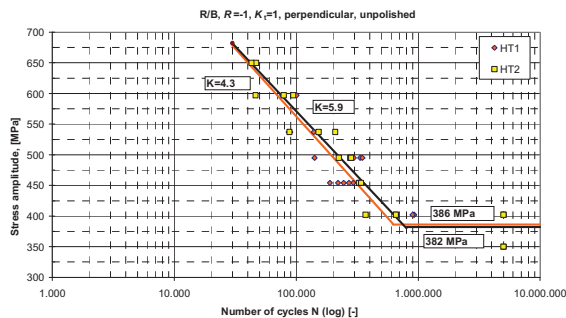
Slika 4. S-N krive za HT1 i HT2 materijal za R/B način zamaranja ($R=-1$), dobijenih iz glatkih uzoraka, koji su uzeti u uzdužnom pravcu segregacija

Figure 4. S-N curves of HT1 and HT2 materials for R/B mode fatigue ($R=-1$), obtained on smooth samples with longitudinal orientation of segregations.

Fatigue strength obtained on smooth samples in the R/B regime is approximately two times higher compared to the fatigue strength obtained in the T/C regime on notched samples. It is in good agreement with the theoretical notch sensitivity factor of used specimens ($K_t=1$ and $K_t=2$) neglecting the mode of fatigue.

Initial fatigue testing in the R/B mode has been performed on smooth but only grinded (unpolished) samples. The results showed a big influence of surface roughness. The influence of heat-treatment was almost lost (Fig. 5) and the

fatigue strength is almost 25 % lower compared to the smooth polished longitudinal specimens.

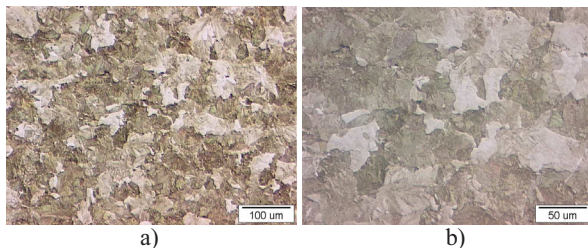


Slika 5. S-N krive za HT1 i HT2 materijal za R/B način zamaranja ($R=-1$), dobijenih na brušenim uzorcima, koji su uzeti poprečno u odnosu na pravac segregacija

Figure 1. S-N curves of HT1 and HT2 material for R/B mode fatigue ($R=-1$), obtained on grinded (unpolished) samples with perpendicular orientation of segregations.

The fatigue testing has shown a relatively big scatter of results. In some cases the fatigue failure occurred at an unexpectedly low number of cycles. Therefore, microstructural and micrographic observation of characteristic samples was performed.

Figures 6a and 6b show a typical ferrite-pearlite microstructure of the investigated spring steel in the as-delivered (hot rolled) condition. The microstructure changes to a mainly fine tempered martensite structure after vacuum heat-treatment (Figures 7a and 7b). This gives the steel the required strength and toughness.

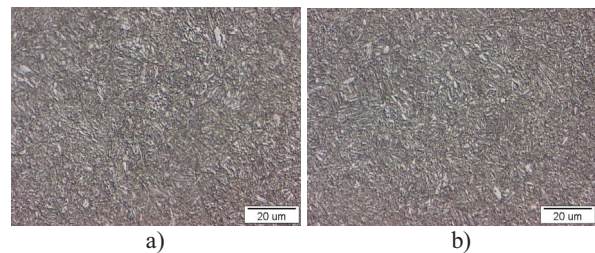


Slika 6. Karakteristična mikrostruktura ispitivanog opružnog čelika u toplo-valjanom stanju: uvećanje 100-puta (a) i uvećanje 200-puta (b); poprečno u odnosu na pravac valjanja (segregacija), optički mikroskop, nagriženo u nitalu.

Figure 6. Typical microstructure of investigated spring steel, in hot-rolled condition: magnification 100-times (a) and magnification 200-times (b); perpendicular to the rolling direction LM, etched in nital.

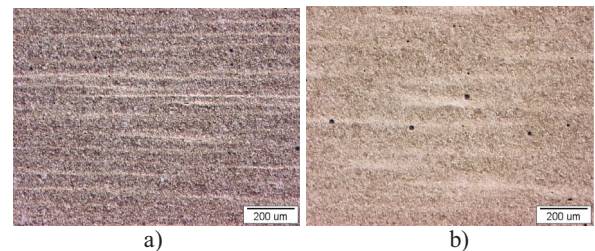
Differences between parallel and perpendicular rolling directions in microstructure are not visible at higher magnification. However, the segregation orientation can be clearly noticed only at lower magnifications under LM (Figs. 8). The differences in segregation morphology are also noticed. In some cases very thin and evenly distributed segregations (Figure 8a) are noticed. On the other side thicker and wider segregations (Figure 8b) are visible. In

Figure 8b also some smaller spherical inclusions in the steel matrix can be noticed.



Slika 7. Klasična mikrostruktura finog martenzita ispitivanog toplotno obrađenog opružnog čelika, uvećanje 500-puta; poprečno (a) i uzdužno (b) u odnosu na pravac valjanja (segregacija), optički mikroskop, nagriženo u nitalu.

Figure 7. Typical fine martensitic microstructure of investigated spring steel in heat-treated condition; magnification 500-times; perpendicular (a) and longitudinal to the rolling direction (b); LM, etched in nital.



Slika 8. Mikrostruktura ispitivanog toplotno-obrađenog opružnog čelika sa karakterističnom morfologijom segregacija; uvećanje 50-puta; uzdužno sa pravcem valjanja: sa užim (a) i debljim (b) trakama pozitivnih i negativnih segregacija; optički mikroskop, nagriženo u nitalu

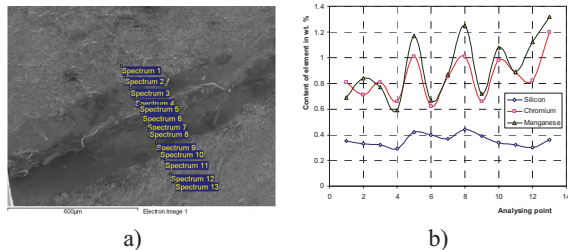
Figure 2. Microstructure of investigated spring steel in heat-treated condition with well visible morphology of segregations; magnification 50-times; parallel to the rolling direction: fine (a) and thicker (b) strings of positive and negative segregations; LM, etched in nital.

This inhomogeneous microstructure contributes to the larger scatter of mechanical properties of the steel. The significant influence of segregation on fatigue strength is proved by the SEM/EDS microanalyses. The fracture surface of fractured sample after the T/C fatigue experiment with unexpectedly low cycles to failure was investigated. The fractography and the analysis showed that fracture initiation starts and proceed in the region of large segregation (Figure 9). The analyzed points with higher concentration of alloying elements have also higher oxygen content. This is natural because of high affinity of Si, Mn and Cr to oxygen.

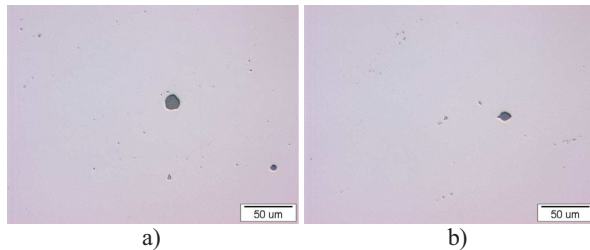
Detailed microstructural and micro-chemical investigations have shown that different types of, mainly oxide based inclusions are present in the steel. Figures 10 to 12 show the typical size and shape of the inclusions.

Image analyses showed that the largest spherical inclusions have a diameter below 50 μm , but elongated thinner stringers have length even up to 400 μm . SEM/EDS microanalyses showed that sulphide (MnS), calcium-

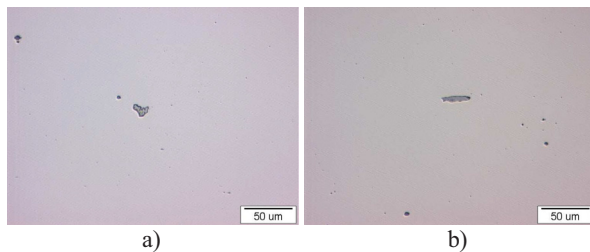
alumo-silicate and other complex mainly oxide inclusions are present. Some of them are chemically inhomogeneous (Figs. 13). These defects can also significantly contribute to a bigger scatter and lower fatigue strength of the investigated steel.



Slika 9. a) SEM/EDS linearna tačkasta analiza preko mjesta inicijacije pukotine (segregacije) i b) promena koncentracije glavnih legiranih elemenata.
Figure 3. a) SEM/EDS linear point analysis across the fracture initiation site (segregation) and b) change of main alloying elements concentration.



Slika 10. Karakteristična morfologija uključaka u ispitivanom opružnom čeliku; uvećanje 200-puta (a) i okrugli uključak sa karakterističnim repovima (b); optički mikroskop, samo polirano.
Figure 4. Typical morphology of inclusions in the investigated spring steel; magnification 200-times; spherical (a) and spherical with typical tails (b); LM, polished only.

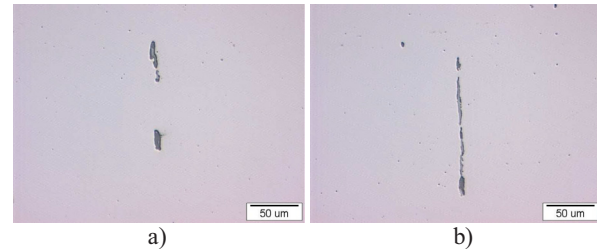


Slika 11. Karakteristična morfologija uključaka u ispitivanom opružnom čeliku; uvećanje 200-puta: neregularnog (a) i izduženog oblika (b); optički mikroskop, samo polirano.
Figure 5. Typical morphology of inclusions in the investigated spring steel; magnification 200-times; irregular (a) and elongated (b); LM, polished only.

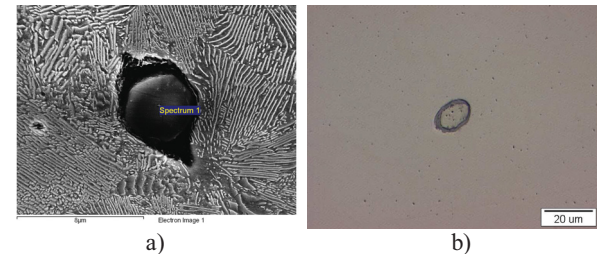
CONCLUSIONS

Our investigations have shown that the modified steel technology still does not give super clean steel. The investigated steel seems metallographically sound, without larger inclusions. The largest globular inclusions have the size of the order of 50 μm . This could be already above the critical size for crack initiation. In our case, the highest influence on the dynamic properties of the investigated

steel has the segregations of alloying elements. The fatigue strength of steel is almost 25 % higher in the longitudinal compared to the perpendicular orientation of segregation.



Slika 12. Karakteristična morfologija uključaka u ispitivanom opružnom čeliku; uvećanje 200-puta: pojedinačni izduženi kompleksni (a) i trakasti (b) uzdužno u odnosu na pravac valjanja (segregacije); optički mikroskop, samo polirano.
Figure 6. Typical morphology of inclusions in the investigated spring steel; magnification 200-times; individual elongated complex (a) and stringers (b) parallel to the rolling (segregation) direction; LM, polished only.



Slika 13. Kompleksni uključci u čeličnoj osnovi: sitni uključci na osnovu $(\text{Al, Mg, Mn})_x\text{O}_y$ u perlitnoj strukturi, SEM/EDS-BS (a) i dvokomponentni uključci; MnS vanjski i oksid na osnovu Ca-Al sredina uključka (b), optički mikroskop, samo polirano.
Figure 7. Complex inclusions in steel matrix: fine $(\text{Al, Mg, Mn})_x\text{O}_y$ based inclusion in a pearlite structure, SEM/EDS-BS (a) and two-component inclusion; MnS outer and Ca-Al based oxide inner (b), LM, polished only.

Appropriate heat-treatment can also contribute to the increase of the steel's fatigue strength. In our case lower tempering temperature results in higher hardness, static tensile, as well as dynamic properties. But ductility is slightly decreased. As expected, steel with higher hardness, higher tensile strength and yield point has higher (by approx. 8 %) fatigue strength. The notched cylindrical specimens ($K_t=2$) have an adequately lower fatigue limit compared to the smooth cylindrical samples ($K_t=1$) considering the selected fatigue testing mode and the type of specimens. The T/C mode fatigue testing on smooth specimens still has to be performed in order to obtain a more complete figure of the dynamic properties of the investigated steel. The investigations have shown that inappropriate preparation of surface (grinded only - unpolished) can completely hide the influence of heat-treatment conditions and decrease fatigue strength of investigated material. The obtained experimental results will enable a better FEM-based fatigue life prediction of leaf springs of the selected geometry using the local stress gradient concept and taking into account loading conditions

and experimentally determined dynamic properties of spring steel.

ACQNOWLEDGMENT

The authors wish to thank to the Slovenian Research Agency for the financial support.

REFERENCES

1. B. Šuštaršič, B. Senčič, B. Arzenšek, P. Jodin: The notch effect on the fatigue strength of 51CrV4Mo spring steel, *Materials and Technology*, 41(2007)1, pp. 29-34
2. B. Šuštaršič, B. Senčič, V. Leskovšek: Fatigue strength of spring steels and life-time prediction of leaf springs, *Assessment of reliability of materials and structures (RELMAS'2008)*, St. Petersburg, Russia, June 17-20, 2008; problems and solutions; international conference, Volume 1, St. Petersburg, Polytechnic Publishing House, 2008, pp. 361-366
3. S. Tavakkoli, F. Aslani et al: Analytical Prediction of Leaf Spring Bushing Loads Using MSC/NASTRAN and MDI/ADAMS, http://www.mscsoftware.com/support/library-conf/wuc96-11b_asla.pdf
4. M. Torkar, V. Uršič, F. Vode, M. Lamut: The application of waste silica cyclone powder for the protective coating of steel billets, *Metalurgija*, 46(2007)3, 161-164.
5. M. S. Kumar, S. Vijayarangan: Static analysis and fatigue life prediction of steel and composite leaf spring for light passenger vehicles, *Journal of Scientific and Industrial research*, 66(2007)2, pp.128-134
6. F. N. A. Refngah, S. Abdullah, A. Jalar, L. B. Chua: Fatigue life evaluation of two types of steel leaf springs, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*, 4 (2009)2, pp. 136-140
7. Niklas Philipson: Leaf spring modeling, <http://www.modelica.org/events/modelica2006/Proceedings/sessions/Session2d-1.pdf>
8. G. S. S. Shankar, S. Vijayarangan: Mono Composite Leaf Spring for Light Weight Vehicle – Design, End Joint Analysis and Testing, *ISSN 1392–1320 Materials Science (Medžiagotyra)*. 12(2006)3, pp. 220-225
9. W. Eichlseder: Enhanced Fatigue Analysis – Incorporating Downstream Manufacturing Processes, *Materials and Technology*, 44(2010)4, 185-192
10. M. Kovačič, S. Senčič: Critical inclusion size in spring steel and genetic programming, *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 57(2010)1, 17–23
11. High performance powder metallurgical cold and hot work tool steels; Uddeholms AB, Hagfors, Sweden, http://www.uddeholm.com/b_2547.htm
12. Corus; Automotive Spring Steel Products, Super-clean steel for the stringent quality demands of oil-tempered automotive spring, http://www.corusgroup.com/en/products/wire_rod-products/oil_tempered_automotive_spring/
13. J. Poirer: Impact of refractory Materials on Inclusionary Cleanliness and Steel Quality, *Clean Steel Technology*, Ceramic Forum International, 10(2008), pp. E59-E69
14. J. Chaudhuri: New Generation of Ladle Slide Gate System for Higher Performance and Economical Operation, *Clean Steel Technology*, Ceramic Forum International, 10(2008), pp. E95-E99
15. F. Tehovnik, B. Koroušič, V. Prešeren: Optimization of the modification of nonmetallic inclusions in steel with CaSi wire injection, *Kovine Zlitine Tehnologije*, 26(1992)1-2, 125-130
16. K. Matthies, H. Ernst, W. Gieschler: Bestimmung des mikroskopischen Reinheitsgrades von Stählen mit Ultraschall, *DGZfP 2002*, <http://www.ndt.net/article/dgzfp02/papers/p22/p22.htm>
17. W. Trojahn, K. Janser, O. Roesch: Experiences in Using Ultrasonic testing of Bearing Steel for Demanding Applications, *Journal of ASTM Int.*, 3(2008)9, pp. 1-7
18. D. Thiery, C. Delhaes: Higher Macro-Cleanliness of Bearing Steels Needs More Accurate Measuring Methods, *ASM, EDT 2008*, pp. 164-174
19. J. Fröschl, T. Kierner, K. Mayrhofer, G. Hohenbichler, W. Eichlseder: Fatigue Studies in Hot Rolling Mills with Respect on Forging Effects and Multiaxial Loading, *Tagungsband 1, Leobener Betriebsfestigkeitstage*, 2006, pp. 203-220
20. J. Fröschl: Fatigue behaviour of forged components: Technological effects and multiaxial fatigue, Ph. D. thesis, 2006, University of Leoben
21. V. Leskovšek: Correlation between the K_{IC} , the HRc and the Charpy V-notch test results for H11/H13 hot-work tool steels at room temperature, *Steel research international*, 79(2008)4, 306-313
22. H. Bhadeshia, R. Honeycomb: *Steels, microstructure and properties*, 3-rd edition, BH Elsevier, 2006