

## ANALIZA TOPLOTNIH RAZPOK NA ORODJIH ZA TLAČNO LITJE ALUMINIJA

### ANALYSIS OF THERMAL CRACKS ON DIE CASTING DIES

Damjan Klobčar<sup>1</sup>, Janez Tušek<sup>1</sup>, Matej Pleterski<sup>1</sup>, Ladislav Kosec<sup>2</sup>, Mitja Muhič<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup>Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>3</sup>TKC d.o.o., Trnovska 8, 1000 Ljubljana, Slovenija

*Prejem rokopisa – received: 2007-09-21; sprejem za objavo – accepted for publication: 2008-02-05*

Podaljšanje trajnostne dobe orodij je ekonomsko zelo pomembno, zato smo raziskali poškodbe orodij za tlačno litje aluminijevih zlitin. Analizirali smo vzroke in mehanizme nastanka razpok, ki nastanejo zaradi temperaturnega utrujanja med tlačnim litjem. Izdelali smo napravo za potopni preskus, ki omogoča simulacijo pogojev med tlačnim litjem teh zlitin in kontrolirano temperaturno utrujanje jekla. Epruvete iz jekla H13 so bile različno toplotno obdelane. Na vogale nekaj epruvet je bilo po postopku TIG navarjeno jeklo maraging, ki je bilo preskušano v navarjenem stanju in optimalno staranem stanju. Po določenem številu ciklov so bile površine epruvet vizualno pregledane, vzorci pa so bili razrezani in pregledani na svetlobnem in vrstičnem elektronskem mikroskopu. Področja okoli razpoke so bila analizirana z energijsko disperzijsko spektroskopijo rentgenskih žarkov (EDS). V vogalu epruvete smo izmerili število in velikost razpok ter padec trdote. Rezultati so pokazali, da je odpornost jekla proti temperaturnemu utrujanju odvisna od vrste jekla in njegove toplotne obdelave. Dobro odpornost proti temperaturnemu utrujanju ima kakovostno toplotno obdelano jeklo H13. Širjenje površinskih razpok dodatno pospeši oksidacija površine.

**Ključne besede:** tlačno litje, aluminijeve zlitine, termično utrujanje, potopni preskus, orodno jeklo za delo v vročem, jeklo maraging

The aim of this research was to analyse the aluminum alloy die casting die failures with the aim of prolonging in-service die life. An extensive analysis of thermal fatigue cracks in aluminium alloy die casting was performed. An immersion test apparatus was developed that enables the simulation of conditions during aluminum alloy die casting and the controlled thermal fatigue testing of materials. Specimens of the AISI H13 tool steel were differently heat treated. On the edges of some specimens, the maraging steel was gas tungsten arc (GTA) weld clad. These samples were tested in as-welded and in optimally aged condition. After completion of a particular number of cycles, the specimen edge surface was examined visually. The specimens were then cut and examined with light and scanning electron microscopy (SEM). The energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) mapping of areas around the cracks was performed, also, and the number and length of thermal fatigue cracks were assessed and Vickers hardness profiles were determined. The results confirmed the good thermal fatigue resistance of the properly hardened H13 steel. The surface cracks growth is accelerated by surface oxidation.

**Keywords:** aluminium alloy, die casting, thermal fatigue cracking, immersion test, hot work tool steel, maraging steel

## 1 UVOD

Tlačno litje aluminijevih zlitin je velikoserijski postopek izdelave izdelkov zahtevnih geometrijskih oblik v ozkih dimenzijskih tolerancah. Med tlačnim litjem priteče v orodje talina s hitrostjo od 30 m/s do 100 m/s in s temperaturo okoli 700 °C. Polnilni tlaki so od 50 MPa do 80 MPa <sup>1</sup>. Trajnost orodij zmanjšujejo a) temperaturni cikli, ki povzročajo temperaturne razpoke na površini orodja zaradi temperaturnega utrujanja jekla, b) korozija in sprijemanje zaradi oksidacije aluminija na površino gravure <sup>2,3</sup>, c) erozija zaradi toka taline, č) prelomi orodja zaradi temperaturnih šokov in d) segrevanje jekla, ki povzroča nestabilnost mikrostrukture in degradacijo mehanskih lastnosti <sup>4-7</sup>.

Orodja za tlačno litje aluminija se najpogosteje poškodujejo zaradi razpok, ki nastanejo zaradi temperaturnega utrujanja jekla. Razpoke, ki se pojavijo v orodju, povzročajo nesprejemljive odtise na površini izdelka.

Trajnost orodja lahko podaljšamo a) z zmanjšanjem temperaturnih napetosti med obratovanjem orodja, b)

izbiro jekla in toplotno obdelavo, ki zagotavljata večjo odpornost proti temperaturnemu utrujanju, c) s površinskimi prevlekami na orodjih in č) reparaturnim varjenjem, s katerim saniramo poškodovano orodje. Delovne napetosti v orodju zmanjšamo z bolj blagimi parametri tlačnega litja, optimalnim notranjim segrevanjem orodja (temperiranjem), z optimalno geometrijo izdelka/orodja s čim manj ostrimi prehodi ter z minimalnim vnosom zaostalih napetosti med njegovo izdelavo. Površinske prevleke uspešno zmanjšujejo korozijo, spajanje in erozijo površine gravure, vendar niso odporne proti temperaturnemu utrujanju <sup>8</sup>. Novo razvite večslojne prevleke že dosegajo izboljšano odpornost proti temperaturnemu utrujanju <sup>9,10</sup>.

Poleg klasičnih CrMoV-jekel za delo v vročem, imajo dobro vzdržljivost tudi orodja, izdelana iz jekel maraging z nižjo vsebnostjo niklja (od 10 % do 14 %) <sup>11,12</sup>. Njihova prednost pred klasičnimi orodnimi jekli za delo v vročem sta manjši modul elastičnosti in manjši temperaturni raztezki, kar oboje zmanjšuje temperaturne napetosti. Večja toplotna prevodnost jekel maraging poveča prevajanje toplote po materialu in s tem zmanjšuje

temperaturne gradiente in napetosti, kar lahko prispeva k daljši obratovalni dobi orodja.

Razvoj orodnih jekel za delo v vročem gre v smeri izboljšanja stabilnosti mehanskih lastnosti v obratovanih razmerah<sup>12</sup>. K temu veliko prispevajo toplotne obdelave, ki preprečujejo oz. zavirajo spremembe mikrostrukture z oblikovanjem bolj stabilnih karbidnih izločkov (M(CrMoV)C) med popuščanjem. Naloga teh izločkov je zaviranje gibanja dislokacij, kar povečuje odpornost jekla proti mehčanju<sup>13-15</sup>.

Raziskave na področju napovedovanja trajnosti orodij<sup>13,14,16,17</sup> in opisa mehanizmov poškodb<sup>5,18,19</sup> potekajo v realnih razmerah na orodjih med obratovanjem ali v laboratorijskih razmerah. Ugotavljanje odpornosti jekla proti temperaturnemu utrujanju izvajamo s preizkusi izotermnega utrujanja (pri konstantni temperaturi se spreminja obremenitev), termomehanskega utrujanja in temperaturnega utrujanja v najrazličnejših izvedbah<sup>14,20-22</sup>.

## 2 EXPERIMENTALNI DEL

Preizkušali smo jeklo 1.2344 (kemične sestave: 0,4 % C; 5,15 % Cr; 1,05 % Si; 0,4 % Mn; 1,35 % Mo in 1 % V) ter vare iz jekla maraging 1.6356 (kemične sestave: 0,02 % C; 1,35 % Mo; 18 % Ni; 12 % Co; 0,1 % Al in 1,6 % Ti).

### 2.1 Potopni preizkus

Naredili smo napravo za potopni preizkus (PP) temperaturnega utrujanja, ki omogoča kontrolirano temperaturno utrujanje jekla (**slika 1a**). Cikel je trajal 21 s in je zajemal trisekundno držanje epruvet v emulziji (32 °C), ki prepreči sprijemanje aluminija na epruvete, štirisekundno gibanje epruvet do posode z raztaljeno aluminijevo zlitino, desetsekundno držanje epruvet v tej zlitini s temperaturo  $\approx 700$  °C in štirisekundno vračanje

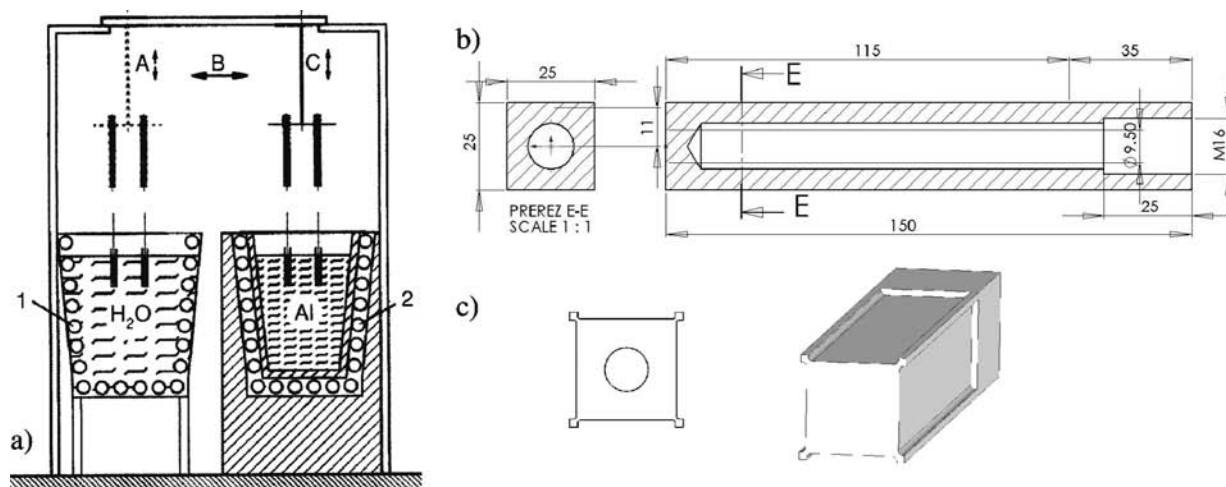
epruvet do posode z emulzijo. Epruvete so bile vseskozi notranje hlajene z vodo s temperaturo 20 °C. To povzroča velike tlačne napetosti na površini epruvete, ko je le-ta potopljena v talino aluminijeve zlitine, in natezne napetosti, ko je epruveta potopljena v hladno emulzijo. Največje napetosti se pojavijo v vogalu epruvete.

Velike tlačne napetosti povzročijo v vogalu epruvete plastično deformacijo, saj napetosti krepko presegajo tiste pri tečenju jekla pri tej temperaturi<sup>24</sup>. V hladni fazi cikla, ko je epruveta pomočena v hladno emulzijo, nastanejo natezne napetosti, ki povzročajo nukleacijo razpok. Razpoke nato rastejo zaradi malocikličnega utrujanja.

### 2.2 Oblika in priprava epruvet

Preizkusili smo dve obliki epruvet: klasično za potopni preskus (**slika 1b**) in epruveto z optimalno oblikovanim vogalom (**slika 1c**). Slednjo smo razvili na osnovi analize napetosti z metodo končnih elementov (MKE) in omogoča večje temperaturne gradiente oz. napetosti med potopnim preskusom ter bolj zahtevne pogoje preskušanja. Z navojem M16 je bila epruveta pritrjena na pnevmatski manipulator.

Epruvete so bile izdelane iz jekla H13 in toplotno obdelane, tj. kaljene in popuščene (**tabela 1**). Toplotna obdelava 1 pomeni kakovostno toplotno obdelavo s kaljenjem v vakuumu, toplotna obdelava 2 pa toplotno obdelavo slabše kakovosti, s kaljenjem na zraku. Na nekaj epruvet, kaljenih v vakuumu, smo po postopku TIG navarili jeklo maraging. Varjenje je potekalo v zaščitni atmosferi plina argona s pretokom 10 L/min. Varilni tok je bil 82 A, varilna napetost 11 V, čas varjenja je bil okoli 150 s, vnos energije pa okoli 1185 J/mm. Nekaj epruvet smo po varjenju starali 3 h pri temperaturi 480 °C, druge pa so bile preskušene v navarjenem stanju. Epruvete so bile mehansko obdelane (**slika 1c**).



**Slika 1:** a) Shematski prikaz naprave za termično utrujanje materiala, b) klasična epruveta za preskušanje in c) optimalna oblika epruvete  
**Figure 1:** a) Scheme of the thermal fatigue test apparatus, b) shape of the classic thermal fatigue test specimen, and c) optimal test specimen geometry

### 2.3 Preskušanje in vrednotenje podatkov

Z epruvetami smo naredili 20 000 preizkusov temperaturnega utrujanja. Robove epruget smo po vsakih 4 000 ciklih vizualno pregledali, ali so razpokani. Po 20 000 ciklih smo epruvete razrezali preko vogala vzdolž njene dolžine (slika 4 a) in naredili mikrobruse. Vzorce smo jedkali v 4-odstotni raztopini nitala. Analizirali smo mikrostrukturo, izmerili profil mikrotrdote po Vickersu od vogala epruvete proti centru ter na svetlobnem mikroskopu fotografirali in v programu Image Tool analizirali dolžino in število razpok vzdolž prerezanega vogala epruvete. Izmerjene vrednosti smo statistično obdelali. V vrstičnem elektronskem mikroskopu (SEM) Jeol-JSM 5610 smo z elektronsko mikroanalizo izmerili kemično sestavo materiala na površini in v okolici razpoke.

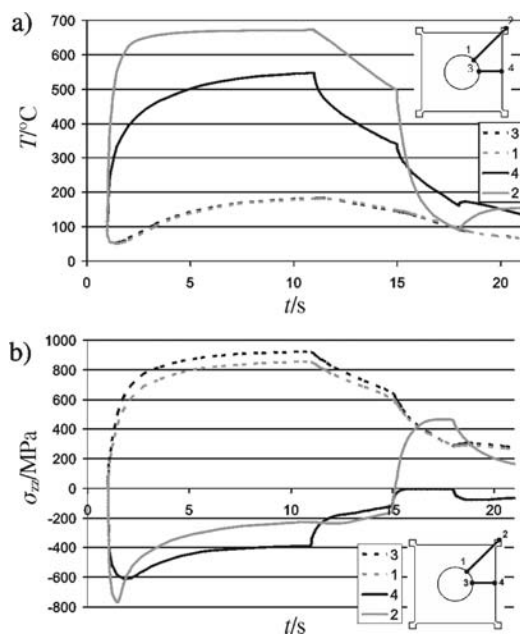
### 2.4 Analiza z metodo končnih elementov

Z MKE in s programom ABAQUS smo simulirali temperaturno utrujanje<sup>23</sup>. Naredili smo sekvenčno veza-no termomehansko analizo in določili optimalno obliko epruvete ter zahtevne pogoje potopnega preizkusa<sup>22</sup>.

## 3 REZULTATI

### 3.1 FEM-analiza

Toplotne napetosti (slika 2 b) med potopnim preskusom so posledica temperaturnih gradientov (slika 2



**Slika 2:** MKE-analiza a) temperatur in b) napetosti v epruveti med potopnim preskusom. Parametri potopnega preskusa:  $T_{AL} = 690\text{ °C}$ ,  $t_{AL} = 10\text{ s}$ ,  $T_{ZRAK} = 28\text{ °C}$ ,  $t_{ZRAK} = 4\text{ s}$ ,  $T_{EMULZIJA} = 32\text{ °C}$ ,  $t_{EMULZIJA} = 3\text{ s}$ ,  $T_{HLADILNA\ VODA} = 20\text{ °C}$ ,  $t_{CIKLA} = 21\text{ s}$

**Figure 2:** Finite element analysis of a) temperatures and b) stresses in test specimen during the immersion test. Immersion test parameters:  $T_{AL} = 690\text{ °C}$ ,  $t_{AL} = 10\text{ s}$ ,  $T_{AIR} = 28\text{ °C}$ ,  $t_{AIR} = 4\text{ s}$ ,  $T_{EMULSION} = 32\text{ °C}$ ,  $t_{EMULSION} = 3\text{ s}$ ,  $T_{COOLING\ WATER} = 20\text{ °C}$ ,  $t_{CYCLE} = 21\text{ s}$

a) med površino in notranjostjo epruvete. Največji gradienti temperature oz. napetosti se pojavijo na površini v začetku pomakanja epruvete v vročo talino in hladno emulzijo. Kasneje se le-ti zmanjšajo zaradi prenosa toplote v notranjost epruvete. Posledice cikličnega obremenjevanja epruget so bile vidne kot razpoke na površini.

### 3.2 Površinske razpoke

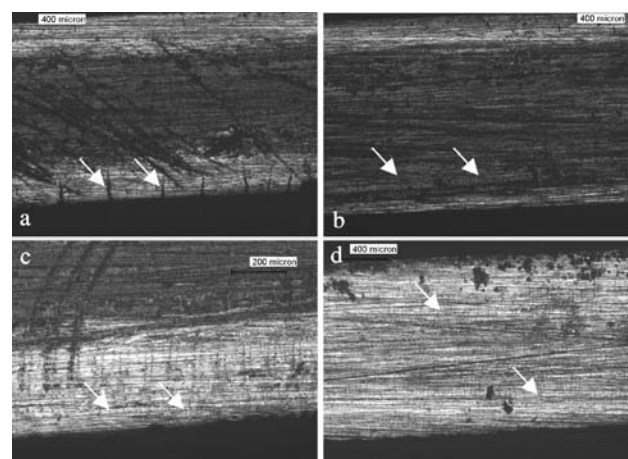
Majhno število dolgih razpok se je pojavilo v jeklu H13, kaljenem na zraku (slika 3 a). V enakem jeklu, kaljenem v vakuumu, se je pojavilo večje število krajših razpok (slika 3 b). V jeklu maraging v navarjenem stanju (slika 3 c) in staranem stanju (slika 3 d) se je pojavilo veliko število kratkih in komaj opaznih razpok.

### 3.3 Razpoke v prerezu vogala

Razpoke v epruveti iz jekla H13, kaljeni na zraku, so bile velike in redke (slika 4 b in 3 a). Njihova velikost je bila posledica razogljčenja površine pri segrevanju pred kaljenjem in ima manjšo trdoto (slika 5) in slabše mehanske lastnosti. Čela (vrhovi) razpok so bila najbolj pogosta na prehodu delno razogljčenega v naogljčeno jeklo (slika 4 b). V vogalu epruvete iz jekla H13, ki je bila toplotno obdelana v vakuumu, so bile razpoke bistveno krajše (slika 4 c). Podobno velja tudi za površinske navare jekla maraging v navarjenem (slika 4 d) in staranem stanju (slika 4 e).

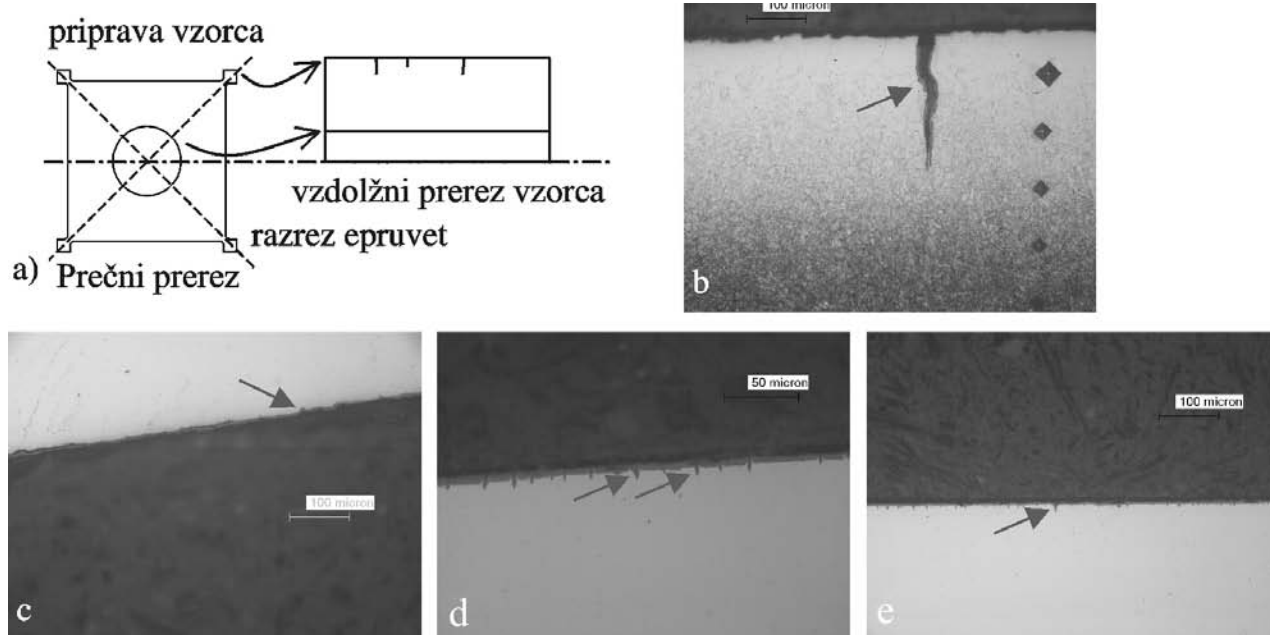
### 3.4 Trdota jekla na površini epruvete

Razen pri epruveti iz jekla H13, ki je bila kaljena v vakuumu, se je pomemben padeč trdote pojavil pri vseh



**Slika 3:** Mikrorazpoke na površini vogala epruget po 20 000 ciklih: a) jeklo H13, kaljeno na zraku, b) jeklo H13, TO v vakuumu, c) jeklo maraging v navarjenem stanju in d) navarjeno jeklo maraging starano 3 h na temperaturi 480 °C

**Figure 3:** Micro-cracks on the edge surface after 20 000 cycles of immersion: H13 tool steel quenched in a) air and b) vacuum and maraging steel in c) as-welded condition and d) welded and aged 3 h at 480 °C



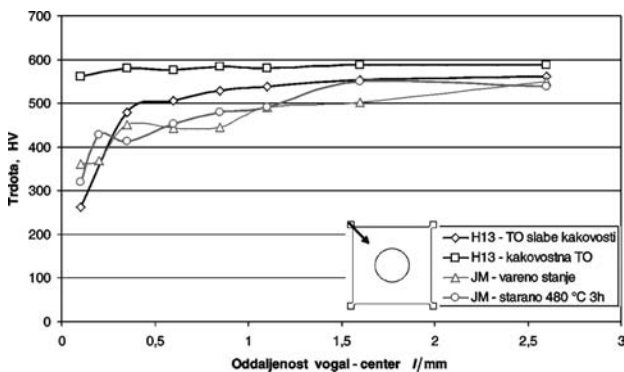
**Slika 4:** Razpoke na vzdolžnem prerezu kvadrastega vzorca za preizkušanje temperaturne utrujenosti: a) priprava vzorca, b) jeklo H13, kaljeno na zraku, c) H13, TO v vakuumu, d) jeklo maraging v navarjenem stanju in e) navarjeno jeklo maraging starano 3 h na temperaturi 480 °C  
**Figure 4:** Edge cracks at along immersion test specimen. a) Sample preparation, b) H13 tool steel air quenched, c) H13 tool steel vacuum quenched, d) as-welded maraging steel, and e) maraging steel welded and aged for 3 h at 480 °C

analiziranih epruветah (slika 5). Največje zmanjšanje trdote ( $\Delta HV \approx 280$ ) smo opazili v jeklu H13, kaljenem na zraku (slika 4 b). Nekoliko manjša padca trdote sta se pojavila v navarih iz jekla maraging ( $\Delta HV \approx 180$ ) kot posledica prestaranja.

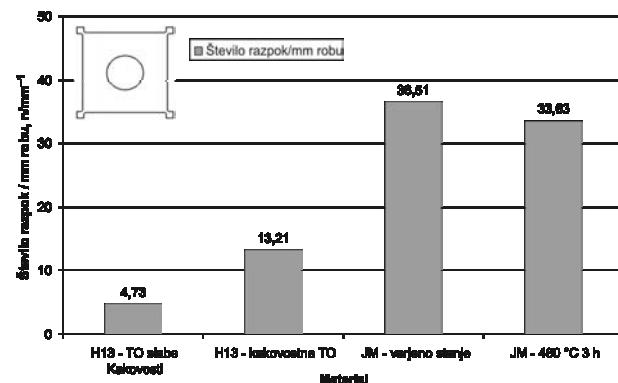
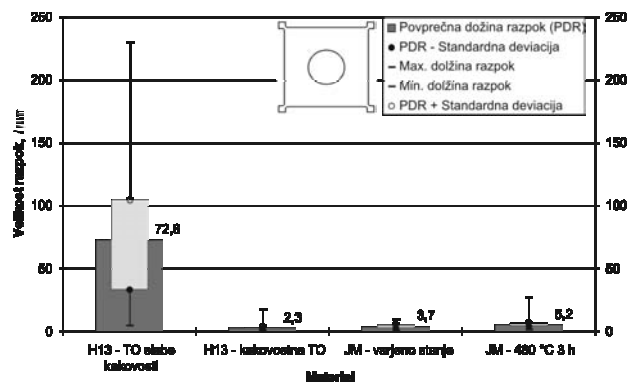
### 3.5 Število in velikost razpok

Najdaljše razpoke so bile v jeklu H13, kaljenem na zraku (slika 6). Njihova povprečna dolžina je bila 72,8  $\mu\text{m}$ , najdaljše pa so bile dolge 230  $\mu\text{m}$  (slika 6 a). Povprečna gostota razpok v vogalu je bila okoli 4,7 razpoke na milimeter dolžine vogala. Razpoke v drugih epruветah so bile bistveno krajše. Pri jeklu H13, ki je bilo kaljeno v vakuumu, je bila povprečna dolžina 2,3

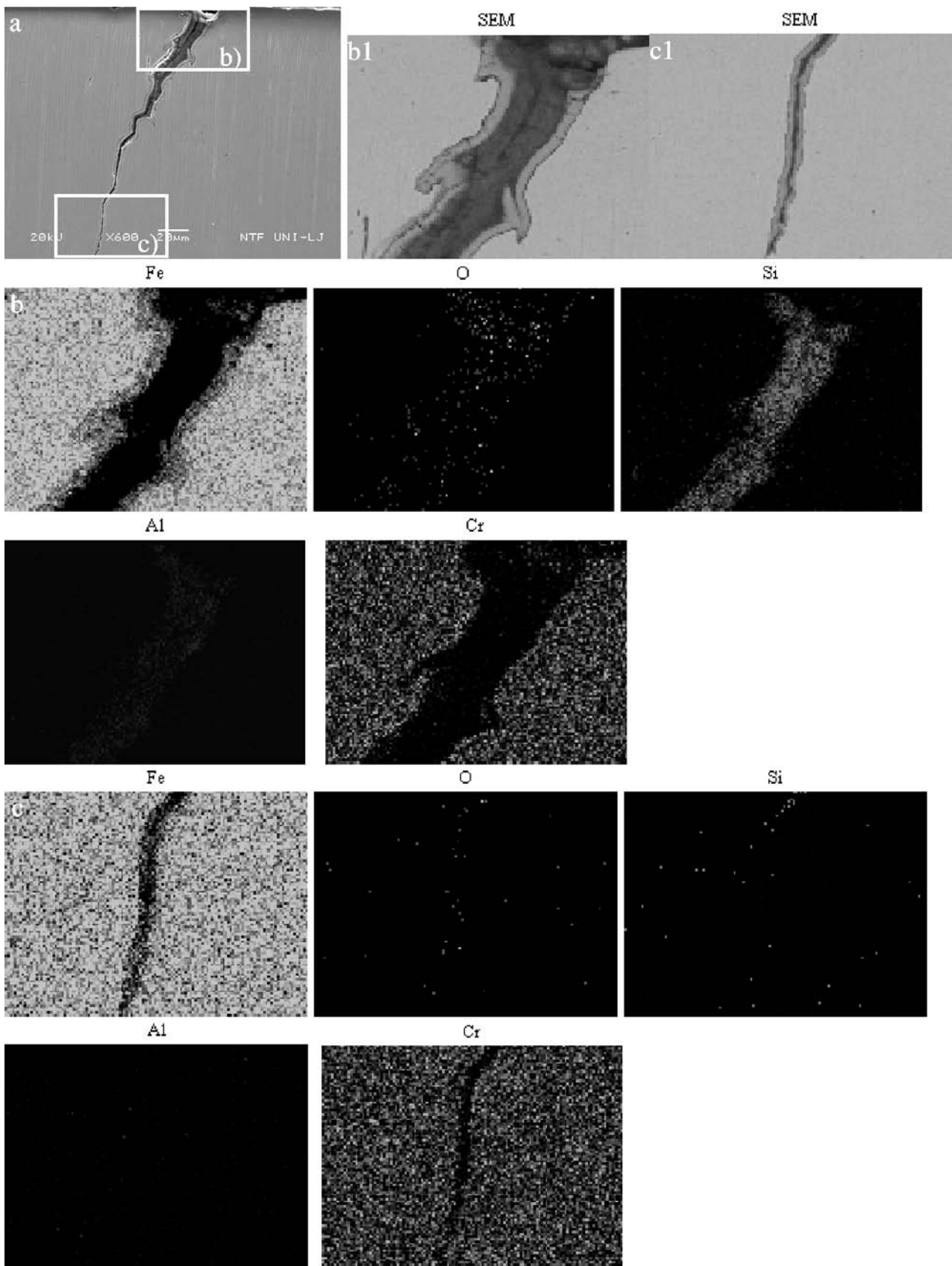
$\mu\text{m}$ , pri jeklu maraging v navarjenem stanju 3,7  $\mu\text{m}$  ter pri staranem jeklu maraging 5,2  $\mu\text{m}$ . Povprečna gostota



**Slika 5:** Potek trdote od površine vogala proti centru epruветe po preizkusu utrujanja  
**Figure 5:** Hardness profile from the edge to the centre of the specimen after the immersion test



**Slika 6:** Velikost razpok a) in število razpok b) na dolžini milimetra robu  
**Figure 6:** Edge crack a) length and b) density



**Slika 7:** Kemična sestava jekla v okolici oksidnega klina, EDS (jeklo H13)  
**Figure 7:** Chemical composition of steel in the area of the oxide wedge, EDS (H13 tool steel)

razpok na dolžino robu je bila pri jeklu H13, ki je bilo kaljeno v vakuumu,  $13,2 \text{ mm}^{-1}$ , pri jeklu maraging v navarjenem stanju  $36,5 \text{ mm}^{-1}$ , pri jeklu maraging v staranem stanju pa  $33,6 \text{ mm}^{-1}$ .

### 3.6 Kemična mikroanaliza jekla v okolici razpok

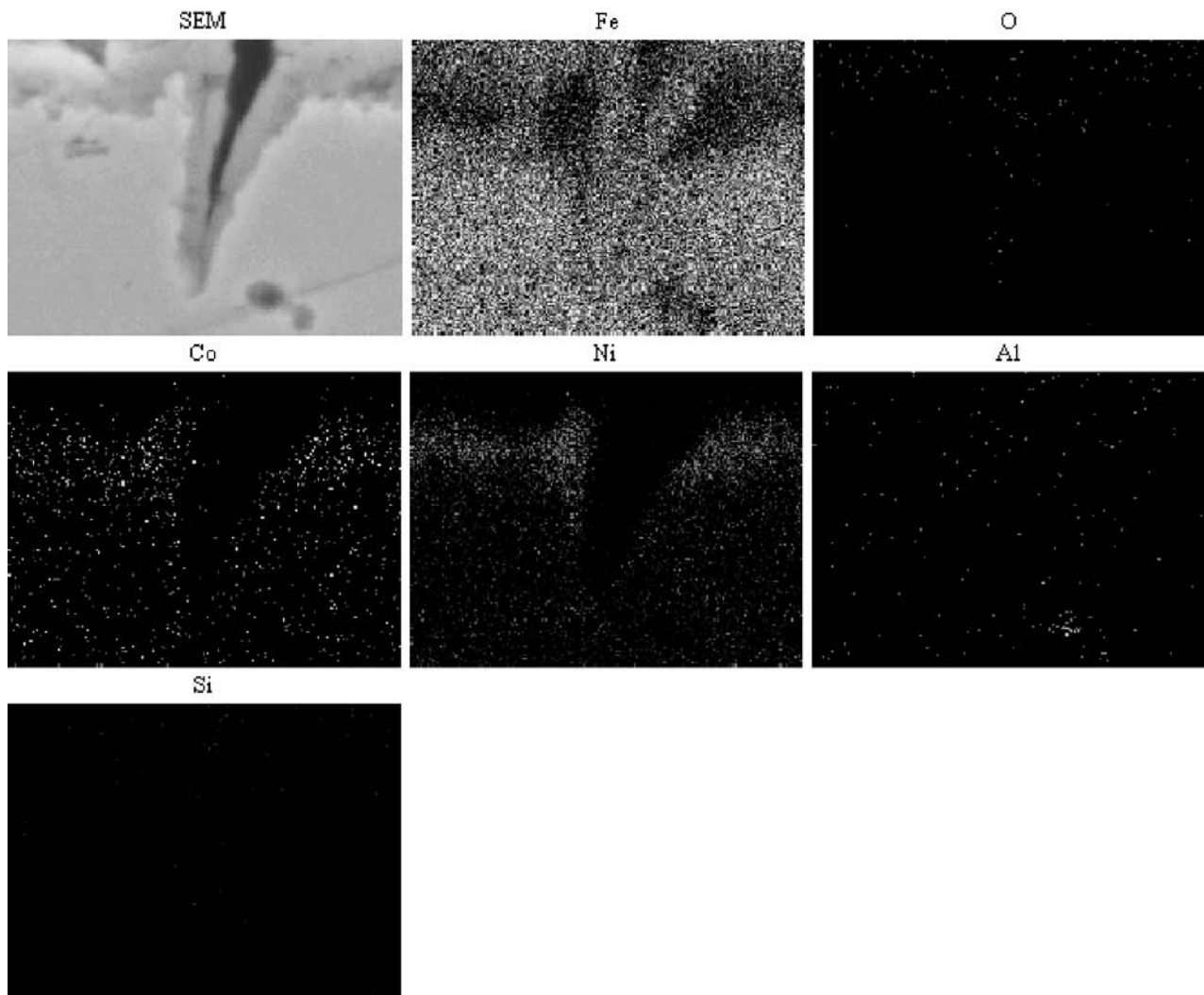
Z energijsko disperzijskim spektrometrom rentgenskih žarkov smo analizirali kemično sestavo materiala v okolici razpok. Značilna kemična sestava jekla H13 ob razpoki po 20 000 ciklih PP je prikazana na sliki 7. Na temenu razpoke (slika 7 b) je povečana koncentracija Al in Si, kar kaže, da je teme razpoke zapolnjeno z aluminijevo zlitino, analiza pa je pokazala tudi sledi ogljika in kisika. V oksidni plasti ob razpoki je povečana koncentracija kroma. Podobno je tudi v konici razpok (slika 7 c). Kisik penetrira po razpoki do same konice in povzroča oksidacijo. V konici razpoke nismo zaznali sledi aluminija iz taline zaradi ozke razpoke in večje oddaljenosti od vrha.

Kemična sestava okolice razpoke iz jekla maraging, staranega 3 h pri temperaturi  $480 \text{ °C}$  ter po 20 000 ciklih PP je prikazana na sliki 8. Razpoka je imela na površini plast oksidov železa, ki je nastala zaradi difuzije železa iz podpovršinske plasti h kisiku. Podpovršinska plast je bila obogatena z nikljem in kobaltom, ki difundirata v jeklo iz oksidirane plasti železa. V kratkih razpokah so bile sledi silicija in aluminija.

## 4 DISKUSIJA

### 4.1 Toplotne razpoke

Nastajanje temperaturnih razpok lahko razdelimo v tri korake; (1) nukleacija, (2) rast razpok in (3) porajajoča rast razpok do porušitve oz. luščenja površine<sup>5</sup>. Tvorba razpok je tesno povezana z lokalno plastično deformacijo na površini jekla, kar je značilno za malociklično utrujanje. Rast razpok pospeši oksidacija razpokane površine z večanjem volumna te plasti,



Slika 8: Kemična sestava jekla v okolici oksidnega klina, EDS (jeklo maraging)

Figure 8: Chemical composition of steel in the area of the oxide wedge, EDS (maraging steel)

nadaljnjo rast pa polnjenje razpok s talino, oksidacija in popuščanje (prestaranje) jekla na površini.

#### 4.2 Tvorba in rast razpok

Med vročo fazo cikla litja se na površini orodja pojavijo velike tlačne napetosti (**slika 2 b**), ki jih poveča tlak polnjenja gravure. Te napetosti sicer zavirajo nukleacijo in rast razpok, zato bi bile zaželeno, vendar povzročajo lokalno plastično deformacijo. Le-ta je posebej izrazita na mestih, kjer so prisotni zarezni učinki, ostri prehodi ali velike spremembe mase orodja. V hladni fazi cikla se na površini orodja pojavijo velike natezne napetosti, ki so posledica plastične deformacije. Le-te pri temperaturi obratovanja presežejo kritično vrednost nosilnosti jekla. Pri cikličnem ponavljanju obremenitev nastane malociklično utrujanje, ki povzroča nastanek in rast razpok.

Rast razpok pospeši oksidacija površine jekla. Železovi atomi iz podpovršinskega sloja difundirajo na površino h kisiku, prazna mesta pa zapolnijo legirni elementi (**sliki 7 in 8**). Na površini orodja in razpoke se pojavi plast, sestavljena pretežno iz oksidov železa, tam pa so tudi oksidi aluminija in silicija, ki sta rezultat reakcije med kisikom in aluminijevo zlitino. Na meji med oksidno plastjo in jeklom (H13) se na zunanji strani nalagajo kromovi oksidi oz. oksidi kobalta in niklja pri jeklu maraging. Slabe strani oksidne plasti so nizka temperaturna razteznost, večji specifični volumen in krhkost. Oksidi in aluminijeve zlitine v razpokah povečajo natezne napetosti v klinu razpoke (med hladno fazo cikla), ki omogočajo rast razpok (**slika 7 b**)<sup>5,19</sup>.

Natezne napetosti povzročajo lokalne razpoke v oksidni plasti in v polnilu razpoke (krhkost in razlika v temperaturni razteznosti) ter odpiranje razpok. Te v nadaljevanju delujejo kot kanali za dovajanje aluminijeve zlitine v razpoko in omogočajo penetracijo kisika do vrha razpoke, kjer povzročajo oksidacijo.

#### 4.3 Rast razpok zaradi popuščanja (prestaranja) jekla

Orodja za tlačno litje aluminija, izdelana iz CrMoV orodnih jekel za delo v vročem, delujejo nad temperaturami sekundarnega utrjevanja<sup>14</sup>. Pri takih pogojih se skoraj v vseh jeklih pojavi nagnjenost k popuščanju jekla. Opazimo lahko tri stopnje mehčanja: (1) hitro mehčanje, kontrolirano z redukcijo dislokacij, (2) navidezno stacionarno mehčanje, ki ga vodi razvoj karbidov in (3) drastično zmanjšanje napetosti zaradi pojava velikih razpok<sup>14</sup>. Neželeno popuščanje jekla zmanjšuje napetost tečenja jekla in povzroča hitro napredovanje razpok do globine popuščene plasti. Popuščanje je posebej očitno pri jeklu H13, ki je imelo zaradi kaljena na zraku razogljčeno površino (**slika 5**). Slabše mehanske lastnosti te površine so povzročile rast razpok, kar je sprostito napetosti v njihovi okolici ter s tem preprečilo nastanek novih razpok. Rast razpok preprečuje večja trdota (**sliki 5 in 6 a**), zato se je v jeklu H13, ki je bilo TO v vakuumu, pojavila večja gostota krajših razpok.

V navaru iz jekla maraging je trdota padla zaradi prestaranja med temperaturnim utrujanjem (**slika 5**). Krajše razpoke so se pojavile v nestaranem varu, ker pred preizkušanjem ni bil staran. Kljub temu pa toplotne obdelave staranja pri sanaciji orodij ne smemo izpustiti, saj s tem tvegamo pojav drugih poškodb zaradi premajhne trdote delovne površine.

Gostota temperaturnih razpok je v korelaciji z napestostjo tečenja jekla (**slika 6 b**), ki znaša za jeklo H13 1230 MPa, za jeklo maraging pa 1688 MPa<sup>24,25</sup>. V materialih z višjo napestostjo tečenja se pojavi večja gostota krajših razpok. Ker je trdota jekla v korelaciji z napestostjo tečenja bi pričakovali v jeklu maraging krajše razpoke oz. boljšo odpornost proti temperaturnemu utrujanju, če bi preprečili prestaranje jekla maraging med delom. Proti prestaranju so bolj odporna jekla maraging z manj Ni (od 10 % do 14 %).

**Tabela 1:** Toplotna obdelava epruvet iz jekla H13

**Table 1:** Heat treatment of H13 test specimens.

TO 1 – vakuum – kakovostna TO		TO 2 – brez zaščitne atmosfere – TO slabe kakovosti	
KALJENJE	1005 °C/35 min	KALJENJE	1000 °C/30 min
POPUŠČANJE 1	600 °C/150 min	POPUŠČANJE 1	530 °C/150 min
POPUŠČANJE 2	570 °C/240 min		

kaljenje = quenching, popuščanje = tempering, vakuum = vacuum, brez zaščitne atmosfere = without protective atmosphere

## 5 SKLEPI

V orodjih za tlačno litje neželeznih kovin je toplotno utrujanje glavni krivec za poškodbe. V vroči fazi cikla se na površini orodja pojavijo velike tlačne napetosti, ki jih dodatno zvišuje tlak polnjenja livne votline s talino. Na mestih hitrih in ostrih prehodov se pojavi plastična deformacija jekla. V hladni fazi cikla se na teh mestih pojavijo velike natezne napetosti, ki povzročijo nukleacijo razpok in rast s povečevanjem števila ciklov. Oksidacija površine orodja in površine razpok ter polnjenje razpok z aluminijevo talino povečajo natezne napetosti v klinu med hladno fazo in omogočajo rast razpok. V jeklih z večjo napestostjo tečenja in večjo trdoto se pojavi večje število krajših razpok, medtem ko se pri materialih z manjšo napestostjo tečenja in manjšo trdoto pojavi manjše število daljših razpok. Trajnost orodij za tlačno litje aluminijevih zlitin lahko podaljšamo z uporabo trdnejših, trdih in žilavih materialov, ki so bolj odporni proti popuščanju (staranje) med obratovanjem.

## 6 LITERATURA

- <sup>1</sup> A. Srivastava, V. Joshi, R. Shivpuri, Computer modeling and prediction of thermal fatigue cracking in die-casting tooling, *Wear* 256 (2004), 38–43
- <sup>2</sup> V. Joshi, K. Kulkarni, R. Shivpuri, R. S. Bhattacharya, S. J. Dikshit, D. Bhat, Dissolution and soldering behavior of nitrided hot working steel with multilayer LAFAD PVD coatings. *Surface and Coatings Technology* 146–147 (2001), 338–343

- <sup>3</sup> V. Joshi, A. Srivastava, R. Shivpuri, Intermetallic formation and its relation to interface mass loss and tribology in die casting dies. *Wear* 256 (2004), 1232–1235
- <sup>4</sup> A. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Simulation and evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels. *International Journal of Fatigue* 26 (2004), 1095–1107
- <sup>5</sup> A. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Failure modes in field-tested brass die casting dies. *Journal of Materials Processing Technology* 148 (2004), 108–118
- <sup>6</sup> A. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels. *Surface and Coatings Technology* 191 (2005), 216–227
- <sup>7</sup> Young, W.: Why Die Casting Dies Fail, Paper No. G-T79-092, (1979), 1-7. St.Louis, Missouri, NADCA. 10th SDCE International die casting exposition & congress
- <sup>8</sup> Y. Wang, A study of PVD coatings and die materials for extended die-casting die life. *Surf. and Coat. Techn.* 94–95 (1997), 60–63
- <sup>9</sup> K. Kulkarni in sod., Thermal cracking behavior of multi-layer LAFAD coatings on nitrided die steels in liquid aluminum processing. *Surf. and Coat. Techn.* 149 (2002), 171–178
- <sup>10</sup> P. Panjan in sod., Improvement of die-casting tools with duplex treatment. *Surface and Coatings Technology* 180–181 (2004), 561–565
- <sup>11</sup> Marlok, Longer die life Better quality, [www.metsopowdermet.com](http://www.metsopowdermet.com) (2005). Metso Powdermet.
- <sup>12</sup> Fuchs, K. D.: Hot-work tool steels with improved properties for die casting applications, Rosso, M., Actis Grande, M, in Ugues, D. II, (2006). 17–26. Torino, Proceedings of 7th International Tooling Conference
- <sup>13</sup> Ahmer, Z. in sod., Cyclic behaviour simulation of X38CrMoV5-47HRC (AISI H11) tempered martensitic hot work tool steel, Rosso, M., Actis Grande, M, in Ugues, D. II, (2006). 513–520. Torino, Proceedings of 7th International Tooling Conference
- <sup>14</sup> Bergström, J., F. Rézai-Aria.: High temperature fatigue of tool steels, Rosso, M., Actis Grande, M, in Ugues, D. II, (2006), 545–554. Torino, Proceedings of 7th International Tooling Conference
- <sup>15</sup> Michaud, P. in sod., Influence of chemical composition on the precipitation of secondary carbides in modified AISI H11 hot-work tool steels, Rosso, M., Actis Grande, M, Ugues, D. (2006), 733–740. Torino, Proceedings of 7th International Tooling Conference
- <sup>16</sup> Daffos, C., P. Lamesle, F. Rézai-Aria.: Fatigue-oxidation interaction models for life prediction of hot foaming tools steels under transient thermomechanical loadings, Rosso, M., Actis Grande, M, in Ugues, D. II, (2006), 471–478. Torino, Proceedings of 7th International Tooling Conference
- <sup>17</sup> Medjedoub, F. in sod., Experimental conditions and environmental effects on thermal fatigue damage accumulation and life of die-casting steel X38CrMoV5 (AISI H11), Rosso, M., Actis Grande, M, in Ugues, D. II, (2006), 461–470. Torino, Proceedings of 7th International Tooling Conference
- <sup>18</sup> B. Kosec, L. Kosec, J. Kopač, Analysis of casting die failures. *Engineering Failure Analysis* 8 (2001), 355–359
- <sup>19</sup> F. Kosel, L. Kosec, Heat checking of hot work tools. *Mechanical Engineering Journal* 29, (1983), E1-E8
- <sup>20</sup> J. F. Wallace, D. Schwam, Development Studies on Selection and processing of Die Materials to Extend Die Life, *Die Casting Engineer*, (2000), 50–58
- <sup>21</sup> Klobčar, D., J. Tusek, B. Taljat, G. Scavino.: Influence of thermal fatigue on materials for die-casting tooling, Rosso, M., Actis Grande, M., Ugues, D. (2-5-2006). 479–485. Torino, Proceedings of 7th International Tooling Conference
- <sup>22</sup> D. Klobčar, J. Tušek, B. Taljat, Thermal fatigue of materials for die-casting tooling. *MSEA* (2007)
- <sup>23</sup> Abaqus 6.4, (2003), Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
- <sup>24</sup> Materialne lastnosti jekla H13, [www.sz-metal.si](http://www.sz-metal.si), (2003), 6-9-2003
- <sup>25</sup> QRO 90 Supreme, Hot work tool steel, Tool steel facts, [www.uddeholm.com](http://www.uddeholm.com), Uddeholm. 15.9.2005