

Lastnosti s CaSi obdelanega konti litega jekla Č.4830 pri dinamičnih obremenitvah

D. Kmetič¹, J. Žvokelj¹,
L. Jovanovski², B. Ralič¹, M. Jakupovič¹

UDK: 620.178.3:620.192.45:669.14.018.298.3:669.046.558.6
ASM/SLA: a7c, M21c, 9-69, AYb, D9q, E25q

Jeklo, izdelano po tehnologiji obdelave s CaSi v ponovci, je čistejše, z modifikacijo pa zagotovimo, da vključki kalcijevih aluminatov v temperaturnem področju vroče predelave niso duktilni. Jeklo ima zato boljše mehanske lastnosti, predvsem žilavost in trajno vrtilno upogibno trdnost. Manjša je tudi anizotropija v mehanskih lastnostih. Analizirali smo sestavo nekovinskih vključkov in opredelili vzroke za nastanek inicialov utrujenosti razpok na vrtilno upogibnih preizkušancih.

Kov MnS. Jeklo, obdelano s CaSi, ima vključke kalcijevega aluminata, ki so lahko po morfologiji in sestavi zelo različni in lahko vsebujejo sulfide (MnS, CaS) in druge okside (SiO₂, MgO, MnO).

Zaradi obdelave jekla s CaSi je v jeklu več topnega Al in afinacijski učinek izločkov AlN na velikost austenitnih zrn pri toplotni obdelavi jekla je večji.

1. UVOD

Nekovinski vključki v jeklih so produkt tehnologije izdelave jekla ali pa kot eksogeni material (obzidava, žilindra). Nekovinski vključki vplivajo na mehanske lastnosti, v manjši meri na mejo plastičnosti in natezno trdnost, v večji pa na kontrakcijo, lomno žilavost in dinamične lastnosti jekla.

V konvencionalno izdelanih jeklih prevladujejo vključki MnS tipa II in vključki Al₂O₃. Sulfidi se pri strjevanju jekla izoblikujejo v skupinah v meddendritskih prostorih in se pri vroči predelavi zelo lahko deformirajo, in sicer podaljšajo in sploščijo. Vključki Al₂O₃ so v jeklu kot individualni vključki, pri vsebnosti Al nad 0,02 % pa tudi v nizih. Lahko so tudi v obliki kompleksnih oksisulfidnih vključkov. Pri preoblikovanju se lahko drobijo, nizi pa tudi razpotegnejo. Taka oblika nekovinskih vključkov, predvsem vključkov MnS, izrazito vpliva na anizotropijo mehanskih lastnosti.

Pri odprtem konti litju so jekla pomirjena s Si in dezoksidirana s sorazmerno majhno količino Al (nevarnost zamašitve izlivka), zato so v jeklu silikatni vključki, ki se pri plastični predelavi močno deformirajo. Pri zaprtem litju je zaradi ustrezne dezoksidacije z Al v jeklu manj silikatnih vključkov. Z obdelavo jekla s CaSi lahko izdelamo čistejše jeklo z ustrežnejšo globularno obliko vključkov kalcijevega aluminata, ki pri vroči predelavi niso duktilni. Odžveplanje je bistveno boljše kot pri konvencionalni izdelavi jekla, kar močno zniža vsebnost žvepla. Vključkov MnS je malo, so majhni in enakomerno porazdeljeni po kovinski matici. Pri predelavi jekla se sicer deformirajo, na mehanske lastnosti pa, ker so drobni in enakomerno porazdeljeni po matici, praktično ne vplivajo. Pri vsebnosti žvepla pod 0,003 % v jeklu ni individualnih vključ-

2. EKSPERIMENTALNO DELO

2.1. Jeklo in metodika dela

Jeklo Č.4830 je v poboljšanim stanju namenjeno za izdelavo vzmeti in statično ali dinamično obremenjene strojne elemente. Pri izdelavi jekla modifikacija nekovinskih vključkov ni vedno enako uspešna. Zato smo izbrali za preiskave različno čiste taline z različno obliko kompleksnih oksidnih vključkov. V jeklih so zato prisotni duktilni silikatni vključki, delno duktilni kompleksni vključki kalcijevega aluminata s silikati in spinelnimi vključki in modificirani kompleksni kalcijevi aluminati, ki so globularni, njihova velikost pa je lahko različna. Kemična sestava talin in ocena čistosti jekel po metodi K4, ki so jo naredili v Železarni Štore, je podana v tabeli 1.

Konti lite gredice smo zvaljali v vzmetne lamele s presekom 90 × 20 mm. Metalografske preiskave jekla in analizo nekovinskih vključkov smo naredili na vzorcih, izrezanih v vzdolžni smeri na sredini in ob robu vzmetnih lamel. Na teh mestih smo pripravili tudi natezne in vrtilno upogibne preizkušance. S tako izbranimi vzorci smo želeli ugotoviti morebitne razlike v mehanskih lastnostih zaradi različne porazdelitve in velikosti nekovinskih vključkov po preseku lamel, kar je posledica značilnega strjevanja konti litih gredic. Vzorce za mehanske preizkuse smo kalili v olju s temperaturo austenitizacije 850 °C in nato eno uro popuščali na temperaturi 520 °C. Strojni deli se popuščajo v temperaturnem intervalu med 540 in 680 °C, vzmetne lamele pa v nižjem področju med 430 in 520 °C. Vpliv nekovinskih vključkov na dinamične lastnosti je pri nižjih temperaturah popuščanja izrazitejši.

2.2. Nekovinski vključki

Ocena čistosti talin je podana v tabeli 1. Vsebnost žvepla je v talinah majhna, zato je v jeklu zelo malo drobnih vključkov MnS.

Talini 1 in 2 imata veliko oksidnih vključkov, ki so bili med vročo predelavo zelo plastični (sl. 1), ali pa so se med valjanjem deloma deformirali, deloma drobili (sl. 2). Ti vključki imajo nodularno obliko, njihova velikost pa je

¹ Dimitrij Kmetič, dipl. ing. met., SŽ — Metalurški inštitut
Ljubljana, Lepi pot 11, 61000 Ljubljana

² Železarna Štore

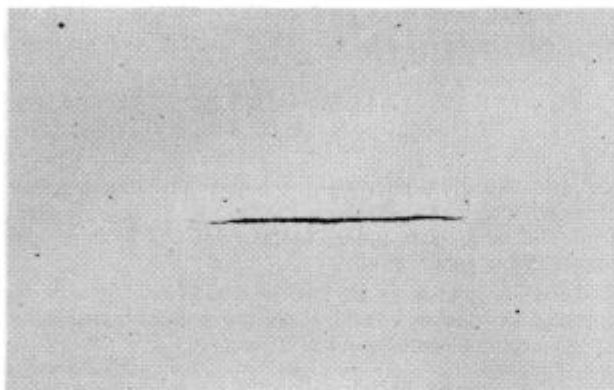
**Originalno objavljeno: ŽZB 25(1991)2

**Rokopis sprejet: februar 1991



Tabela 1: Kemične sestave jekla Č 4830 v odstotkih in ocena čistosti K4

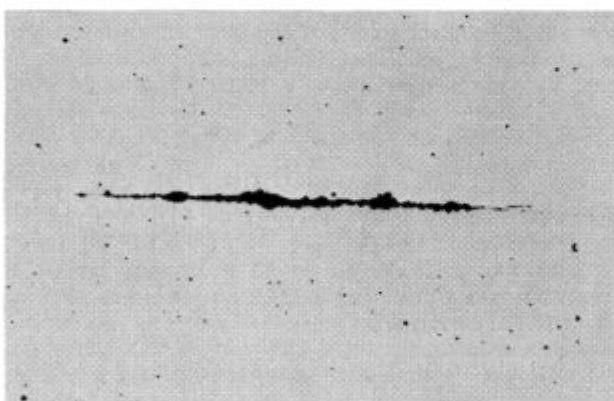
Talina	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Al	V	N	K4
1	0,51	0,35	0,77	0,010	0,009	0,97	0,24	0,13	0,019	0,12	0,014	80
2	0,56	0,41	0,83	0,011	0,009	0,97	0,19	0,15	0,026	0,17	0,016	67
3	0,49	0,24	0,99	0,013	0,006	0,99	0,23	0,12	0,018	0,14	0,012	17
4	0,54	0,45	0,83	0,012	0,013	0,90	0,19	0,11	0,025	0,13	0,016	8
5	0,52	0,37	0,85	0,010	0,011	0,98	0,25	0,12	0,020	0,14	0,014	6



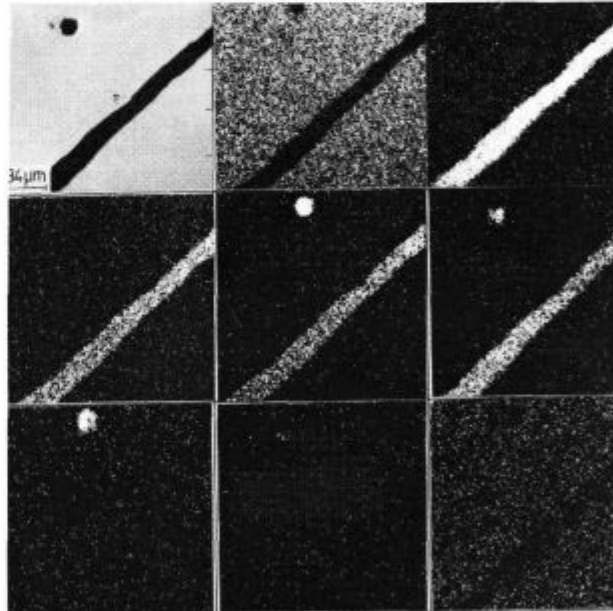
Slika 1
Deformiran nekovinski vključek (pov. 50 ×)
Fig. 1
Deformed non-metallic inclusion (magn. 50 ×)



Slika 3
Kompleksen modificiran nekovinski vključek (pov. 100 ×)
Fig. 3
Complex modified non-metallic inclusion (magn. 100 ×)



Slika 2
Nekovinski vključek se je med vročo predelavo deformiral in deloma drobil (pov. 50 ×)
Fig. 2
Non-metallic inclusion was deformed and partially broken during hot working (magn. 50 ×)



ES	Fe	Si
Mn	Ca	Al
S	Mg	Cr

Slika 4
Posnetek elektronske sestave in specifični X posnetki duktilnega $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ vključka
Fig. 4
Electron picture and specific X-ray pictures of ductile $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ inclusion

zelo različna in imajo v premeru tudi do 200 μm . Pogosto se že v optičnem mikroskopu opazi, da so kompleksni (sl. 3).

Z analizo večjega števila nekovinskih vključkov elektronskem mikroanalizatorju smo opredelili odvisnost oblike vključkov od njihove sestave. Zelo plastični so vključki sestave $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$. Zanje je značilno, da imajo visoko vsebnost SiO_2 (sl. 4) in da je koncentracija prisotnih elementov po vključku zelo enakomerna. Slabše preoblikovani vključki, ki se lahko deloma tudi drobijo, so kompleksni $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ vključki nehomogene sestave. Po videzu in sestavi so zraščeni silikatni in

aluminatni vključki z oksidi spinelne oblike ($MnO \cdot Al_2O_3$, $MgO \cdot Al_2O_3$), pogosto pa so nanje vezani še sulfidi (MnS , CaS). Vsebnost SiO_2 in MnO je v teh vključkih manjša kot v dobro preoblikovalnih vključkih (sl. 5).

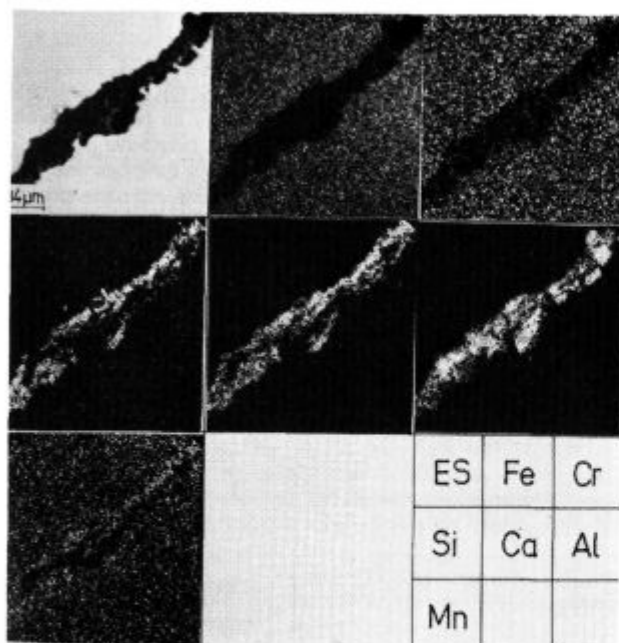
Taline, 3, 4 in 5 so mnogo čistejše. Zelo redki so vključki, ki so se med preoblikovanjem deformirali in deloma drobili. Modificirani vključki so drobnejši, posamezni vključki pa merijo v premeru do $60 \mu m$. Sestava modificiranih vključkov kalcijevega aluminata je v vseh talinah podobna. V vseh vključkih smo izmerili majhno vsebnost SiO_2 (1 do 5%), vsebujejo pa lahko še MnO in MgO . Na modificirane vključke je vezano sulfidno žveplo (CaS , MnS). Porazdelitev sulfidov je lahko po preseku vključkov enakomerna (sl. 6), večinoma pa je v obliki venca po površini (sl. 7). CaO je termodinamično stabilnejši kot CaS , zato v talini najprej nastajajo $CaO \cdot Al_2O_3$ vključki, na katere se nato vežejo sulfidi. MnS in CaS imata isto kristalno strukturo, zaradi različnih atomskih premerov pa se v sulfidih deloma nadomeščata. Z naraščajočim razmerjem Ca/S v talini se zmanjšuje možnost nastanka vključkov MnS .

Ob modificiranih vključkih se pogosto opazijo praznine trikotne oblike (sl. 6), ki so nastale med vročo predelavo jekla.

V jeklih nismo opazili čistih vključkov kalcijevega aluminata. V vseh primerih so to kompleksni vključki in so na vključke $CaO_2 \cdot Al_2O_3$ vezani še SiO_2 , CaS , MnS , MnO in MgO .

2.3. Mehanske lastnosti

Rezultati nateznih preizkusov in meritev trdot so podani v tabeli 2. Kemična sestava talin je različna in vzorci nizko popuščeni, zato je odvisnost med mejo plastičnosti, natezno trdnostjo, raztežkom, kontrakcijo in oceno čistosti jekla neizrazita.

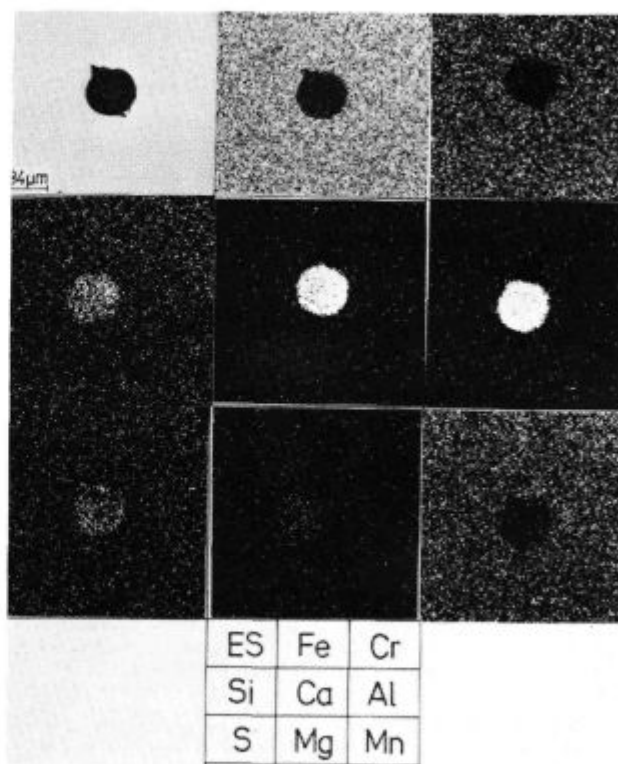


Sl. 5

Posnetek slabše duktilnega $SiO_2 \cdot CaO \cdot Al_2O_3$ vključka z malo MnO , ki se je pri predelavi deloma drobnil

Fig. 5

Picture of less ductile $SiO_2 \cdot CaO \cdot Al_2O_3$ inclusion with small amount of MnO which was partially broken during working



Slika 6

Modificiran vključek kalcijevega aluminata z malo SiO_2 , MgO in CaS . Ob vključku se dobro vidi praznina izoblikovana med valjanjem

Fig. 6

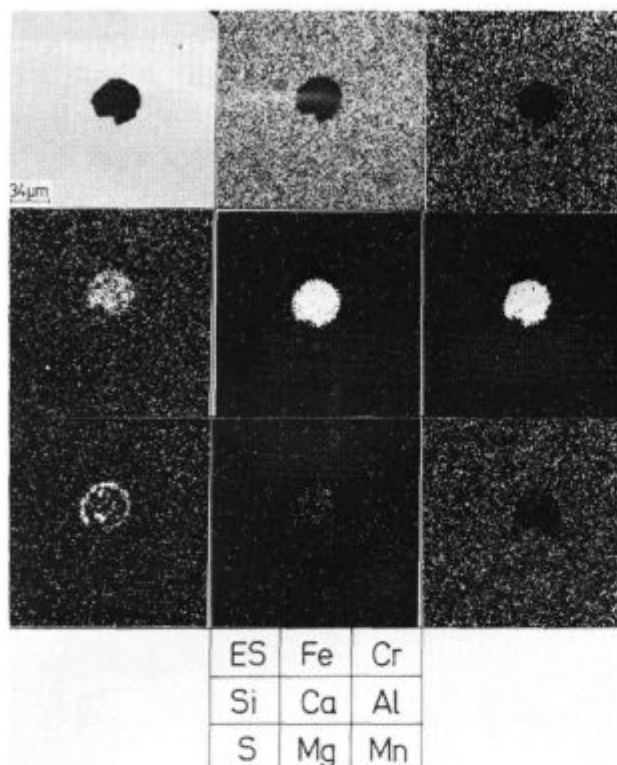
Modified inclusion of calcium aluminate with small amounts of SiO_2 , MgO and CaS . Cavity formed during rolling is visible next to the inclusion.

Tabela 2: Mehanske lastnosti nateznih preizkušancev

Talina	Meja plastičnosti	Natezna trdnost	Raztežek	Kontrakcija	Trdota	
	R_p (N/mm^2)	R_m (N/mm^2)	A (%)	Z (%)	HV	K4
1	1202	1261	11	42	387	80
2	1261	1316	11	36	420	67
3	1209	1263	10	40	398	17
4	1232	1287	10	38	417	8
5	1215	1282	12	44	396	6

Prelomi nateznih preizkušancev imajo čašasto obliko, značilno za duktilen prelom (sl. 8). V sredini ali v bližini sredine se opazi področje, kjer so ob nekovinskih vključkih nastale začetne razpoke. Preizkušanci vseh talin, razen taline 5, imajo izrazite strižne razpoke. Te potekajo vzporedno z izcejami, ki so na vzorcih teh talin izrazite in to bolj na vzorcih, izrezanih iz sredine vzmetnih lamel. Martenzit po izcejah je zelo trd in razlika v mikrotrdoti med izcejami in martenzitom ob njih znaša do 160 HV. Napredovanje strižnih razpok pospešujejo tudi duktilni oksidni vključki in drobni sulfidi, ki so v izcejanih področjih pogostejši.

Prelomne površine so duktilne. Poleg manjših jamic (sl. 9) se opazijo tudi večje, iz katerih so modificirani vključki večinoma izpadli. Redkeje smo opazili deformirane vključke v strižnih razpokah.

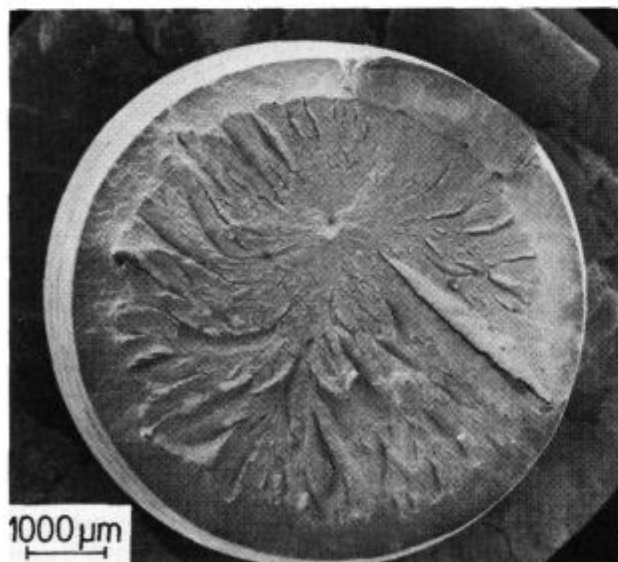


Slika 7

Modified inclusion of calcium aluminate with small amounts of SiO_2 , MgO in matrix CaS

Fig. 7

Modified inclusion of calcium aluminate with small amounts of SiO_2 , MgO, and peripherally distributed CaS.



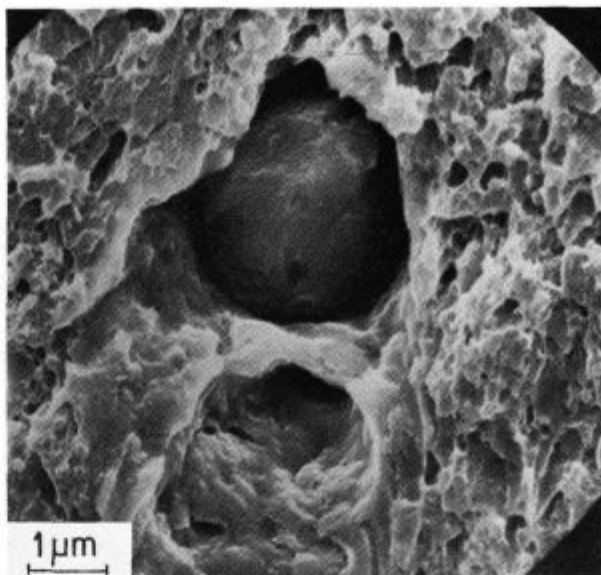
Slika 8

Makroposnetek preloma nateznega preizkušanca

Fig. 8

Macropicture of fracture of tensile test piece.

Z vrtilno upogibnim preizkušanjem se do neke mere približamo pogojem, katerim so vzmeti izpostavljene v praksi, popolnoma pa jih ne moremo simulirati. Trajno dinamično vrtilno upogibno trdnost smo določili po metodi



Slika 9

Modified non-metallic inclusion in tough fracture surface

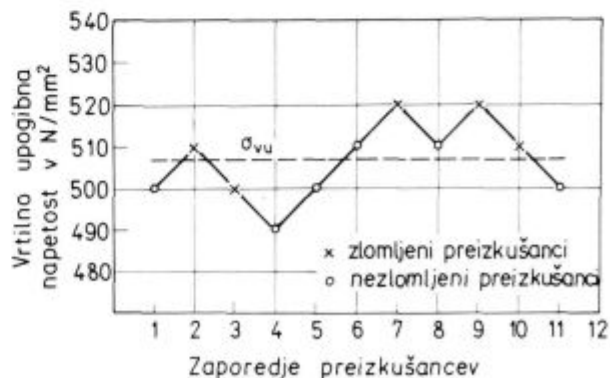
Fig. 9

Modified non-metallic inclusion in tough fracture surface

stopnic iz grafičnega prikaza zaporedja napetosti (sl. 10). Šteje se, da se preizkušane pri določeni napetosti ne zlomi, če vzdrži 10^7 nihajev, praktično pa se ne zlomi, če vzdrži $2 \cdot 10^6$ nihajev. Pri naših preiskavah smo preizkušanje prekinili pri $4,5 \cdot 10^7$ nihajev oz. obratov.

Rezultati preizkušanj so podani v tabeli 3. Pomembnejši kazalec kot trajno vrtilno upogibna trdnost je razmerje med vrtilno upogibno trdnostjo in natezno trdnostjo. Razlike med talinami so sicer majhne, vidi pa se, da ima čistejše jeklo višjo trajno dinamično vrtilno upogibno trdnost in višje razmerje σ_{vu}/R_m .

Natančnejše preiskave prelomnih površin vrtilno upogibnih preizkušancev smo naredili v SEM. Morfološke značilnosti prelomov so zelo podobne. Utrujenostni lom se je v večini primerov širil z enega ali redkeje dveh in več inicialov na površini ali malo pod površino preizkušancev. V primerih, ko se je lom pričel z dveh ali več inicialov v več nivojih, so se lomne površine združile preko stopnic v eno ravnino. V smeri proti inicialu se vidijo radialne linije, ki so zaradi poškodb delno zabrisane. V večji



Slika 10

Potek vrtilno upogibnih preizkušanj za talino 3

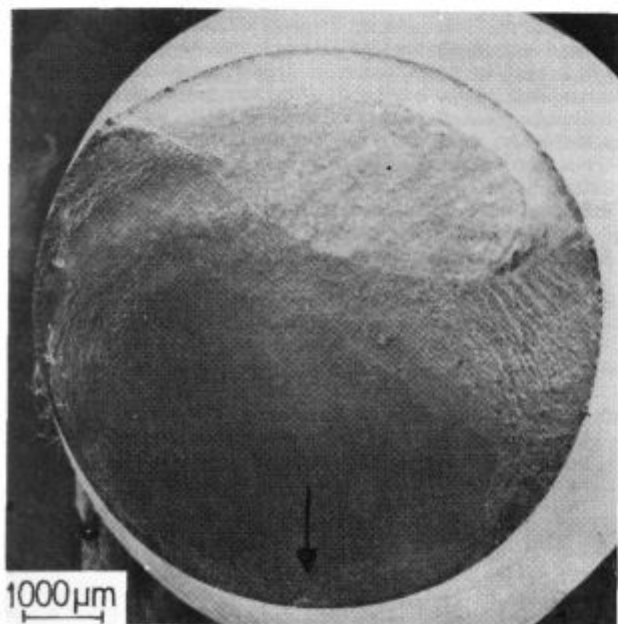
Fig. 10

Flowsheet of rotating cantilever tests for the melt 3

oddaljenosti od iniciala se opazijo linije napredovanja loma. Površina trenutnega loma leži diametralno nasproti iniciala in je žilava (sl. 11). Delež trenutno zlomljene površine je v primerjavi s površino, po kateri je potekal utrujenostni lom, sorazmerno majhen, kar kaže na dobro žilavost jeklene matice.

Tabela 3: Vrtilno upogibna trdnost

Talina	Vrtilno upogibna trdnost σ_{vu} (N/mm ²)	Raztros S (N/mm ²)	Razmerje σ_{vu}/R_m	K4
1	490	22,5	0,39	80
2	509	5,0	0,39	67
3	507	9,4	0,40	17
4	518	11,4	0,40	8
5	538	6,1	0,42	6



Slika 11

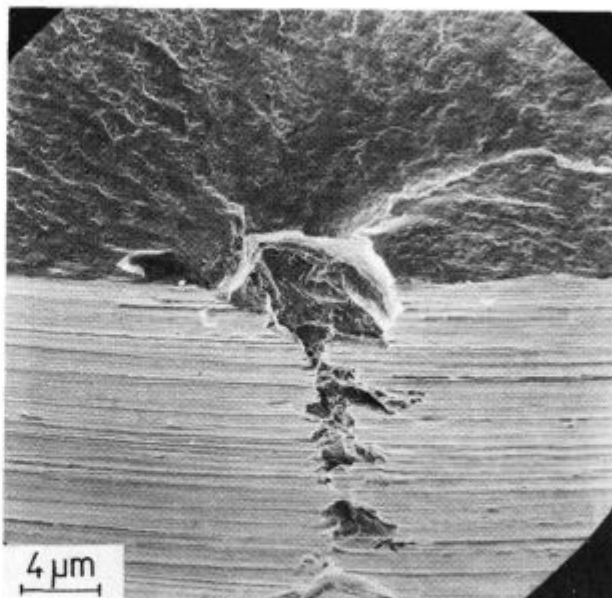
Makrosposnetek vrtilno upogibnega preizkušanca z označenim inicialom loma

Fig. 11

Macropicture of rotating cantilever test specimen with marked initial fracture

V večini primerov smo že pri makroskopskih pregledih, natančneje pa v SEM, opazili, da so iniciali za nastanek utrujenostne razpoke duktilni vključki $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ ($\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$) ali večji modificirani vključki kalcijevega aluminata (sl. 12, 13, 14). Čim manjši je vključek, ob katerem je nastala inicialna razpoka, večje število obratov je bilo potrebnih do zloma. V primeru večjega niza nekovinskih vključkov pa je prišlo do zloma zelo hitro. Le pri redkih preizkušancih nismo uspeli opredeliti vzrokov za začetek utrujenostnega loma. Na površini teh vzorcev so bile lahko napake zaradi mehanske obdelave, ali pa so bili med preizkušanjem ustvarjeni pogoji za večjo koncentracijo napetosti, zaradi katerih je nastala začetna razpoka. Ti vzorci so se zlomili na višjih napetostnih nivojih.

Preiskave mehanskih lastnosti smo naredili v vzdolžni smeri, zato na napredovanje utrujenostne razpoke v večji meri vpliva napetostno stanje, ki je med drugim tudi

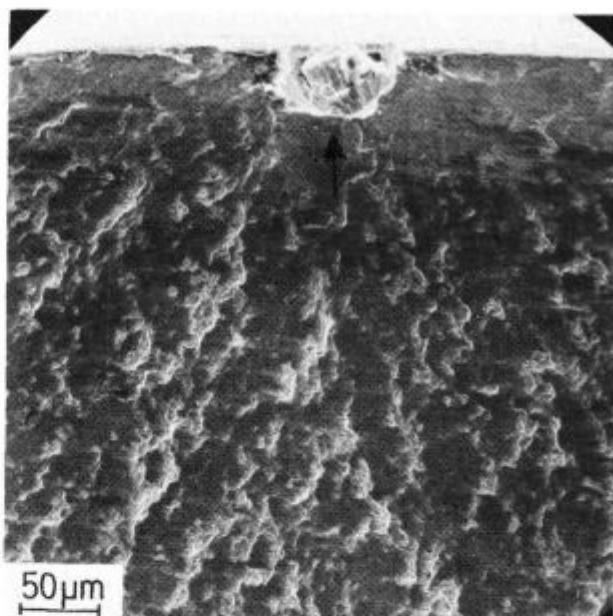


Slika 12

Detajl s slike 11. Inicial loma je bil duktilen $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ vključek na površini preizkušanca

Fig. 12

Detail from Fig. 11. Fracture was initiated on the ductile $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ inclusion on the specimen surface.



Slika 13

Inicial utrujenostnega loma je bil modificiran vključek kalcijevega aluminata na površini preizkušanca

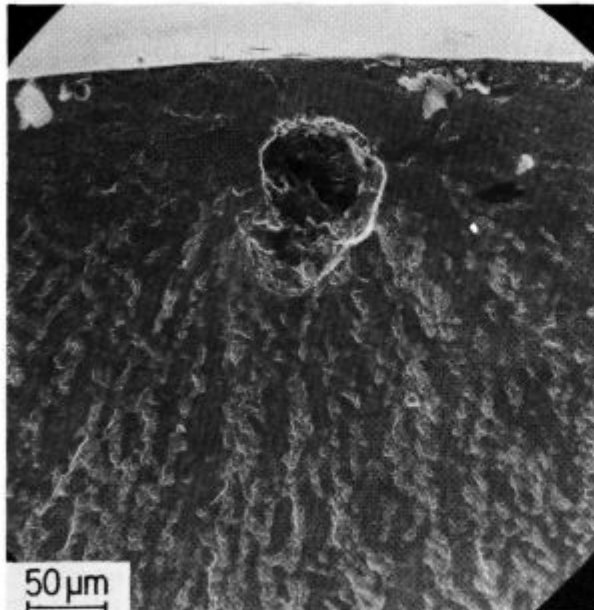
Fig. 13

Fatigue fracture was initiated on the modified inclusion of calcium aluminate on the specimen surface.

posledica mikrostrukturnih nehomogenosti (izceje), kot nekovinski vključki. Med vzorci, izrezanimi iz sredine in ob robu vzmetnih lamel, nismo opazili bistvenih razlik.

3. ZAKLJUČEK

Preiskave smo naredili na talinah jekla Č.4830 z različno oceno čistosti po metodi K4. Jeklo, izdelano po teh-



Slika 14

Inicial utrujenostnega loma je bil modificiran vključek malo pod površino preizkušanca

Fig. 14

Fatigue fracture was initiated on the modified inclusion close below the sample surface.

nologiji obdelave s CaSi, je čistejša, z modifikacijo pa dosežemo, da so nekovinski vključki globularni. Pri neustrezni modifikaciji nastanejo duktilni vključki $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$, ali delno duktilni kompleksni vključki $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$, na katere so lahko vezani oksidi spinelne sestave in CaS. Pri uspešni modifikaciji morajo

biti nastali kalcijevi aluminati, ki še vedno vsebujejo malo SiO_2 in večinoma v vencu razporejen CaS, drobn.

Mehanske lastnosti nateznih preizkušancev v poboljšanem stanju so odvisne predvsem od kemične sestave jekla in izcejanosti jekla. Vpliv nekovinskih vključkov, to je čistosti jekla, je izrazit pri trajno vrtilno upogibni trdnosti σ_{vu} in razmerju σ_{vu}/R_m . Iniciali za začetek utrujenostnega loma so predvsem večji duktilni vključki in tudi večji modificirani vključki kalcijevega aluminata. Zato mora biti jeklo, namenjeno za visoko trdne dele in vzmeti, tako obdelano s CaSi, da so v jeklu le drobn vključki kalcijevega aluminata.

LITERATURA

1. A. D. Wilson: Metal Progress, 1982 april, 41—46.
2. I. C. Mayes, T. J. Baker: Materials Science and Technology, 2, 1986, febr., 133—139.
3. A. Zaczek, T. Maguda, W. Dziadur: 9th Congress on Material Testing, Budimpešta 1986, Zbornik predavanj, 94—98.
4. J. Žvokelj, M. Pipan, S. Senčič: Ugotavljanje lastnosti vzmetnih jekel, izvaljanih iz kontinuirno ulitih gredic pri dinamičnih obremenitvah, Poročilo MI, Ljubljana 1975.
5. V. Prešern, M. Debelak, P. Bračun: Uvajanje postopka vpihovanja CaSi v SŽ-Železarni Štore, poročilo MI, Ljubljana 1984.
6. D. Kmetič, F. Vodopivec, F. Vizjak, S. Senčič: Železarski zbornik 13 (1979) 3, 85—93.
7. D. Kmetič, F. Vodopivec, F. Vizjak, F. Haller: Železarski zbornik, 18 (1989) 17—26.
8. M. Debelak, R. Grabner, F. Golčman, V. Medved: Optimizacija pogojev ulivanja za zagotavljanje kvalitete konti litih gredic, poročilo MI 90-052, Ljubljana 1990.
9. T. Ototani: Calcium Clean Steel, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1986.
10. D. Kmetič, J. Žvokelj, M. Jakupovič, H. Ploštajner, L. Jovanovski, F. Kaučič: Vpliv oblike in količine nekovinskih vključkov na dinamične lastnosti jekla, Poročilo MI 86-042, Ljubljana 1986.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen sind an Schmelzen der Stahlmarke Č.4830 mit verschiedenem Reinheitsgrad nach der Methode K4 durchgeführt worden. Der mit CaSi nachbehandelter Stahl ist reiner. Durch die Modifizierung erreichen die nichtmetallischen Einschlüsse eine globulitische Form. Bei einer nichtausreichenden Modifikation entstehen plastische $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ Einschlüsse, oder teilweise plastische komplexe $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ Einschlüsse, an welche Oxyde der Spinelzusammensetzung und CaS, gebunden sein können. Bei einer erfolgreichen Modifikation entstehende, Calciumaluminat die immer noch etwas SiO_2 enthalten und meistens am äusseren Rand gebundenen CaS haben, müssen dünnkörnig sein.

Mechanische Eigenschaften von Zerreissproben, im vergüteten Zustand, sind vor allem von der chemischen Stahlzusammensetzung, und den Seigerungen, abhängig. Einfluss der nichtmetallischen Einschlüsse d. h. des Reinheitsgrades von Stahl ist ausgeprägt bei der Dauerverdrehtbiegefestigkeit σ_{vu} und dem Verhältniss σ_{vu}/R_m . Initiale für den Anfang von Ermüdungsbruch sind vor allem grössere plastische Einschlüsse, so wie auch grössere modifizierte Calciumaluminateneinschlüsse. Aus diesem Grunde muss der Stahl, bestimmt für hochfeste Teile und Federn, mit CaSi so behandelt werden, daß im Stahl nur dünnkörnige Calciumaluminateneinschlüsse verbleiben.

SUMMARY

Test were made with melts of Č.4830 steel of various purities according to the K4 method. Purity of steel being treated with CaSi is better while modification gives globular non-metallic inclusions. In not adequate modification, ductile $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ or partially ductile complex $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ inclusions are formed to which oxides of spinel composition and CaS are bonded. In successful modification the formed calcium aluminates, always containing small amounts of SiO_2 and usually peripherally distributed CaS, must be small.

Mechanical properties of tensile test pieces, as hardened

and tempered, depend mainly on the chemical composition of steel and on the segregations. Influence of non-metallic inclusions, i. e. of the purity of steel, is pronounced for fatigue rotating cantilever test strength σ_{uv} and for σ_{uv}/R_m ratio. Initiating nuclei for fatigue fracture are mainly bigger ductile inclusions and also bigger modified inclusions of calcium aluminate. Therefore the high-strength and spring steel must be treated with CaSi that there are only fine inclusions of calcium aluminate in steel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы произвели испытания на расплавах стали Č.4830 с различной оценкой чистоты по методу K4. Сталь, изготовленная по технологии обработки с CaSi является более чистой, а с модификацией достигаем глобулярных неметаллических включений. При нецелесообразной модификации образуются дуктильные $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ включения или частично дуктильные комплексные $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ включения, на которые могут быть связаны окиси шпинелевого состава и CaS. При удачной модификации образованы кальциевые алюминаты, которые всегда содержат еще несколько SiO_2 и в большинстве в венце распоряжен CaS, должны быть мелкие.

Механические свойства натяжных пробных образцов в улучшенном состоянии прежде всего зависят от химического состава стали и сегрегации стали. Влияние неметаллических включений, т. е. чистоты стали является выразительным при вращательно изгибной прочности σ_{uv} и отношении σ_{uv}/R_m . Причиной начала усталостного разрушения являются прежде всего большие дуктильные включения, а также большие модифицированные включения кальциевого алюмината. Поэтому сталь, предназначенная для высоко прочных частей и пружин должна быть так обработана с CaSi, чтобы в стали были только мелкие включения кальциевого алюмината.