

UDK 620.192.42:539.4.016.3:669.14

Toplotno razpokanje orodij za delo v vročem

FRANC KOSEL in LADISLAV KOSEC

V članku obravnavamo toplotno razpokanje, ki je pogost pojav poškodovanja jekel pri delu v vročem. Raziskali smo spremembe na površini poškodovanega jekla. Analizirali smo pomen kemične nehomogenosti jekla za nastanek in rast razpok v povezavi z zunanjimi vplivi. Izračunali smo napetostno stanje za obravnavani primer, pri čemer smo upoštevali tudi vpliv oksidacije na širjenje korena razpok.

1. UVOD

Raziskavo, opisano v tem prispevku, je vzpodbudil pojav t. i. toplotnega (vročega, mrežastega) razpokanja, ki je pogosta in usodna poškodba delovnih površin nekaterih kovaških orodij, kokil in sestavnih delov strojev za tlačno litje kovin. Gradiiva za te dele so iz skupine jekel za delo v vročem. Med njimi prevladujejo jekla »prve generacije« npr. Č.4750, Č.4751 in Č.4753, pogosto poimenovana tudi po svojih ameriških različicah in predhodnikih: H 11, H 12 in H 13.

Praktična kritika tega pojava večinoma ni objektivna. Razdeljena je v dve skupini: ena vali krivdo na izdelovalca jekla, druga pa na nasprotno stran, ki naj bi ne znala ravnati z jeklom.

Iz strokovne literature razberemo, da je pojav toplotnega razpokanja posledica več med seboj povezanih hkratnih zunanjih vzrokov. Najbolj pogosta in najbolj dognana je teorija, ki razlaga pojav toplotnega razpokanja kot posledico temperaturne utrujenosti, upošteva pa tudi vlogo raztaljene kovine, oksidacije površine jekla in koncentracije napetosti.

V članku je opisan pomen prispevka neenakomernosti kemične sestave jekla (kristalnih izcej) na velikost in mikroskopsko neenakomernost temperaturnih napetosti v jeklu ter na mesto začetka in širjenja razpok. Poleg tega smo analizirali še prispevek dveh objektivnih vzrokov, oksidacije površine jekla in selektivne oksidacije ostankov raztaljene kovine v razpokah na nastanek in širjenje oksidnih klinov.

Kristalne izceje štejemo med nepopolnosti zlitin, ki so posledica neravnotežnega strjevanja. Za večino takih zlitin velja, da imajo slabše mehanske in fizikalno kemične lastnosti, kakor če ne bi imele te napake. Mnogokrat se dajo v celoti ali zadovoljivo gospodarno odpraviti z ustreznim visokotemperaturnim žarjenjem, včasih pa so trdožive in tudi dolgotrajna žarjenja ne rode popolnega uspeha.

Kristalne izceje so bolj ali manj periodično spreminjajoča se koncentracija sestavin zlitine. »Valovne dolžine« so enakih razsežnosti kakor mikroskopski elementi strjevanja zlitine, dendriti. Mikropodročja, v katerih je koncentracija legirnih elementov večja od povprečne koncentracije v zlitini, so področja pozitivnih, mikropodročja pa, v katerih je koncentracija legirnih elementov manjša

od povprečne v zlitini, pa področja negativnih izcej. Z največjimi in najmanjšimi koncentracijami legirnih elementov v teh področjih je določena amplituda tega periodičnega pojava. Mikropodročja z različno kemično sestavo se razlikujejo tudi po mehanskih in fizikalno kemičnih lastnostih, v razteznostnih koeficientih, toplotni prevodnosti, trdoti, trdnosti, odpornosti proti koroziji (tudi visokotemperaturni oksidaciji) ipd. Razlika v kemični sestavi se pozna tudi v kinetiki transformacij pri toplotni obdelavi. Profili razdelitve legirnih elementov so praviloma naključne funkcije, ki pa se dajo, ne da bi popačili naravo pojava, idealizirati s porazdelitvami npr. v obliki periodičnih ali podobnih funkcij. Z metalografskimi in mikroanaliznimi metodami lahko izmerimo valovne dolžine in amplitude kristalnih izcej.

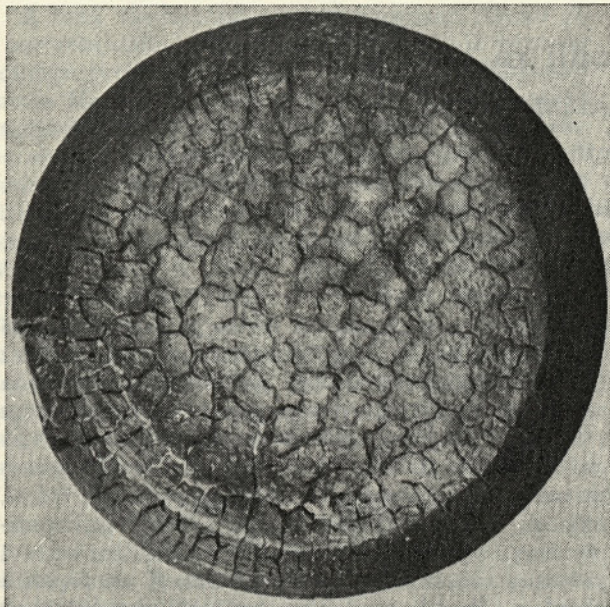
S preoblikovanjem zlitine se valovne dolžine izcej praviloma zmanjšujejo; zaradi visokotemperaturnih žarjenj, ki spremljajo preoblikovanje, pa se zmanjšujejo tudi amplitude segregacij. Dopustno idealiziranje razdelitve legirnih elementov (C, Cr, Mo, V) v orodnem jeklu Č.4751 je bilo osnova ponostavljenega termoelastičnega modela za izračun napetosti zaradi zunanjih vplivov in kemične nehomogenosti jekla.

Sestavili smo model, ki je osnova analitičnega in kvantitativnega izračuna napetosti na površini bata; pri izračunu smo posebej upoštevali elemente, ki doslej v literaturi niso bili obravnavani, tj. kemično nehomogenost jekla, skupaj z že znanim vplivom menjajoče temperature in oksidnega klina.

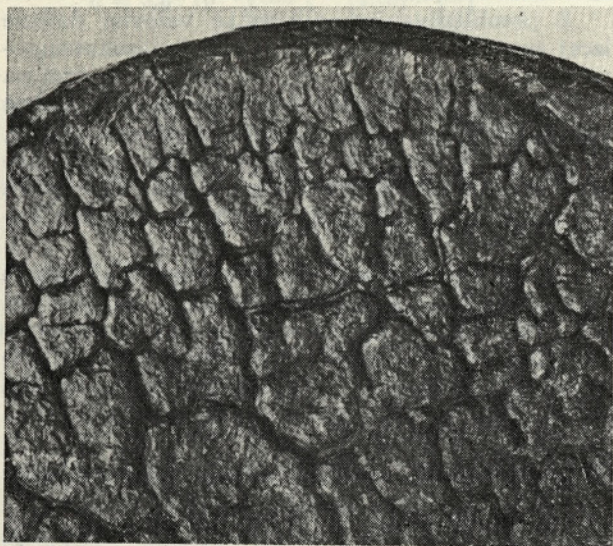
2. ZNAČILNOSTI TOPLOTNEGA RAZPOKANJA

Pojav toplotnega razpokanja bomo ponazorili z značilnostmi delovne površine bata za tlačno litje medi, kjer je dosegel take razsežnosti, da ta del stroja ni bil več uporaben.

Na delovnih površinah primarnih delov orodij in strojev, tj. tistih, ki so v stiku z obdelovano kovino, nastane gosta mreža razpok, površina se pokrije z mešanico oksidov in kovine. Razpoke so široko odprte proti površini, tako da so njihovi izhodi na površini podobni kanalom, zapolnjenimi z ostanki škaže in kovine; robovi so zaobljeni, stene pa prav tako prekrte s škažo (sl. 1, 2). Polja površine med kanali razpok so valovita, prekrita z različno debelo škažo ali mešanico škaže in obdelovane kovine. V končni fazi se posamezno polje ali

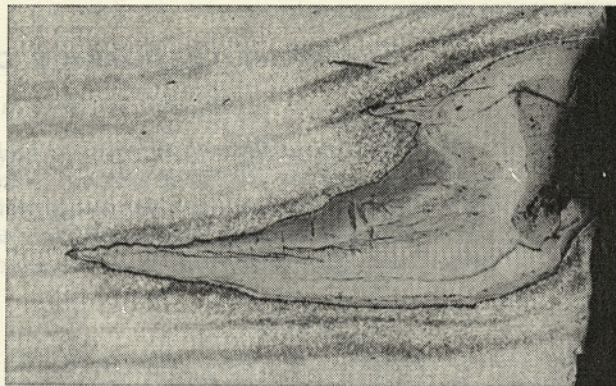


Sl. 1. Delovna površina tlačnega bata stroja za tlačno litje medi; mreža razpok zaradi toplotnega razpokanja; površina je prekrita z mešanico škaje in bakra, nastale pri selektivni oksidaciji obdelovane kovine. Puščica kaže mesto, kjer se je odluščil del poškodovane površine (1,5 : 1)

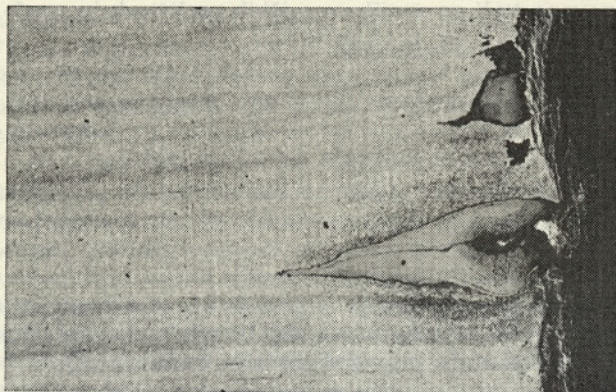


Sl. 2. Povečan detajl delovne površine tlačnega bata (podoben kakor na sl. 1) z mrežo razpok; v širokih kanalih, odprtih na površino so ostanki obdelovane kovine in škaje (4 : 1)

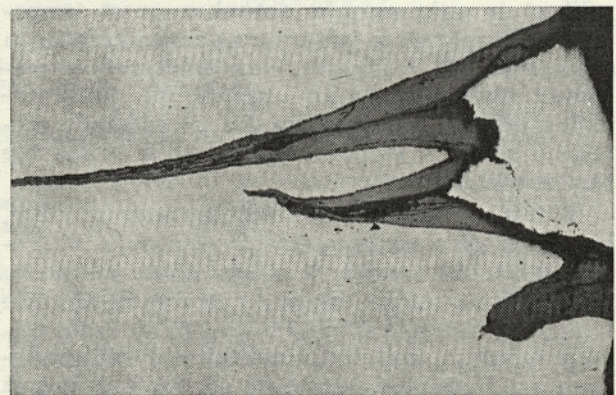
več polj med razpokami lahko odlušči. Na osnem prerezu imajo razpoke obliko klinov, zapolnjenih s škajo ali škajo in kovino (medjo ali bakrom). Oksidni klini so lahko razmeroma ozki in segajo globlje v kovino, široki in kotanjasti pa običajno končajo bliže površini; lahko so enojni ali sestavljeni iz dveh ali treh sosednjih primarnih oksidnih klinov, ki so združeni na topem delu (sl. 3 do 7).



Sl. 3. Zajeda, sestavljena iz dveh oksidnih klinov; razpoke v smeri osi klinov so pota hitrega dotoka kisika na vrh (čelo) klinov. Bela vlakna so negativne, temna pa pozitivne izceje. Ob temenu oksidnega klina se iz odklona vlaken sklepa na deformacijo jekla (50 : 1)

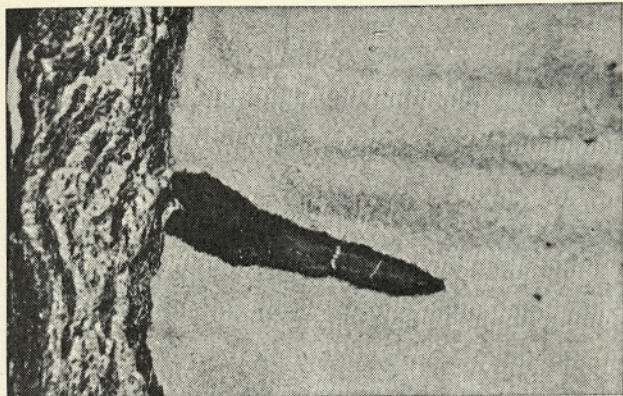


Sl. 4. Oksidna klina, deformacija jekla ob površini in s škajo prekrita delovna površina bata (50 : 1)

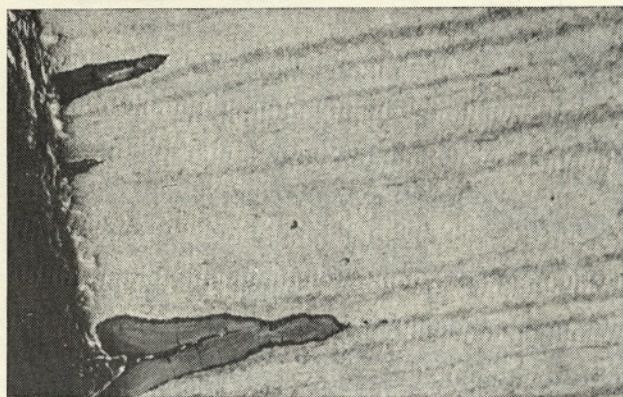


Sl. 5. Zajeda, sestavljena iz treh oksidnih klinov; v čaši zajede na temenu klinov je ostanek medi; v osi klinov so razpoke (30 : 1)

Ustja nekaterih kanalov niso vidna na površini, ker so prekrita s plastjo škaje ali kompozita škaje in kovine (sl. 6). Dejanska pogostost mreže razpok je zato precej večja od mreže kanalov, vidne na površini. Oksidni klini so nastali na mestih, kjer



Sl. 6. Oksidni klin pod debelo plastjo oksida in bakra na delovni površini bata (100 : 1)



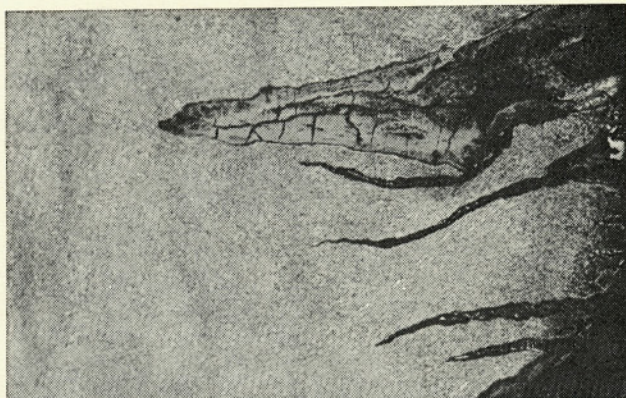
Sl. 7. Trije različno dolgi oksidni klini pod tanko plastjo iz škaže in bakra (50 : 1)

so se razvili iz mikroskopskih razpok zaradi dolgotrajnega delovanja v uvodu omenjenih zunanjih vzrokov. Na preiskanem batu so bile širine klinov na temenih ob površini od nekaj 10 do več 100 mikrometrov; segajo pa v globino prav tako nekaj 10 do več 1000 mikrometrov, najgloblje celo več mm (sl. 8 do 10). Vrh oksidnega klina je drobna mikroskopska razpoka, do katere je hitra pot za prenos kisika po razpokah in drugih napakah v oksidu.

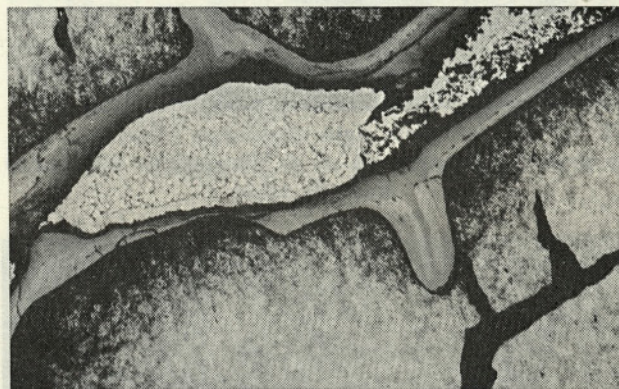
Kline sestavljajo oksidi železa, kroma, molibdena, silicija in cinka — sestavine jekla in obdelovane kovine.

Oksidni klini se razlikujejo po kakovostni in količinski kemični sestavi. Na stenah klinov je več kroma, silicija ali molibdena; v jedru pogosto prevladujejo oksidi obdelovane zlitine. Površinska škaža je predvsem selektivno oksidirana obdelovana kovina, v kateri prevladujeta cinkov oksid in baker (sl. 11, 12).

Oksidni klin napreduje v globino v povezavi z elementi mikrostrukture jekla, posebej s kristalnimi zrni in izcejami. V preiskanem vodno hlajenem batu so se razpoke širile pretežno transkristalno; v livarsko kovaških orodjih, ki niso bila hlajena



Sl. 8. Oksidni klini na delovni površini livarsko-kovaškega orodja. Smer širjenja razpok in oksidnih klinov se ne ujema s smerjo vlaken izcej (100 : 1)



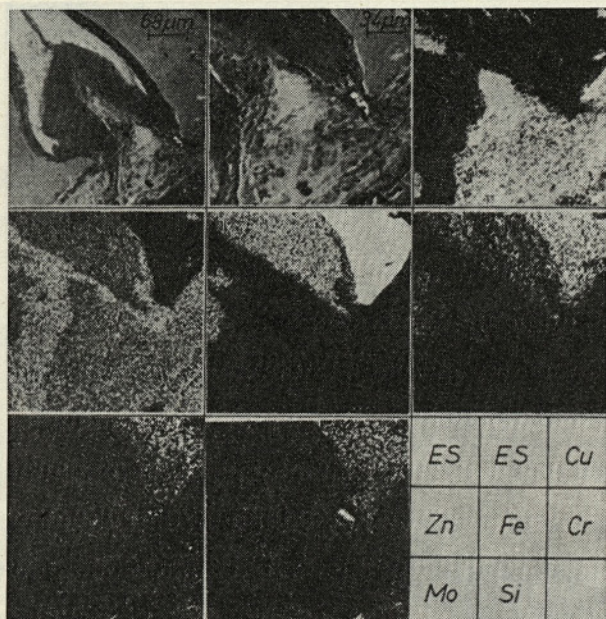
Sl. 9. Ostanki medi v kanalu razpoke na delovni površini bata (30 : 1)



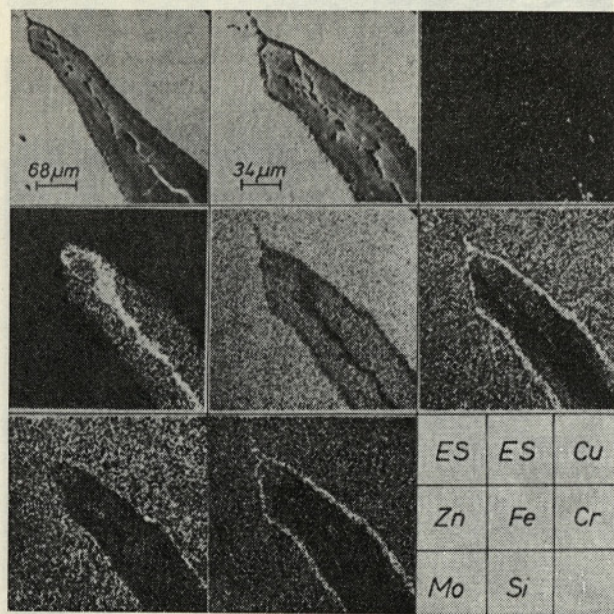
Sl. 10. Potek razpok prečno na smeri vlaken na delovni površini bata (30 : 1)

in so se pri delu segreli na višje temperature, pa je primarna razpoka rasla predvsem vzdolž kristalnih mej.

Jeklo, iz katerega je bil izdelan bat, je imelo poudarjene kristalne izceje. Pri kovanju so se razpotegnile v vlakna in trakove v smeri preoblikovanja. Najbolj izrazito je izcejanje glavnih legirnih elementov in ogljika. Največje koncentracije kroma



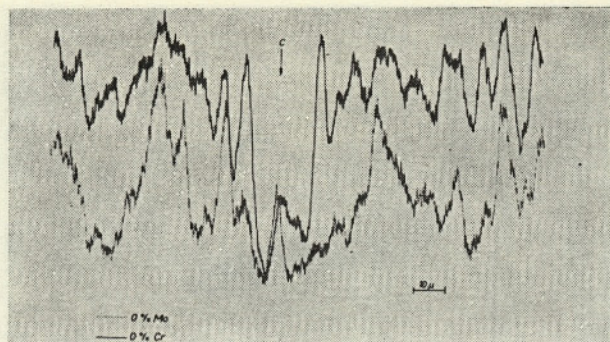
Sl. 11. Mikroanaliza dela oksidnega klina in s škajo prekrite površine (s sl. 4). Razdelitev elementov med in jekla



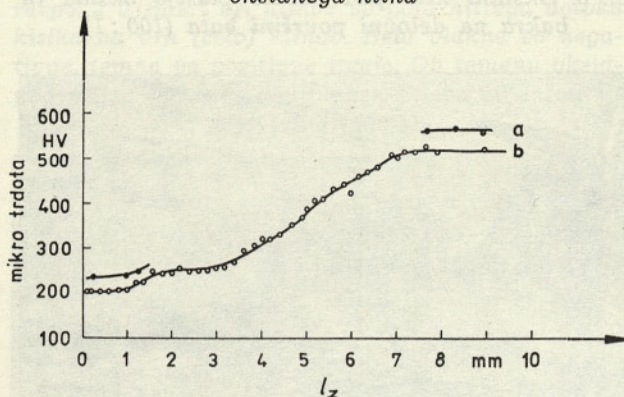
Sl. 12. Razdelitev elementov jekla in med v oksidnem klinu

in molibdena so bile v pozitivnih izcejih 7 %, oziroma od 2,5 do 3 %, najmanjše pa v negativnih izcejih okrog 3 % (krom) in od 0,5 do 0,7 % (molibden). Segregacije drugih legirnih elementov, vključno ogljika, se ujemajo s segregacijami kroma in molibdena (sl. 13).

Približno v osi kanalov pozitivnih in negativnih izcej smo izmerili potek mikrotrdot. Med dolgotrajnim delom pri visoki temperaturi se je trdota ob



Sl. 13. Potek koncentracij kroma in molibdena prečno na smer vlaken izcej. S C je označeno mesto oksidnega klina



Sl. 14. Potek trdote v osi kanalov pozitivne in negativne izceje od delovne površine v notranjost bata: a) pozitivna, b) negativna izceja

delovni površini zmanjšala na velikost, ki je značilna za skoraj idealno mehko žarjeno jeklo te vrste (sl. 14).

Še daleč od površine je trdota jekla manjša od začetne trdote. Mikrotrdoti v kanalih pozitivnih in negativnih izcej se razlikujeta za približno konstantno vrednost od površine do več milimetrov globoko. Iz tega sklepamo tudi na razlike v drugih mehanskih lastnostih, trdnosti, trajni trdnosti itd.

Nukleacije razpok na površini nismo mogli opazovati, prav tako ne začetkov oksidnih klinov.

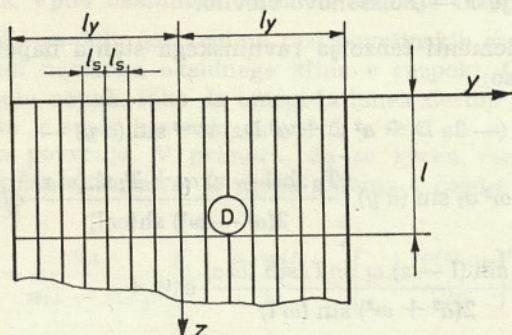
Pri metalografskih analizah velikega števila oksidnih klinov (več 100) smo opazili praktično vsem skupno lastnost, da so bili njihovi vrhovi in vrh napredujoče razpoke vedno v področju negativnih izcej, ne glede na to, čez koliko širin izcej se je razširilo teme klina. Ta ugotovitev velja za razmeroma kratke kakor tudi za najdaljše kline (več mm), iz česar sklepamo, da so se razpoke oz. klini ves čas širili v kanalih negativnih izcej.

Pri oksidaciji kovine se prostornina poveča, lahko tudi za več deset odstotkov. Na temenih zagozd je še zaradi dodatnega vpliva oksidacije obdelovane kovine absolutno povečanje prostornine največje. Zato se v okolici temena zagozde jeklo plastično deformira. O velikosti plastične deformacije se lahko prepričamo iz odklona vlaken izcej (sl. 3, 4).

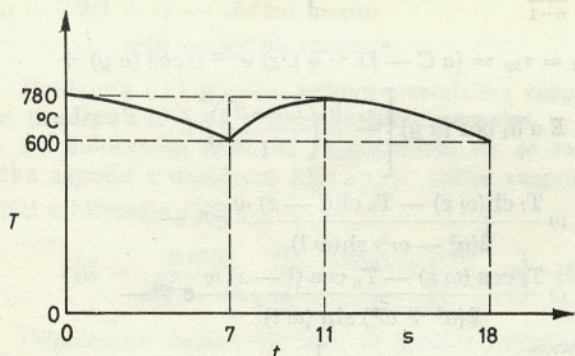
3. RAČUNSKI MODEL

3.1. Termoelastično napetostno stanje

Za zgoraj opisani primer je bil izdelan poenostavljen termoelastični model. Postavili smo, da se koncentracije legirnih elementov znotraj nehomogenega jekla porazdelijo po sinusovem zakonu s periodo, ki je približno enaka povprečni razdalji med mestom z največjo in najmanjšo koncentracijo legirnih elementov (l_s). S kemično sestavo se spreminjajo tudi vse fizikalne in kemične lastnosti. Iz omenjenih virov [8, 9] je razvidno, da ima različna koncentracija legirnih elementov največji vpliv na spremembo linearnega temperaturnega razteznostnega koeficienta.



Sl. 15. Definijsko območje D tankega sloja tlačnega bata



Sl. 16. Spreminjanje temperature na meji območja $z = 0$

Z izbiro koordinatnega sistema (y, z) lahko določimo definijsko območje $D\{y/ \leq l_y, z \geq 0\}$, $l_y = n l_s$, $n \in N$, v katerem je tanek sloj, izrezan iz srednjega dela tlačnega bata (sl. 15). V enem delovnem ciklu t_d niha temperaturno polje za velikost $\Delta T(y, z, t)$. V času $t_0 = 0$ s, ko začnemo proces opazovati, je temperatura na meji območja D, ($z = 0$) enaka T_0 , po času t_1 se temperatura na meji ($z = 0$) zniža na $T_1 = T_0 - \Delta T$, potem pa se v času t_2 ponovno zviša na začetno vrednost T_0 (sl. 16). Tlačni bat je v globini $z = l$ hlajen s hladilno tekočino, ki ima temperaturo T_l , zato domnevamo, da je temperatura bata v tem delu tudi enaka temperaturi hladilne tekočine.

Porazdelitev temperaturnega polja v območju D določimo iz diferencialne enačbe za vezano termoelastično stanje [1]

$$(2\mu + 3\lambda) a_T \dot{\epsilon}_{kk} T + \rho c_v \dot{T} - k T_{,ii} - \rho q = 0 \quad (1)$$

V obravnavanem primeru lahko menimo, da je potek termokinetičnega procesa v kontinuumu razmeroma počasen. V tem primeru preide enačba (1) v preprostejšo obliko, ki popisuje kvazistatično termoelastično stanje. Ob postavki, da je temperaturno polje v smeri osi y konstantno in da v območju D ni toplotnih izvirov q , je enačba (1) preprostejša

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

kjer je $a = k/c_v$ toplotna prevodnost, ki je za obravnavani primer konstantna v celotnem območju D in temperaturnem intervalu $\Delta T = T_0 - T_l$. Fizikalni primer terja upoštevanje naslednjih robnih in začetnih pogojev

$$\begin{aligned} T(0, t) &= T_0 f(t) & T(l, t) &= T_l f(t) \\ T(z, 0) &= \left(\frac{T_l - T_0}{l} z + T_0 \right) f(0) & f(t) &= b - ch(gt) \end{aligned} \quad (3)$$

kjer je $f(t)$ funkcija, ki določa nihanje temperaturnega polja.

Temperaturno polje določimo iz diferencialne enačbe (2) tako, da čas t izločimo z uporabo integralne Laplaceove transformacije [2]

$$L\{T(z, t)\} = \bar{T}(z, p) = \int_0^\infty e^{-tp} T(z, t) dt \quad (4)$$

Integral je absolutno konvergenten; če je parameter p takšno kompleksno število, da velja za realni del $\text{Re}(p) > k_1$, potem izhaja:

$$\begin{aligned} \bar{T}(z, p) &= \frac{-g^2}{(p^2 - g^2)p} \left[T_0 \frac{\text{sh}(l-z)p_1}{\text{sh}(l p_1)} + \right. \\ &\quad \left. + T_l \frac{\text{sh}(z p_1)}{\text{sh}(l p_1)} \right] + \left(\frac{T_l - T_0}{l} z + T_0 \right) \frac{b-1}{p} \end{aligned} \quad (5)$$

$$p_1 = \sqrt{p/a}$$

Rešitev funkcije temperaturnega polja $T(z, t)$ dobimo, če na funkcijo $\bar{T}(z, p)$ uporabimo inverzno Laplaceovo transformacijo

$$T(z, t) = \frac{1}{2\pi i} \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{c-iR}^{c+iR} e^{tp} \bar{T}(z, p) dp, \quad c > 0 \quad (6)$$

Iz enačbe (5) je razvidno, da ima funkcija $\bar{T}(z, p)$ pole v točkah $p_1 = 0$, $p_{2,3} = \pm g$ in tam, kjer ima funkcija $\text{sh}(l\sqrt{p_n/a}) = 0$, ničle.

Iz zveze $\text{sh}(n\pi i) = i \sin(n\pi)$ je zaradi $l\sqrt{p_n/a} = n\pi i$, $n \in N = \{1, 2, \dots\}$ lega polov p_n

$$p_n = -a[n\pi/l]^2 \quad (7)$$

Integral v formuli (6) lahko določimo z uporabo residuov

$$T(z, t) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_k} e^{t p \bar{T}(z, p)} dp = \text{Res}(0) + \text{Res}(g) + \\ + \text{Res}(-g) + \sum_{n=1}^{n=\infty} \text{Res}(p_n) \quad (8)$$

S tem je temperaturno polje v območju D enako:

$$T(z, t) = b \left(\frac{T_l - T_0}{l} z + T_0 \right) - \\ - \frac{T_0 \text{sh}(l - z) \omega + T_l \text{sh}(z \omega)}{2 \text{sh}(l \omega)} e^{gt} - \\ - \frac{T_0 \sin(l - z) \omega + T_l \sin(z \omega)}{2 \sin(l \omega)} e^{-gt} + \\ + \sum_{n=1}^{n=\infty} f_n(t) \sin(\lambda z)$$

kjer je

$$\lambda = n \pi / l \quad \omega = \sqrt{g/a} \\ f_n(t) = \frac{2}{\pi} \frac{T_0 + (-1)^{n-1} T_l}{n[(\lambda_1)^4 - 1]} e^{-\lambda_1^2 g t} \quad \lambda_1 = \frac{\lambda}{\omega} \quad (9)$$

Ravninsko napetostno stanje v območju D določimo z uporabo napetostne Airyjeve funkcije $F = F(y, z, t)$, če zanemarimo masne sile

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_y, & \tau_{yz}, & 0 \\ \tau_{zy}, & \sigma_z, & 0 \\ 0, & 0, & 0 \end{pmatrix} = (-1)^{i+j} F_{,ij} \quad (10)$$

ki mora za izpolnitev vseh elastomehanskih enačb kvazistatičnega termoelastičnega napetostnega stanja v ravnini zadoščati diferencialni enačbi

$$\Delta \Delta F + E \Delta [\alpha_T(y) T(z, t)] = 0 \quad (11)$$

kjer je E — Youngov oziroma elastični modul, ki je v tem primeru krajevna in časovna konstanta.

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \text{ — Laplaceov operator}$$

$$\alpha_T = \alpha_T(y) = \alpha_0 + \alpha_1 \sin(\alpha y) \text{ — linearni temperaturni razteznostni koeficient}$$

kjer so

$$\alpha_0 = 0,5 (\alpha_T^1 + \alpha_T^2) \quad \alpha_1 = 0,5 (\alpha_T^1 - \alpha_T^2) \\ \alpha = \pi / l_s \quad (12)$$

α_T^1 — linearni temperaturni razteznostni koeficient območja s pozitivno izcejo

α_T^2 — linearni temperaturni razteznostni koeficient območja z negativno izcejo.

Obravnavani model terja izpolnitev naslednjih robnih pogojev na meji območja D:

$$\sigma_z(y, 0, t) = \tau_{yz}(y, 0, t) = \tau_{zy}(y, 0, t) = 0 \\ \lim_{z \rightarrow \infty} \sigma_{ij} \neq \infty \quad (13)$$

Tlačni bat ima na delovni temperaturi predpisano tolerančno območje, zato deformacija bata v smeri osi y ni ovirana.

Z upoštevanjem funkcije temperaturnega polja (9) in linearnega temperaturnega koeficienta (12) je znan nehomogeni del diferencialne enačbe (11), katere rešitev lahko izrazimo na naslednji način:

$$F(y, z, t) = U(y, z, t) - [E/(1 + \nu)] \psi(y, z, t) \quad (14)$$

Funkciji $U(y, z, t)$ in $\psi(y, z, t)$ morata zadoščati diferencialnima enačbama

$$\Delta \Delta U(y, z, t) = 0$$

$$\Delta \psi(y, z, t) = (1 + \nu) \alpha_T(y) T(z, t) \quad (15)$$

kjer je ν — Poissonovo število.

Elementi tenzorja ravninskega stanja napetosti (10) so:

$$\sigma_y = (-2\alpha D + \alpha^2 C + \alpha^2 Dz) e^{-\alpha z} \sin(\alpha y) - \\ - E \omega^2 \alpha_1 \sin(\alpha y) \left[\frac{T_0 \text{sh}(l - z) \omega + T_l \text{sh}(\omega z)}{2(\alpha^2 - \omega^2) \text{sh}(\omega l)} e^{gt} - \right. \\ \left. - \frac{T_0 \sin(l - z) \omega + T_l \sin(\omega z)}{2(\alpha^2 + \omega^2) \sin(\omega l)} e^{-gt} + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{n=\infty} f_n \frac{\lambda^2}{\alpha^2 + \lambda^2} \sin(\lambda z) \right] \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} = (\alpha C - D + \alpha Dz) e^{-\alpha z} \alpha \cos(\alpha y) + \\ + E \alpha \alpha_1 \cos(\alpha y) \left[- \frac{b}{\alpha^2} \left(\frac{T_l - T_0}{l} \right) + \right. \\ \left. + \frac{T_l \text{ch}(\omega z) - T_0 \text{ch}(l - z) \omega}{2(\alpha^2 - \omega^2) \text{sh}(\omega l)} e^{gt} + \right. \\ \left. + \frac{T_l \cos(\omega z) - T_0 \cos(l - z) \omega}{2(\alpha^2 + \omega^2) \sin(\omega l)} e^{-gt} - \right. \\ \left. - \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{f_n}{\alpha^2 + \lambda^2} \lambda \cos(\lambda z) \right] \\ \sigma_z = -\alpha^2 (C + Dz) e^{-\alpha z} \sin(\alpha y) + \\ + E \alpha^2 \alpha_1 \sin(\alpha y) \left[- \frac{b}{\alpha^2} \left(\frac{T_l - T_0}{l} z + T_0 \right) + \right. \\ \left. + \frac{T_0 \text{sh}(l - z) \omega + T_l \text{sh}(\omega z)}{2(\alpha^2 - \omega^2) \text{sh}(\omega l)} e^{gt} + \right. \\ \left. + \frac{T_0 \sin(l - z) \omega + T_l \sin(\omega z)}{2(\alpha^2 + \omega^2) \sin(\omega l)} e^{-gt} - \right. \\ \left. - \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{f_n}{\alpha^2 + \lambda^2} \sin(\lambda z) \right]$$

kjer sta

$$C = E \alpha_1 T_0 \left(-\frac{b}{a^2} + \frac{a^2 \operatorname{ch}(g) + \omega^2 \operatorname{sh}(gt)}{a^4 - \omega^4} \right)$$

$$D = a C - E \alpha_1 \left[\frac{b}{a^2} \left(\frac{T_l - T_0}{l} \right) + \right.$$

$$+ \frac{T_0 \operatorname{ch}(\omega l) - T_l}{2(a^2 - \omega^2) \operatorname{sh}(\omega l)} \omega e^{gt} +$$

$$\left. + \frac{T_0 \cos(\omega l) - T_l}{2(a^2 + \omega^2) \sin(\omega l)} \omega e^{-gt} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_n}{a^2 + \lambda^2} \lambda \right] \quad (16)$$

3.2. Vpliv oksidnega klina na širjenje razpoke

V tem delu nas zanima rast površinskih razpok, zaradi nastanka oksidnega klina v razpoki. Oksid je poln napak, tako da omogoča lahek dostop oksidanta k sveži kovinski površini, s tem pa se razpoka povečuje. V primeru, da se koren razpoke elastično deformira, je njena globina v času t enaka [3]

$$c(t) = \frac{4\mu\gamma}{\pi(1-\nu)\sigma_y^2} \left\{ 1 - \frac{\sigma_y w(t)}{4\gamma} \pm \left[1 - \frac{w(t)\sigma_y}{2\gamma} \right]^{0.5} \right\} \quad (17)$$

kjer so

γ — površinska napetost

$\mu = E/2(1+\nu)$ — strižni modul

$w(t)$ — širina razpoke

Predznak (+) pomeni primer nestabilne razpoke, predznak (—) pa primer stabilne razpoke.

Po določenem času, ki je potreben, da se razpoka zapolni z oksidnim klinom, se začne razpoka širiti s hitrostjo $\dot{C}(t)$

$$\dot{c}(t) = \frac{\mu \dot{w}(t)}{\pi(1-\nu)\sigma_y} \left\{ \left[1 - \frac{w(t)\sigma_y}{2\gamma} \right]^{-0.5} - 1 \right\} \quad (18)$$

Popolnoma nestabilni lom se pojavi tedaj, ko postane hitrost rasti razpoke neskončna. To se zgodi v času, potrebnem za porušitev (t_l), pri pogoju $w(t_l) = 2\gamma/\sigma_y$.

V primeru, ko ni napetosti σ_y zaradi temperaturnih obremenitev, se razpoka lahko širi samo zaradi vpliva oksidnega klina in je enaka

$$c(t) = \frac{\mu w^2(t)}{8\pi\gamma(1-\nu)} \quad (19)$$

Iz izraza (18) je razvidno, da se nestabilni lom ne more pojaviti samo zaradi oksidnega klina, če ni hkrati tudi napetosti σ_y na meji območja (D).

V obravnavanem primeru, ko tlačni bat deluje pri višjih temperaturah, se na konici razpoke pojavlja tudi plastifikacija. V tem primeru lahko uporabimo B. A. Bilby, A. H. Cottrell-Swindenov model [4], ki plastično območje na konici razpoke

določa z dislokacijami [5], ki so kolinearne z razpoko. Plastična deformacija je izražena z Burgersovimi vektorji ($\vec{b}$) dislokacij, ki so v razpoki dolžine c in plastičnem območju velikosti s porazdeljeni linearno. Iz pogoja, da morajo biti vse sile na dislokacijah v ravnotežju in je širina razpoke $w(t)$ na meji območja D, $z=0$ enaka številu dislokacij, pomnoženih z njihovimi Burgersovimi vektorji, je določena zveza med plastičnim območjem $s = a - c$, z rušilno trdnostjo gradiva σ_{zr} in širino razpoke $w(t)$ [3]

$$\frac{\pi \mu w(t)}{4(1-\nu)\sigma_{zr}} = \frac{\sqrt{c(a-c)}}{\sin(\sqrt{c/a})} - \left[\frac{\pi \sigma_y}{2\sigma_{zr}} - \frac{1}{\cos(\sqrt{c/a})} \right] \left[\frac{a}{\sin(\sqrt{c/a})} + \sqrt{c(a-c)} \right] \quad (20)$$

Podobno lahko izrazimo tudi zvezo med širino korena razpoke $\Phi(c)$ v smeri osi y in velikostjo plastičnega območja $s = a - c$

$$\frac{\pi \mu \Phi(c)}{4(1-\nu)\sigma_{zr}} = \frac{\sqrt{c(a-c)}}{\cos(\sqrt{c/a})} + \left[\frac{\pi \sigma_y}{\sigma_{zr}} - \frac{1}{\cos(\sqrt{c/a})} \right] \left[\sqrt{c(a-c)} - \frac{a}{\cos(\sqrt{c/a})} \right] \quad (21)$$

Iz enačb (20) in (21) lahko določimo zvezo med širino razpoke in širino korena razpoke. Za obravnavan primer postavimo, da velja $a - c \ll c$, s tem je širina korena razpoke

$$\Phi(c) = \frac{c(1-\nu)}{4\pi\mu\sigma_{zr}} \left[\frac{\mu}{1-\nu} \tan \theta + \pi \sigma_y \right]^2 \quad (22)$$

kjer pomeni θ — kot klina razpoke.

Funkcija (22) pove, da se širjenje korena razpoke v smeri osi y lahko v določenih razmerah ustavi oziroma zmanjša, če se kot klina θ zmanjša, kar pomeni, da je razpoka v takšnem stanju stabilna.

Ko ni dodatne napetosti zaradi temperaturnih obremenitev, se širina korena razpoke tudi zmanjša in zato razpoka ne more rasti vse dotlej, dokler se širina razpoke $w(t)$ in s tem kot θ zaradi vpliva oksidnega klina dovolj ne poveča in doseže določeno velikost, pri kateri doseže širina korena razpoke kritično velikost $\Phi_c = 2\gamma/\sigma_{zr}$, ki povzroča nestabilno rast razpoke.

Površinska napetost γ je iz [5]

$$\gamma = \frac{\mu |\vec{b}|}{4\pi(1-\nu)} \theta \ln \frac{ae}{2\pi\theta} \quad (23)$$

kjer so

$$a = |\vec{b}|(1-\nu)^{1.5} \frac{1}{d}$$

$|\vec{b}|$ — velikost Burgersovega vektorja

d — razdalja med ravninami drsenja

e — osnova naravnih logaritmov.

3.3. Številčni primer

Za velikostno analizo, ki omogoča primerjavo rezultatov računskega modela s preizkusnimi ugotovitvami, smo izmerili in izbrali naslednje številčne podatke:

$$T_0 = 780 \text{ }^{\circ}\text{C}, T_1 = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}, T_2 = 15 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$E(T_0) \approx \frac{E(T_1)}{2} = 1,05 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$l_s \approx 0,11 \text{ mm}, l_y = 26 \text{ mm}, l = 10 \text{ mm}, b = 2,$$

$$g = 9,528 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$\alpha_T^{-1} = 13,1 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}]^{-1}, \alpha_T^{-2} = 14,3 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}]^{-1}, t_1 = 7 \text{ s}, \sigma_{rz} = 80 \text{ N/mm}^2, \nu = 0,3, \Theta = 0,5^{\circ}, c = 0,1 \text{ } \mu\text{m}$$

Vrednosti za temperaturne razteznostne koeficiente v pozitivnih in negativnih izcejih smo določili iz podatkov za jekla, katerih kemična sestava je bila najbolj podobna koncentracijam legirnih elementov v obeh vrstah izcej.

Gradivo ima rešetko čbc s privzetim približnim parametrom osnovne celice $a_1 = 2,86 \cdot 10^{-4} \text{ } \mu\text{m}$ in velikostjo Burgersovega vektorja

$$|\vec{b}| = \frac{a_1 \sqrt{3}}{2} \text{ in } d = \frac{a_1 \sqrt{2}}{2}$$

Iz prve enačbe (16) je določena največja natezna napetost $\sigma_y = 49 \text{ N/mm}^2$ na meji območja D pri $z = 0$, ki je upoštevana v izrazu (22). V tem primeru je širina korena razpoke $\Phi(c) = 8,6 \cdot 10^{-4} \text{ } \mu\text{m}$. Kritična velikost, pri kateri se pojavlja nestabilno širjenje razpoke, je $\Phi_c = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}$. Ker velja za obravnavani primer $\Phi_c > \Phi(c)$, pomeni, da oksidni klin ne vpliva na nestabilno rast razpoke, kar se tudi sklada z opazovanji.

4. SKLEP

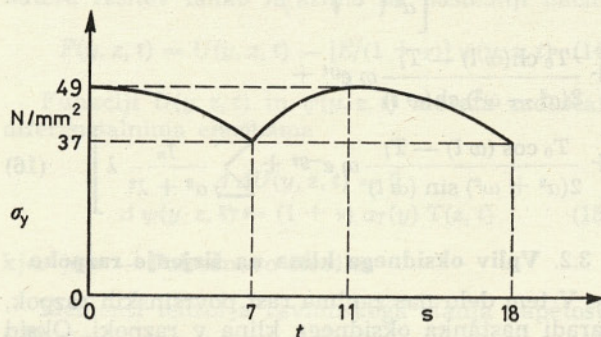
Na pojav toplotnega razpokanja vplivajo zunanji in notranji vzroki.

Med zunanjimi vzroki so najbolj vplivne temperaturne obremenitve, oksidacija in vpliv taline, pri notranjih pa kemične in strukturne nehomogenosti jekla.

Naše raziskave potrjujejo ugotovitve, da je osnovni vzrok za nastanek razpoke temperaturna utrujenost. Razpoke se začno in širijo v področju negativnih izcej, torej tam, kjer ima jeklo najmanjšo trdnost in oksidacijsko odpornost.

Rast razpoke pospešujeta še oksidaciji jekla in obdelovane kovine, ki vplivata na geometrijo korena oksidnega klina. Rezultati računskega modela se ujemajo z eksperimentalnimi ugotovitvami o vlogi kemične nehomogenosti jekla za nastanek in širjenje razpok. Iz podatkov, ki izhajajo iz strokovnih virov [8] in [9], smo za jekla ustreznih kemičnih sestav ocenili za območje s pozitivno izcejo velikost statične zrušilne trdnosti pri temperaturi $T_0 = 780 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{zr}^{+} = 100 \text{ N/mm}^2$ in za območje z negativno izcejo $\sigma_{zr}^{-} = 80 \text{ N/mm}^2$.

Po računskem modelu določene napetosti so v področju negativnih izcej pri $z = 0$ natezne in imajo velikost $\sigma_y = 49 \text{ N/mm}^2$ napetosti σ_z in τ_{yz} pa sta enaki nič. S časom $t_1 = 7 \text{ s}$ pa te napetosti utripajo za $\Delta \sigma_y = \pm 6 \text{ N/mm}^2$ (sl. 17), kar ima za posledico utrujanje jekla.



Sl. 17. Spreminjanje napetosti σ_y na meji območja pri $z = 0$

Iz tega izhaja, da je območje z negativno izcejo mesto najverjetnejšega nastanka utrujenostne razpoke.

V obravnavanem primeru je skupni vpliv temperaturnih napetosti σ_y in kristalnih izcej na pojav razpok največji, ker so temperaturne napetosti pravokotne na smer vlaken izcej. Kadar pa ni tako, se razpoke širijo v smeri pravokotno na smer delovanja temperaturne napetosti σ_y (sl. 8).

Iz analize pojava toplotnega razpokanja sklepamo, da je kemično homogeno jeklo (brez ali z neznatnimi izcejami) odpornejše proti temperaturni utrujenosti, kar govori v prid uporabi jekel, izdelanih po sodobnih postopkih npr. s sintranjem, EPŽ ipd.

LITERATURA

- [1] Kovalenko A. D., Osnovi termouprugosti, Naukova Dumka, Kiev (1970).
- [2] Vidav I., Višja matematika III. Državna založba Slovenije, Ljubljana (1976).
- [3] Heald P. T., The Oxide Wedging of Surface Cracks, Mat. S. E., 35, Lausanne (1978).
- [4] Bilby B. A., Cottrell A. H. and Swinden K. H., Proc. R. Soc. London, Ser. A, 272 (1963).
- [5] Hirth J. P. and Lothe I., Theory of Dislocations, Atomizdat, Moskva (1972).
- [6] Matematičeskie metodi v termomehanike, Zbornik naučnih trudov, Naukova Dumka, Kiev (1980).
- [7] Sneddon I. N., Fourier transforms, McGraw-Hill book company, INC New York, Toronto, London (1958).
- [8] Novikov I. I., Gončarov V. G., Obidalo K. I., Roščupkin V. V., Raskina R. J., Semaško N. A., Plotnost i koeficient Linejnogo razširjenja instrumentalnih stalej povišenoj teplostojkosti. Metall, Izvestija akademii nauk SSSR, Nauka (1978).
- [9] Metals Handbook, vol. 3, ASTM, Ohio (1980).

Naslov avtorjev: — doc. dr. Franc Kosel, dipl. ing.,
Fakulteta za strojništvo
v Ljubljani
— izr. prof. dr. Ladislav Kosec,
dipl. ing., Fakulteta za
naravoslovje in tehnologijo
v Ljubljani