

Mehanizem in morfologija lomov Cr - Mo - V orodnih jekel

UDK: 669.14.018.25:620.178.74:620.184.6

ASM/SLA: TSh, M 21c, M 23p, Q 26, Q 6n

Jože Rodič

Članek daje pregled tematike raziskovalnega projekta trdih orodnih jekel. S tega področja je bilo v preteklih letih že več publikacij, katere ta pregled povezuje. Posebno žilavost trdih orodnih jekel ledeburitnega tipa je pomembna lastnost, ki jo premalo poznamo in obvladamo. Nova kompleksna metodika preizkušanja in predvsem instrumentirano merjenje žilavosti z registriranjem krivulje sila — čas predstavlja pomemben prispevek na področju raziskav mehanizma in morfologije lomov. Prikazana je neposredna povezava z mikrostrukturo, pri čemer klasične metalografske preiskave dopolnjujejo REM in TEM preiskave s prispevkom k metodološkemu razvoju mikrofraktorgrafije značilne skupine orodnih jekel.

V okviru raziskovalno razvojnega projekta (slika 1) smo raziskovali dvanajst vrst ledeburitnih orodnih jekel, razvrščenih v štiri značilne skupine¹. Pri spoznavanju fizikalnih in tehnoloških lastnosti orodnih jekel z visoko vsebnostjo ogljika v sistemu legiranja s kromom, molibdenom in vanadijem je bil aplikativni del raziskav usmerjen k problemom žilavosti dveh značilnih skupin orodnih jekel na osnovi

1,5 % C 12 % Cr 1 % Mo 1 % V
z oznako OCR 12 VM in

1 % C 5 % Cr 1 % Mo 0,25 % V
za oznako OA 2.

Eden od ciljev raziskave je bil tudi razvoj metode za preizkušanje žilavosti trdih orodnih

jekel, ki je uvedena v redno uporabo pod nazivom »METODA ŽR«^{7,8}.

Opravljen raziskovalno delo za potrebe proizvodnje in razvoja kakovosti je nakazalo in omogočilo izhodišča za nadaljnje poglobljene raziskave vplivov kemijske sestave, tehnoloških pogojev izdelave in predelave jekla na tvorbo karbidov, na trdoto in žilavost. Spoznanja in kvantitativne opredelitve teh korelacij so skupaj z vplivi izbranih variacij toplotne obdelave za doseganje značilnih mikrostruktur podprla racionalne študije mehanizma in morfologije prelomnih površin⁸.

Z novo METODO ŽR instrumentiranega preizkušanja žilavosti trdih orodnih jekel je mogoče na adaptiranem Charpyjevem kladivu z ustrezno elektronsko merilno opremo (slika 2) doseči veliko natančnost in zanesljivost registriranja celotnega poteka loma s krivuljo v koordinatah sila — čas.

Princip preizkušanja nazorno prikazuje shema (slika 3). Preizkušanci imajo specifično obliko, ki izpolnjuje vse zahteve kompleksnega preizkušanja⁷ orodnih jekel — ne samo žilavosti (slika 4). Z registriranjem krivulje sila — čas po metodi ŽR^{3,7,8} je dana posebno pomembna možnost ločenja posameznih faz lomne žilavosti. Značilni standardni parametri preizkušanja so začetna in maksimalna sila loma, sili pripadajoči čas in celotno porabljeno delo, ki ga merimo na običajen način pri Charpyjevem poizkusu.

Pri značilnih lastnostih ledeburitnih orodnih jekel ima lomljenje po metodi ŽR precej prednosti v primerjavi s klasičnim (četudi enako instrumentiranim) preizkusom žilavosti po Charpyju⁸. Zaradi pojavov drobljenja jekla ob ostrini

Dr. Jože Rodič, dipl. inž. metalurgije je vodja službe za razvoj tehnologije, izdelkov in metalurške raziskave v železarni Ravne.

RAZISKOVALNO RAZVOJNI PROJEKT R-7221

Železarna Ravne - Metalurški inštitut, Ljubljana - Inštitut Jožef Stefan - Raziskovalna skupnost Slovenije

MOČNO LEGIRANA TRDA ORODNA JEKLA z območjem legiranja

C = 0,8 - 2,1 %	Cr = 4 - 13 %	W = 0 - 6,5 %	Mo = 0 - 5 %	V = 0 - 2 %
-----------------	---------------	---------------	--------------	-------------

DOKUMENTACIJA

- tehnologije
- kontrole
- lastnosti

**RAZVOJ METODIKE, PREIZKUŠANJA IN RAZISKAV****STATISTIČNE ANALIZE IN USMERJENE RAZISKAVE****DISERTACIJA**

- | | | | |
|---|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ◦ standardna tehnologija proizvodnih postopkov ◦ sistemi kontrole in kriteriji atestiranja ◦ trdota - kalilne vrste - popuščna obstojnost ◦ termično utrujanje ◦ volumske spremembe in meroobstojnost ◦ mehanske lastnosti | <ul style="list-style-type: none"> ◦ kompleksno povezane razširjene preizkave s standardnimi metodami ◦ nov način prostorskega prikazovanja kalilnih vrst in popuščnih diagramov ◦ raziskave vplivov časa in ponavljanj popuščanja pri različnih temperaturah ◦ relativne meritve trdote v vročem ◦ metodika metalografskih kontrolnih preizkav ◦ kvantitativna metalografija ◦ magnetoskopske primerjalne meritve zaostalega avstenita ◦ dilatometrija (premenske točke, LTRK, dimenzijske spremembe, TTT - diagrami) ◦ Diferenčno Termične Analize ◦ izolacije faz in mikrokemijske analize izolatov ◦ rentgenske strukturne analize ◦ preizkave z mikrasonda ◦ raziskave REM ◦ raziskave TEM in ED | <ul style="list-style-type: none"> ◦ razvoj optimalnega sortimenta tipiziranih in specialnih vrst orodnih jekel ◦ vplivi kemijske sestave na osnovne lastnosti ◦ vplivi jeklarske tehnologije, vroče in hladne predelave na kakovost ◦ vplivi toplotne obdelave ◦ vplivi makro in mikrostrukture na osnovne lastnosti in uporabnost ◦ razvoj sistema AOP in banke podatkov iz kontrole in raziskav ◦ primerjalne raziskave žilavosti | <p>MEHANIZEM IN MORFOLOGIJA LOMOV Cr-Mo-V ORODNIH JEKEL</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ razvoj metode ŽR instrumentiranega preizkušanja žilavosti trdih orodnih jekel ◦ razvoj metodike in standardnih pogojev komparativnega preizkušanja ◦ raziskava vplivov sestave, oblike, velikosti in razporeda karbidov ter strukture ◦ študij mehanizmov in morfologije lomov ter vplivov mikrostrukture za <ul style="list-style-type: none"> - jeklo 15C - 12Cr 1Mo - 1V - jeklo 1C - 5Cr 1Mo - Q2V |
|---|---|---|---|

Slika 1

Vsebina raziskovalno razvojnega projekta

Fig. 1

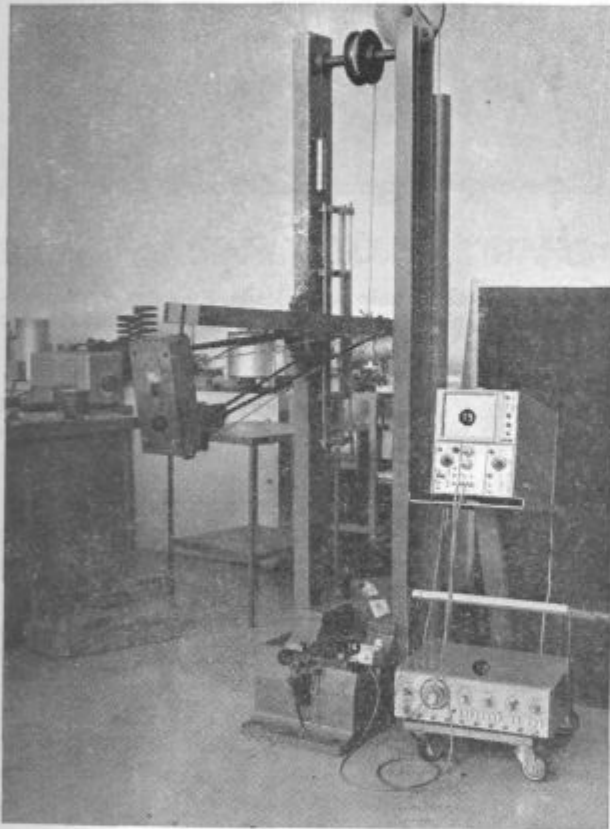
Content of the research and development project

kladiva pri udarcu in zaradi nekaj drugih pojavov med potekom loma po Charpyjevi metodi večkrat ne dobimo realnih rezultatov, čeprav je s fizikalnega stališča ta preizkus pravilnejši in doslednejše izpolnjuje osnovne zahteve standardov (slika 5).

Zaradi spremljajočih pojavov, ki so značilni za obravnavano skupino orodnih jekel, je tudi selektivnost ter reproducibilnost preizkusov po metodi ŽR očitno boljša.

V odvisnosti od strukture in prisotnosti karbidov so ugotovljene določene zakonitosti v obli-

ki krivulje sila — čas in velike razlike izmerjene maksimalne sile loma. Velike razlike ugotovljenih časov loma od 140 do 1220 mikro sekund je mogoče neposredno povezovati z morfologijo prelomnih površin in z značilnostmi mikrostrukture, opredeljene že s klasično metalografijo pri povečavah do $500\times$, še posebej pa s fraktografijo na rasterskem elektronskem mikroskopu pri povečavah do 10.000-krat. Zelo pomembne vplive popuščnih efektov na žilavost smo v ožjih temperaturnih območjih še z rastersko elektronsko mikroskopijo komaj opredelili s spremembami mikrostrukture. Izkazalo se je, da so za identifikacijo teh pojavov neizogibno potrebne preiskave s transmisijsko elektronsko mikroskopijo⁵. S transmisijsko elektronsko mikroskopijo nam je uspelo identificirati nekaj odločilnih efektov popuščanja. Napake v mikrostrukturi, ki so posledica predhodne vroče predelave, smo lahko



Slika 2

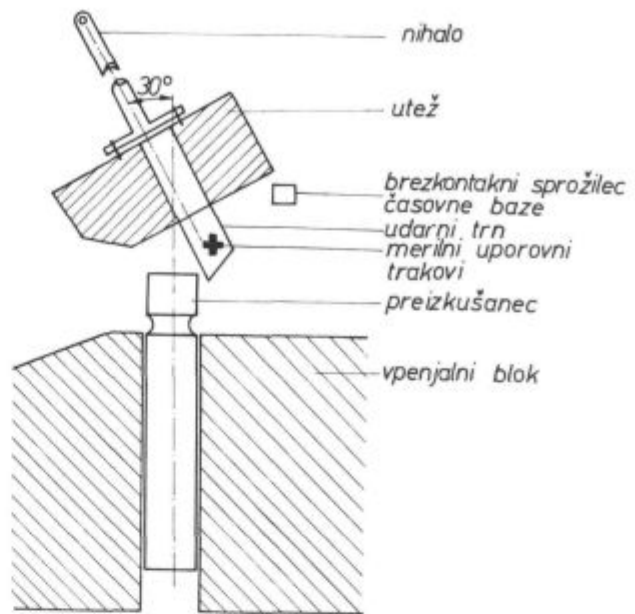
Naprava za preizkušanje žilavosti po metodi ZR

1 — Utež kladiva z udarnim trnom, 2 — Vpenjalni blok s preizkušancem, 3 — Merilni komplet z osciloskopom, 4 — Prožilec časovne baze z zakasnitvijo, 5 — Generator pravokotnih impulzov za označevanje časovnih presledkov

Fig. 2

Toughness testing machine by the ZR method

1 — hammer weight with impact rod
2 — clamping device with the probe
3 — measuring equipment with oscilloscope
4 — lag timer
5 — generator of rectangular impulses for marking time intervals

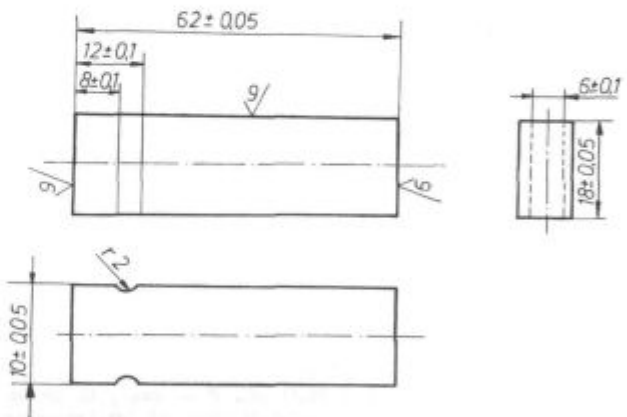


Slika 3

Shema instrumentiranega preizkušanja žilavosti po metodi ZR

Fig. 3

Scheme of instrumented toughness testing by the ZR method



Slika 4

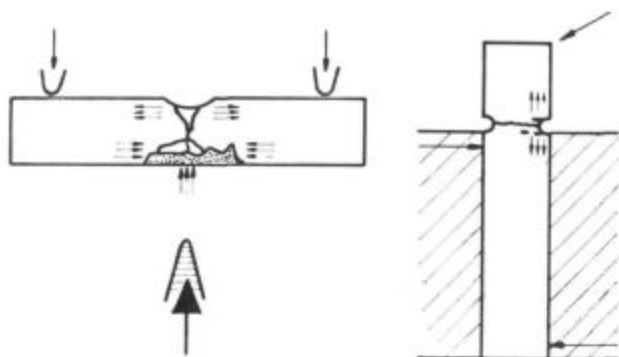
Probe za preizkušanje žilavosti po metodi ZR

Fig. 4

Probes for toughness tests by the ZR method

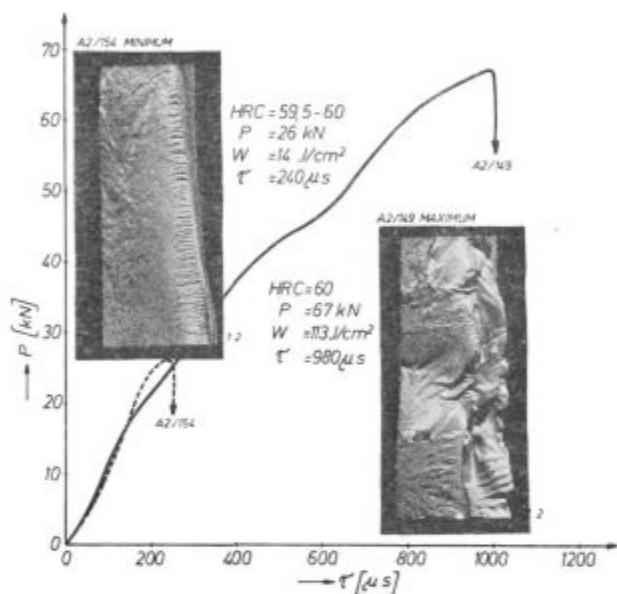
opredelili že s klasično metalografijo. Določene nepravilnosti režima kovanja imajo katastrofalne posledice na žilavost, čeprav po videzu mikrostrukture, kakršen je bil dosledno večkrat dokazan, ne bi pričakovali take teže posledic⁸.

Pravkar omenjene ugotovitve ilustrira nekaj izbranih primerov primerjave minimalne in maksimalne žilavosti jekla OA 2 (sliki 6 in 7) v okviru specifičnih skupin enake toplotne obdelave, pri čemer pomeni NKNP nizko kaljeno in nizko popuščano, PKNP pa pravilno kaljeno in nizko popuščano jeklo. Ta sistem označevanja kombinacij toplotne obdelave⁸ bomo še srečali, pri



Slika 5
Skica lomnega mehanizma

Slika 5
Skica lomnega mehanizma
Fig. 5
Sketch of the breaking mechanism



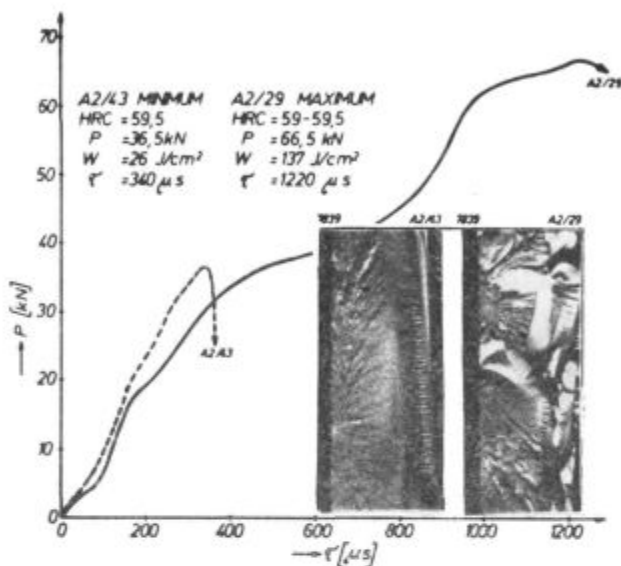
Slika 6
Primerjava registriranih krivulj sila P — čas τ in prelomov za dva preizkušanca z minimalno oz. maksimalno žilavostjo v skupini NKNP jekla Č. 4756 — OA 2

Fig. 6
Comparison of registered force P — time τ curves and fractures for two probes with minimal or maximal toughness in the PKNP group of Č. 4756 — OA 2 steel

čemer bo oznaka VK pomenila visoko temperaturo kaljenja, oznaka VP pa visoko temperaturo popuščanja. Vse raziskovane kombinacije prikazujejo povprečne krivulje žilavosti za jeklo OCR 12 VM (slika 8), ki se bistveno razlikujejo od krivulj za jeklo OA 2.

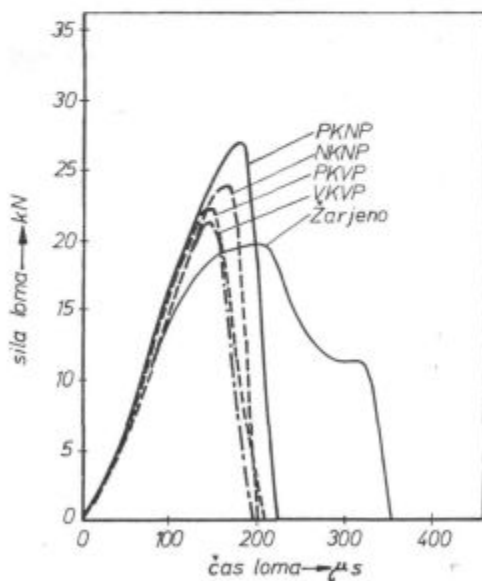
Kaljivost teh jekel in njihovo popuščno obstojnost v okviru kompleksne metodike preizkušanja trdih orodnih jekel zelo nazorno prikazujejo novi prostorski prikazi trdot in zrnatosti prelomov po Shepherdu v odvisnosti od temperature kaljenja in temperature popuščanja v raz-

širjenem območju preizkušanja². Lastnosti trdih orodnih jekel ledeburitnega tipa lahko ozko povežemo s TTT diagrami in rezultati rentgenskih analiz vsebnosti zaostalega avstenita in karbidov^{1, 3, 4, 7, 8}. Pri tem ima pomemben vpliv stopnja neenakomernosti karbidnih izcejev, pogojena s strjevanjem po litju in s predelavo v vročem^{1, 6}, in velikost ter oblika karbidov.

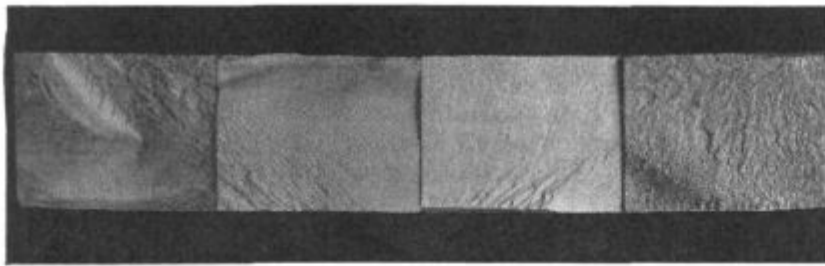


Slika 7
Primerjava registriranih krivulj sila P — čas τ in prelomov za dva preizkušanca z minimalno oz. maksimalno žilavostjo v skupini PKNP jekla Č. 4756 — OA 2

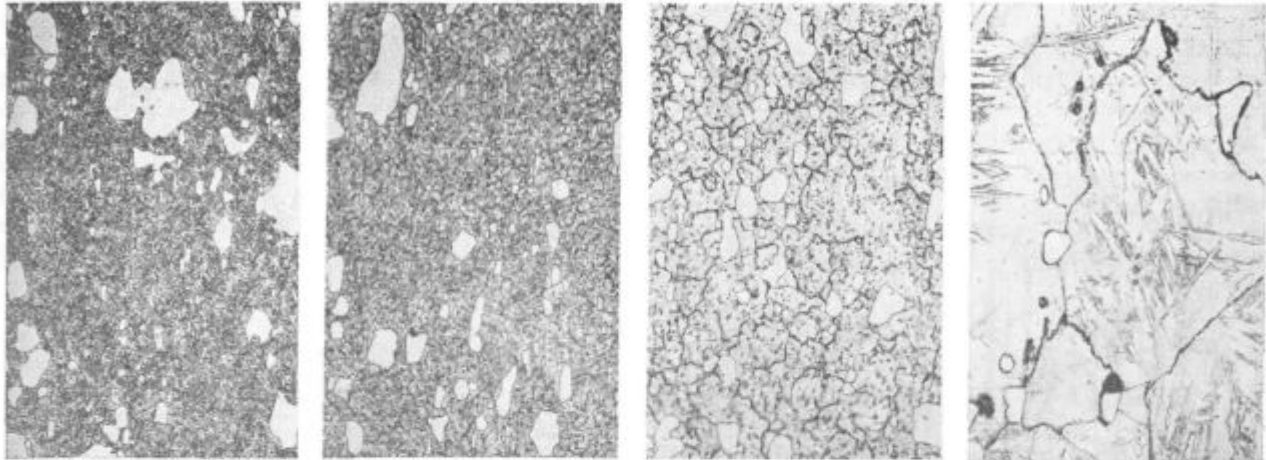
Fig. 7
Comparison of registered force P — time τ curves and fractures for two probes with minimal or maximal toughness in the NKNP group of Č. 4756 — OA 2 steel



Slika 8
Poprečne krivulje žilavosti za jeklo Č. 4850 — OCR 12 VM
Fig. 8
Mean toughness curves for Č. 4850 — OCR 12 VM steel



0,04mm



900°C 51HRC 1000°C 61HRC 1080°C 63HRC 1240°C 35HRC

Slika 9

Vpliv temperature kaljenja na mikrostrukturo jekla Č. 4850
— OCR 12 VM

Fig. 9

Influence of the quenching temperature on the microstructure of Č. 4850 — OCR 12 VM steel

Nekaj primerov značilnih mikrostruktur jekla Č. 4850 — OCR 12 VM po kaljenju na zraku z različnih temperatur avstenitizacije kaže slika 9.

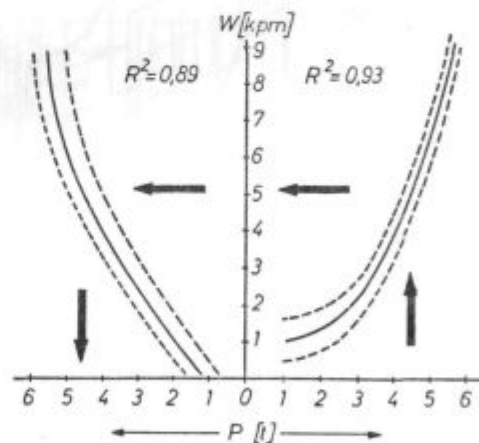
Karbidotvorni legirni elementi Cr, W, Mo in V v odnosu do vsebnosti ogljika zelo izrazito izražajo svoje vplive na trdoto po kaljenju in popuščanju. Bistvene so razlike v nagnjenosti k pregretju pri kaljenju, pa tudi v popuščni obstojnosti, kar smo posebej raziskovali s serijo eksperimentalnih šarž za študij vplivov posameznih elementov in njihovih kombinacij^{7,8}.

Pri normalnih pogojih toplotne obdelave ugotavljamo dokaj očitno zvezo med trdoto in žilavostjo^{5,8}, izraženo s tremi parametri:

- maksimalno silo loma P ,
- časom loma τ in
- porabljenim delom W .

Ti parametri so povezani z izredno visokimi koeficienti korelacije, oz. determinacije, če korelacije omejimo na statistično dovoljene variacije vplivnih faktorjev (slika 10).

Raziskave v razširjenem področju variacij toplotne obdelave so dokazale, da pri raziskovanih



Slika 10

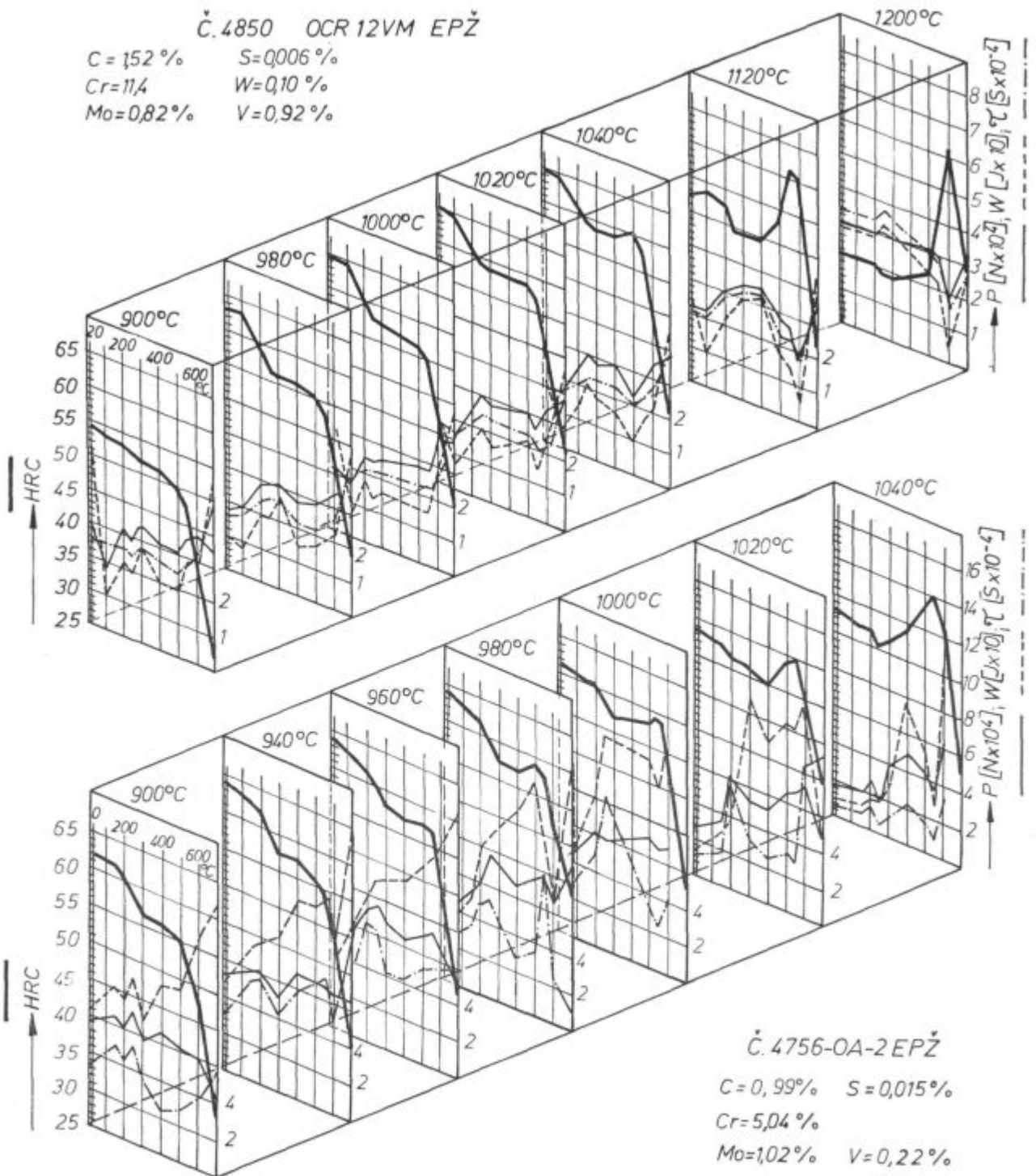
Korelacija med silo loma P in porabljenim delom W pri preizkušanju žilavosti v popuščenem stanju po metodi Zelezarne Ravne

Fig. 10

Correlation between the breaking force P and the absorbed energy W in toughness testing as tempered probes by the ZR method

orodnih jeklih nikakor ne velja zakonitost, ki je splošno veljavna pri mnogih vrstah konstrukcijskih jekel, da je visoka žilavost neposredno po-

gojena z nižjo trdoto jekla. To velja tudi za vrsto drugih orodnih jekel, posebno tistih z visoko vsebnostjo ogljika in močno legiranih, saj je



Slika 11
Trdota in žilavost jekel Č. 4850 — OCR 12 VM in Č. 4756 — OA 2 v odvisnosti od temperature kaljenja na zraku in popušanja

Fig. 11
Hardness and toughness of Č. 4850 — OCR 12 VM and Č. 4756 — OA 2 steels depending on the quenching temperature in air and on the tempering

odvisnost tehnološko poznana in je bila pri teh raziskavah le potrjena in dokazana z identificiranimi vplivi.

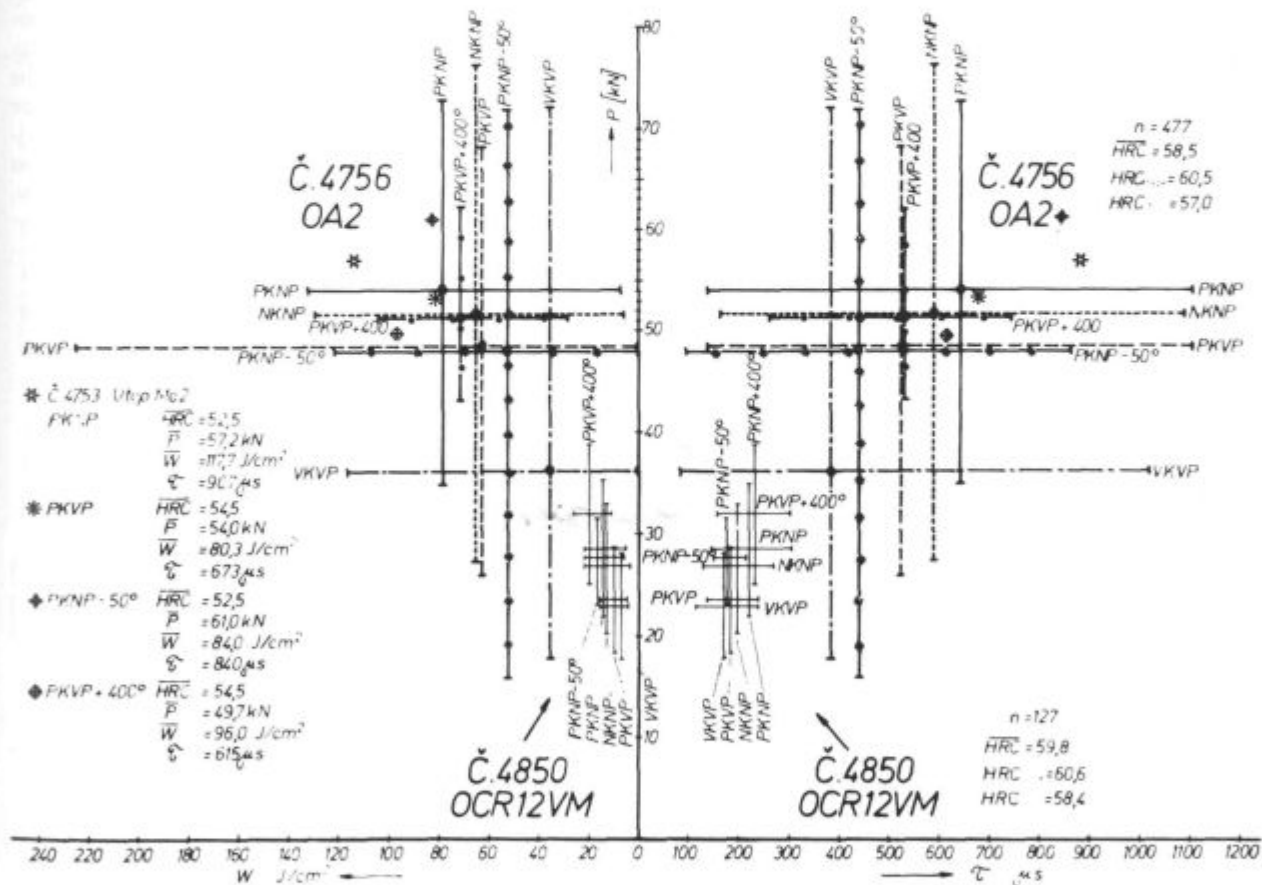
Rezultati kompleksnega preizkušanja z metodo ŽR so prikazani s prostorskimi modeli. Zanimiva je primerjava jekel OCR 12 VM in OA 2 na sliki 11.

Ob primerjavi žilavosti jekel OCR 12 VM in OA 2 moramo upoštevati, da je pri jeklu OA 2 zmanjšano merilo desnih ordinat za žilavost v razmerju 1:2. Žilavost jekla OA 2 je namreč pri enaki trdoti mnogo boljša; če pa bi primerjali odpornost proti obrabi, bi imelo pomembno prednost jeklo OCR 12 VM z veliko vsebnostjo karbidov, ki so nosilci te lastnosti. Obe vrsti orodnih jekel predstavljata vrhunec dosedanjega razvoja standardnih jekel na določenem področju specifične uporabe. Obe sta dokaj široko uporabljani, vsako od obeh jekel pa ima svoje značilnosti, ki jih je treba čimbolje poznati.

Ena od najpomembnejših lastnosti je prav gotovo žilavost pri zahtevani delovni trdoti. Zato so prikazana statistična območja žilavosti za posamezne kombinacije kaljenja in popuščanja, ki omogočajo enake trdote v koordinatah SILA — DELO — ČAS! (Slika 12).

Tak prikaz je kot rezultat velikoserijskega statistično planiranega preizkušanja zelo pomemben za objektivno in kvantitativno opredelitev področja uporabnosti jekla in za optimiranje toplotne obdelave. Obenem je to nov pristop k izbiri jekel, ki vodi tudi k tipizaciji asortimentov v proizvodnih programih in predstavlja objektivne kriterije za oceno ali kontrolo kakovosti in nudi izhodišča za razvoj kakovosti in zanesljivosti.

Moderne možnosti računalništva z bankami podatkov, sistemi statističnih obdelav in procesnimi računalniki v proizvodnji šele v zadnjih letih omogočajo realizacijo že dolgo poznanih principov integralnega krmiljenja kakovosti ter



Slika 12

Statistična območja žilavosti za posamezne kombinacije kaljenja in popuščanja jekel Č. 4756 — OA 2 in Č. 4850 — OCR 12 VM (za primerjavo še Č. 4753 — UTOP Mo 2) v koordinatah SILA — P, ČAS — τ in DELO — W.

NKNP — nizko kaljeno, nizko popuščano; PKNP — pravilno kaljeno, nizko popuščano (— 50° preizkušano v hladnem); PKVP — pravilno kaljeno, visoko popuščano (+ 400° preizkušano v vročem); VKVP — visoko kaljeno, visoko popuščano

Fig. 12

Statistical range of toughnesses for single combinations of quenching and tempering Č. 4756 — OA and Č. 4850 — OCR 12 VM steels (for comparison still Č. 4753 — UTOP Mo 2 steel) in the force P, time τ , and energy W coordinates.

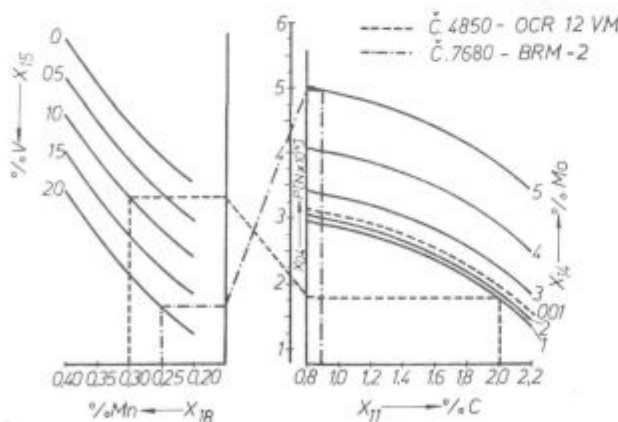
NKNP — low quenched, low tempered
PKNP — correct quenched, low tempered (— 50° cold tested)
PKVP — correct quenched, high tempered (+ 400° hot tested)
VKVP — high quenched, high tempered

informativskih sistemov. Prav to odpira vrata neslutnemu razvoju metalurške tehnologije, novih proizvodov in kakovosti. Začenja se tekma, v kateri bodo nepripravljeni tako zaostali, da bodo težko ujeli korak napredka.

Ta razmišljanja prav gotovo daleč presegajo okvir obravnave in jih ne moremo naprej izvajati, ne moremo pa povsem mimo njih, ko utemeljujemo vsebino in pristop k raziskavam. Dosedanje izkušnje železarne Ravne predstavljajo veliko spodbudo k nadaljnjemu delu.

V celotnem območju variacij kemijske sestave raziskovanih jekel, ki je bilo prikazano na sliki 1, smo ugotovili ob tehnološko in statistično logičnih omejitvah zelo dobro kontinuiteto korelacij, kar omogoča spoznavanje določenih zakonitosti in povezovanje številnih vrst jekel v enoten sistem. Le za ilustracijo prikazuje naslednji nomogram (slika 13) primer ugotovljenih vplivov C, Mn, Mo in V v jeklu na žilavost. Na ta način smo odkrili območje posebne toplotne obdelave, ki daje brzoreznemu jeklu presenetljivo visoko žilavost, kar je ob njegovi poznani odpornosti proti obrabi in rezilnosti neprecenljivega pomena.

Žilavost je v ožjih območjih variacij toplotne obdelave predvsem funkcija izoblikovanja in količinskih razmerij strukturnih komponent. Pod vplivov toplotne obdelave je za žilavost odločilnega pomena tudi prisotnost nekaterih strukturnih komponent. Tako je pri jeklu z 1 % C, 5 % Cr in 1 % Mo z elektronskim uklonom dokazana prisotnost posameznih izločkov cementitnega tipa v obliki lokalnih koncentracij^{5,8}. Pri maksimalni žilavosti tega jekla je pa ugotovljena strukturna posebnost, da je martenzit prisoten v obliki ploščic, da so te ploščice relativno majhne in po obliki bolj ovalne kot podolgovate. Meje med njimi so zabrisane, opazna pa je prisotnost transformacijskih dvojčkov. Ugotovljeno je, da šele



Slika 13

Vpliv kemijske sestave na maksimalno silo loma prob popuščanih na 400–700° C z omejitvijo trdote min. 40 HRC

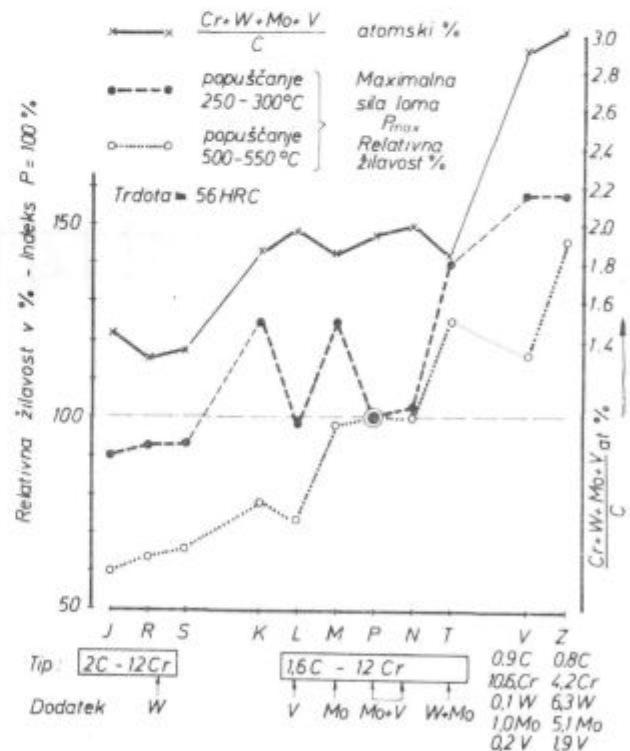
Fig. 13

Influence of chemical composition on the maximal breaking force for probes tempered at 400 to 700° C with limited hardness min. 40 HRC

prisotnost karbidov cementitnega tipa povzroči znižanje žilavosti jekla.

Pri ledeburitnih orodnih jeklih je presenetljiva, a s kvantitativno metalografijo utemeljena ugotovitev, da v normalnem območju žilavost tudi ni toliko funkcija povprečne porazdelitve in velikosti karbidov, kakor precej nedokumentirano navaja večina literaturnih virov tega področja. V območju trdot orodij za delo v hladnem je bolj funkcija kombinacije prisotnih elementov in predvsem razmerja vsote vseh karbidotvornih elementov proti ogljiku, seveda ob značilni mikrostrukturi v odvisnosti od pogojev toplotne obdelave — pri čemer so izvzete posledice nepravilne vroče predelave.

Na sliki 14 je enajst raziskovalnih ledeburitnih jekel razvrščenih po sestavi¹ v značilne skupine. Zveza med razmerjem atomskih odstotkov karbidotvornih elementov in ogljika ter žilavostjo je očitna. Čim večji je tak kvocient, tem večja je žilavost. Obenem pa iz te slike izhaja zelo pomembna ugotovitev, da ta jekla dosežejo pri nizki temperaturi popuščanja ob enakih ali celo višjih trdotah boljšo žilavost kot pri popuščanju v območju višjih temperatur. Zal te izredno pomembne ter povsem nove ugotovitve prav pri nekaterih najpomembnejših orodjih v praksi ni mogoče vedno izkoristiti iz čisto praktičnih tehnoloških razlogov.



Slika 14

Primerjava žilavosti in razmerja karbidotvornih elementov z ogljikom

Fig. 14

Comparison of the toughness and the carbide-forming elements/carbon ratio

Zanimiva je ugotovitev na področju vplivov karbidotvornih legirnih elementov v ledeburitnih orodnih jeklih, da je popuščna obstojnost neposredno povezana z atomskim razmerjem $Cr : (W + Mo + V)$, kar je bilo po ugotovitvi potrjeno tudi z analizo velikoserijskih kontrolnih meritev⁸. K tej osnovni ugotovitvi je bilo z multikorelacijsko analizo pojasnjenih še nekaj specifičnih ponašanj teh jekel v odvisnosti od dodatkov vanadija in molibdena ter njihovih vplivov na delež zaostalega avstenita.

Obsežne raziskave so ponudile možnost prispevkov k metodološkemu razvoju mikrofrakto-grafskih raziskav na specifičnem področju raziskovanih orodnih jekel.

Na osnovi poznanih publikacij o kategorizaciji lomov smo poskušali nova spoznanja specifičnih značilnosti orodnih jekel strniti v primerno sistematiko in vrste lomov povezati z značilnimi mehanizmi in morfologijo lomov raziskovanih jekel.

Ob sliki 15, ki tako daje osnovna izhodišča za kategorizacijo lomov, je treba pripomniti, da

je pri krhkem lomu namenoma prikazan namesto tipičnega razkolnega loma intergranularni krhki lom, ker se ta posebno pri ledeburitnih orodnih jeklih zelo pogosto pojavlja.

Glede na pot loma (transgranularni ter intergranularni) in značilne vrste lomov kaže naslednji shematični pregled (slika 16) morfološke značilnosti, ki odločajo o mehanizmih lomov. Le nekatere od teh kombinacij se pri orodnih jeklih pogosteje pojavljajo. To so:

- pri žilavih transgranularnih lomih: nastanek in združevanje mikropraznin v satovje jamic;
- pri mešanih transgranularnih lomih: raztržni robovi, grebeni in pobočja jamic;
- pri duktilnih intergranularnih lomih: mešani duktilni lom s satovjem jamic in z intergranularnimi področji;
- pri krhkih intergranularnih lomih: lomi po mejah zrn brez deformacij, katastrofalna krhkost, karbidi po mejah, obložene meje;
- zelo pogosto se pojavljajo kvazirazkolni ali rozetni lomi.

KATEGORIZACIJA LOMOV

Osnove klasificiranja

• Pot loma

- transgranularni
- intergranularni

• Lomni mehanizem

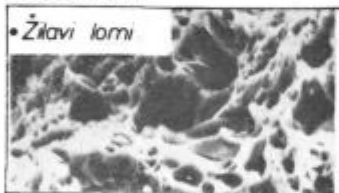
- nastanek in združevanje mikropraznin
- nastanek raztržnih robov, grebenov in pobočij
- razkol in cepljenje
- utrujanje

• Oblika lomne površine

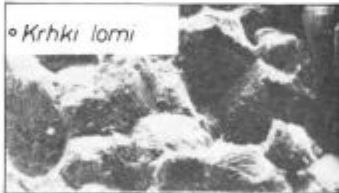
- satovje, jamice
- raztržni robovi, grebeni in pobočja
- razkolne ploskve, rečni vzorci, jeziki, mikrovdajčki
- utrujenostne brazde

Vrste lomov

• Žilavi lomi



• Krhki lomi



• Mešani lomi



• Lomi sukcesivnih mehanizmov (lokalno čisti tipični)



Vplivi na mehanizem in morfologijo loma:

- Napetostno stanje
- Hitrost spreminjanja napetostnega stanja
- Načini učinkovanja
 - statično
 - dinamično
- Temperatura in temperature spremembe
- Okoliščine (korozija, obsevanje)
- Čas
- Mikrostruktura zgradba

Slika 15

Kategorizacija lomov

Fig. 15

Specification of fractures

VRSTE LOMOV IN ZNAČILNOSTI LOMNIH MECHANIZMOV



Lomi kombiniranih (mešanih, ne sukcesivnih čistih) mehanizmov



Slika 16

Vrste lomov in značilnosti lomnih mehanizmov

Fig. 16

Fracture types and characteristics of fracture mechanisms

Med lomi kombiniranih mehanizmov so najpogostejše naslednje kombinacije:

— žilavi lomi: združevanje mikropraznin v kombinaciji z raztržnimi robovi in pobočji,

— mešani lomi:

= razkolni lom v kombinaciji z združevanjem mikropraznin,

= razkolni lom v kombinaciji z raztržnimi robovi in pobočji,

= združevanje mikropraznin v kombinaciji z intergranularnim lomom.

— krhki lomi: razkolni lom v kombinaciji z intergranularnim lomom.

Zbrali smo obilo zanimivih značilnih primerov za ilustracijo morfologije v zvezi z mehanizmi lomov, vendar bi podrobnejše opisovanje na tem mestu motilo pregled. Poglejmo le nekaj posamičnih zanimivejših ugotovitev:⁸

— Morfologija lomov je neposredno povezana z mikrostrukturo. Karbidi, izločeni po mejah zrn, dvojčkih in posebnih ploskvah mikrostrukturne zgradbe vplivajo na potek loma, še veliko bolj, kot bi pričakovali po dosedanjih izkušnjah.

— Iniciali notranjih razpok so grobi karbidi, ki se lomijo in drobijo. Zlomljeni karbid predstavlja inicial za notranjo mikro razpoko, ki se v odvisnosti od kohezije kristalne meje lahko ob tej zaustavi. Lom se širi interkristalno ali intrakristalno, samo konfiguracijo prelomne ploskve pa določa mehanizem iztrgavanja karbidov, iz bolj ali manj žilave osnove. Deformacijski pas ima poprečno ocenjeno širino, ki ustreza dva do trikratnemu premeru jamice, to je ležišča karbida.

— Deformacijski pas je funkcija velikosti in karakterja karbidov ter trdnosti osnovne matice. Optimalna je prisotnost bainita. Iz tega sledi, da je sam lomni mehanizem pri ledeburitnih orodnih jeklih odvisen od načina toplotne obdelave in s tem se menja tudi karakter loma.

Pri ledeburitnem orodnem jeklu s tipično sestavo 1,5 % C, 12 % Cr, 1 % Mo in 1 % V je prisotno 90 % karbidov tipa M_7C_3 , relativno grobih s heksagonalno strukturo, ki se med toplotno obdelavo bistveno ne spremenijo. Nasprotno pa so prisotni pri jeklu z 1 % C, 5 % Cr in 1 % Mo izredno fini kompleksni karbidi tipa M_7C_3 in 20 do 50 % karbidov $M_{23}C_6$, kar v odvisnosti od toplotne obdelave daje optimalno žilavost temu jeklu.

Pri obravnavanih raziskavah je bila pri nas prvič na področju identifikacije strukturnih procesov v visoko legiranih orodnih jeklih uvedena povezana uporaba rastrske elektronske mikroskopije, transmisijske elektronske mikroskopije in preiskav z elektronskim mikroanalizatorjem — mikrosondo. S sistematičnim povezovanjem teh raziskovalnih metod je dan odgovor na vprašanje, kaj pomeni rastrska in transmisijska elektronska mikroskopija v primerjavi z optičnim mikroskopom pri raziskavah orodnih jekel. Analize na elektronskem mikroanalizatorju in rentgenska difraktometrija strukturnih faz na kompaktnih vzorcih ter analize predhodno izoliranih karbidov predstavljajo pomembno dopolnitev te kombinacije metalografskih metod.

V pogledu metodologije lahko na osnovi rezultatov utemeljemo:

— da optične metalografije niti pri raziskavah niti pri kontroli orodnih jekel ne moremo pogrešati, ker predstavljajo metalografske ugotovitve najpristopnejši in odločilni kriterij za oceno kakovosti, oz. osnovnih karakteristik teh jekel,

— da je rastrska elektronska mikroskopija dejansko metoda, ki dopolnjuje optično mikroskopijo tako na prelomnih ploskvah kot na metalografskih obrusih, da pa je ločljivost tudi pri tej metodologiji omejena na identifikacijo strukturnih komponent, velikosti 5 nm, pri znanstvenem pristopu s posebnimi možnostmi in do 20 nm v praksi pri rutinskih preiskavah. Najbolj uporabna je povečava v območju 500—5000 \times , medtem ko povečave nad 10.000 \times kljub vložnemu

trudu ne dajejo pomembnega prispevka k identifikaciji struktur,

— da je transmisijska elektronska mikroskopija še vedno metoda, ki omogoča zasledovanje najbolj delikatnih strukturnih pojavov v jeklu, ki nastopajo pri kaljenju in popuščanju ter že pri nizkih temperaturah vplivajo na tehnološke lastnosti jekla, predvsem pa na žilavost. Delo z replikami pri TEM fraktografiji ima še vedno velik znanstveni pomen, posebno pri ugotavljanju inicialov loma v globokih jamicah satovja mikropraznin in pri identifikaciji drugih pojavov, ki so pri REM večkrat zakriti zaradi specifičnosti eksperimentalne tehnike;

— da analize z elektronskim mikroanalizatorjem prispevajo k spoznavanju mikrosegregacij, delno tudi k identifikaciji večjih karbidov, da pa je pojasnjevanje popuščnih efektov z izločanjem zunaj možnosti analiziranja z mikrosondo;

— da nam preiskave z rentgensko difrakcijo precej pripomorejo k ugotavljanju kvantitativnih deležev strukturnih faz, pri čemer je posebnega pomena poznavanje količinskih deležev in strukture karbidov, ki jih moramo poznati tudi za natančnejše določanje drugih strukturnih deležev. Zato smo v okviru raziskav omenjenega projekta s posebnimi nalogami izvršili sistematične in obsežne analize karbidnih izolatov, ker nam ti rezultati lahko trajno služijo za vnašanje korektur pri izračunih strukturnih deležev.

V okviru ocene rezultatov ni mogoče mimo ocene metodologije dela, ki je pokazala, da le kombinirana vsestranska metodologija strukturnih raziskav lahko obrazloži zapletene strukturne pojave in povezavo le-teh s tehnološkimi lastnostmi jekla.

Literatura:

1. Rodič J.: Praktične izkušnje pri raziskavah ledeburitnih orodnih jekel z uporabo kvantitativne metalografije, Zelezarski zbornik 9 (1975) št. 4., str. 217—238.
2. Rodič J.: Popuščni diagrami ledeburitnih orodnih jekel v razširjenem območju, Zelezarski zbornik 10 (1976) št. 1, str. 47—50.
3. Rodič J.: Uporaba rastrske elektronske mikroskopije pri raziskavah ledeburitnih orodnih jekel, Zelezarski zbornik 10 (1976) št. 3, str. 125—144.
4. Rodič J., F. Vodopivec, B. Ralič: Preiskave jekla C. 4850 — OCR 12 VM na elektronskem mikroanalizatorju, Zelezarski zbornik 10 (1976) št. 3, str. 145—156.
5. Krašovec V., J. Rodič: TEM raziskave popuščnih efektov orodnega jekla C. 4850 — OCR 12 VM, Zelezarski zbornik 11 (1977) št. 2, str. 103—111.
6. Rodič J., A. Rodič: Izkušnje s homogenizacijo brzoreznilnih jekel, Zelezarski zbornik 11 (1977) št. 4, str. 169—181.
7. Rodič J.: Razvoj orodnih jekel, Zelezarski zbornik 12 (1978) št. 4, str. 119—135.
8. Rodič J.: Mehanizem in morfologija lomov Cr-Mo-V orodnih jekel, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, maja 1978.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel wird eine Übersicht über die Thematik des Forschungsprojektes der Werkzeugstähle mit einem breiten Analysengrenzenbereich und zwar von 0.8 bis 2.1 % C, 4 bis 13 % Cr, bis 6.5 % W, bis 5 % Mo und bis 5 % V gegeben.

Es werden so unmittelbar die angewendeten Literaturreferenzen miteinander verbunden und ergänzt.

Hoch betont werden die Untersuchungen der Zähigkeit der harten Werkzeugstähle. Die »ZR Messmethode« der Kerbschlagzähigkeitsuntersuchung mit der Registrierung der Kurve Kraft — Zeit am adaptierten Charpy-Hammer wird kurz beschrieben.

Die im Werk standardisierte Methodik der komplexen Prüfung der harten Werkzeugstähle hat zu einem bedeutenden Fortschritt auf dem Gebiet der Untersuchung des Bruchmechanismuses und der Bruchmorphologie beigetragen. Dabei ist die klassische Metallographie durch die REM und TEM Untersuchungen ergänzt worden. Auch ein Beitrag zu der methodologischen Entwicklung der

Mikrofraktographie einer kennzeichnenden Gruppe der Werkzeugstähle wird angegeben.

Im Rahmen dieses Projektes sind bedeutende Korrelationen zwischen der Härte dem Mikrogefüge und der Zähigkeitsparametern (maximalen Bruchkraft, der Bruchzeit und der dazu benötigten Arbeit) festgestellt worden.

Die statistischen Bereiche der Zähigkeitsparametern für die bezeichnenden Kombinationen der Abschrecktemperatur, der Anlass und der Prüfungstemperatur, bei der Beschränkung der minimalen Gebrauchshärte der Werkzeuge werden angegeben.

Interessant sind die Feststellungen in Verbindung mit dem Einfluss der Karbide und der chemischen Stahlzusammensetzung auf die Kerbschlagzähigkeit. Besonders augenfällig ist der Einfluss des Verhältnisses der Atomprozente der Karbidbildenden Elemente und des Kohlenstoffes auf die Kerbschlagzähigkeit. Die Anlassbeständigkeit der ledeburitischen Werkzeugstähle ist unmittelbar mit dem Atomverhältnis Cr : (W + Mo + V) verbunden.

SUMMARY

Paper presents the review of the research project on tool steel with wide ranges of compositions: 0.8 to 2.1 % C, 4 to 13 % Cr, up to 6.5 % W, up to 5 % Mo, and up to 5 % V. Thus it directly combines and supplements the cited references.

A special emphasis is given to the toughness investigations of hard tool steel. The »ZR method« of instrumented testing with registering force — time curve on an adapted Charpy testing machine is shortly described.

Internally standardized methodics of the complex testing of hard tool steel enabled significant contribution to investigations of the mechanism and morphology of fractures. Standard metallography is thus complemented with the SEM and TEM investigations. Also the contribution to the methodological development of the microfractography of characteristic tool steel group is given.

The project gives significant correlations between the hardness, the microstructure and the toughness parameters (maximal breaking force, breaking time and absorbed energy).

Statistical ranges of toughness parameters for characteristic combinations of quenching temperatures, tempering temperatures and testing with limited minimal applied tool hardness are given.

Interested are the findings connected with the influence of carbides and the chemical composition of steel on the toughness. Especially evident is the influence of the ratio between the atomic percentage of carbide-forming elements and the carbon on the steel toughness. Tempering resistance of ledeburite tool steel is directly connected with the Cr/W + Mo + V atomic ratio.

Author's Abstract

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье дан обзор тематики исследовательского проекта инструментальных сталей с широким диапазоном содержания.

Таким образом выполнена непосредственная связь и дополнение к рекомендациям, которые упомянуты в специальной приведенной в дополнении литературе.

В особенности подчеркнута исследование вязкости твердых инструментальных сталей. Коротко описан »метод ЖР«, подтвержденный с регистрированием кривой усилия в отношении на время, утраченное при выполнении испытания на приспособленном маятниковом копке по Шарпи.

Стандартизованная внутри завода методика комплексного испытания твердых инструментальных сталей дала возможность выполнить важный дополнительный вклад в области исследования механизма и морфологии изломов. При этом классическая металлография дополнена с испытанием с РЕМ и ТЕМ методами.

Рассмотрен также вклад к методологическому развитию микрофрактографии значительной группы инструментальных сталей.

В соответствии с программой проекта определена важная корреляция между твердостью, микроструктурой и параметрами вязкости (наибольшее усилие излома, время излома и время, утраченное для выполнения работы). Рассмотрены также статистические области параметров вязкости для значительных комбинаций температуры закалки, отпуска и испытания при ограничении наименьшей твердости, примененного инструмента.

Не без интереса также определены в связи с влиянием карбидов и химического состава стали на вязкость. Особенно выразительно влияние соотношения атомистической процентной ставки карбидообразующих элементов и углерода на вязкость.

Устойчивость же ледеburитных инструментальных сталей на отпуск в непосредственной связи с атомистическим отношением с Cr : (W + Mo + V).