

ŽELEZARSKI ZBORNIK

VSEBINA

	Stran
Marinček Borut — Katedra za metalur- gijo na Züriški tehniški visoki šoli	
PRIDOBIVANJE ŽELEZA POTOM DIREKTNE REDUKCIJE RUD	65
Rak Inoslav — Metalna Maribor	
PROBLEMATIKA VARJENJA POBOLJSANEGA KONSTRUKCIJSKEGA JEKLA TIPA N-A-XTRA V TEŽKIH KONSTRUKCIJAH	73
Uranc Franc — Železarna Ravne	
ZILAVOST KONSTRUKCIJSKIH JEKEL V OD- VISNOSTI OD HITROSTI PREIZKUSA	89
Pratnekar Tone — Železarna Ravne	
OPTIMIZACIJA OBDELOVALNIH POGOJEV . .	93
Brudar Božidar — Železarna Jesenice	
FAKTORSKI POSKUSI IN ORTOGONALNI PO- LINOMI	101

LETO 7 ŠT. 2 1973

ŽEZB BQ 7 (2) 65 - 112 (1973)

IZDAJAJO ŽELEZARNE JESENICE, RAVNE, STORE IN METALURSKI INSTITUT



VSEBINA

Stran

Marinček Borut — Katedra za metalurgijo
na Züriški tehniški visoki šoli

**Pridobivanje železa potom direktne redukcije
rud 65**

DK: 187.25:662.341.1-188.5

ASM/SLA: D8j, D5

Rak Inoslav — Metalna Maribor

Problematika varjenja poboljšane konstrukcijskega jekla tipa N-A-XTRA v težkih konstrukcijah 73

DK: 669.14.018.292

ASM/SLA: AYn, k9

Uranc Franc — Železarna Ravne

Zilavost konstrukcijskih jekel v odvisnosti od hitrosti preizkusa 89

DK: 620.178.74: 669.14.018.25

ASM/SLA: TSbQ6

Pratnekar Tone — Železarna Ravne

Optimizacija obdelovalnih pogojev 93

DK: 621.9.011

ASM/SLA: G17a

Brudar Božidar — Železarna Jesenice

Faktorski poskusi in ortogonalni polinomi 101

DK: 519.24

ASM/SLA: S12K

INHALT

	Seite
Marinček Borut — Katedra za metalurgijo na Züriški tehniški visoki šoli	
Die Gewinnung des Eisens durch die direkte Reduktion der Eisenerze	65
DK: 187.25:662.341.1-188.5 ASM/SLA: D8j, D5	
Rak Inoslav — Metalna Maribor	
Probleme beim Schweißen des vergüteten Konstruktionsstahles N-A-XTRA in schweren Konstruktionen	73
DK: 669.14.018.292 ASM/SLA: AYn, k9	
Uranc Franc — Zelezarna Ravne	
Einfluss der Stosskraftgeschwindigkeit auf die Zähigkeit der Werkzeugstähle	89
DK: 620.178.74: 669.14.018.25 ASM/SLA: TSbQ6	
Pratnekar Tone — Zelezarna Ravne	
Optimierung der Bearbeitungsbedingungen	93
DK: 621.9.011 ASM/SLA: G17a	
Brudar Božidar — Zelezarna Jesenice	
Faktorenversuche und ortogonale Polynome	101
DK: 519.24 ASM/SLA: S12K	

CONTENTS

	Page
Marinček Borut — Katedra za metalurgijo na Züriški tehniški visoki šoli	
Iron production by direct reduction of ores	65
DK: 187.25:662.341.1-188.5	
ASM/SLA: D8j, D5	
 Rak Inoslav — Metalna Maribor	
Problems on welding N-A-XTRA tempered structural steel in heavy constructions	73
DK: 669.14.018.292	
ASM/SLA: AYn, k9	
 Uranc Franc — Železarna Ravne	
Influence of the thrust rate on toughness of tool steels	89
DK: 620.178.74: 669.14.018.25	
ASM/SLA: TSbQ6	
 Pratnekar Tone — Železarna Ravne	
Optimisation of the machining conditions	93
DK: 621.9.011	
ASM/SLA: G17a	
 Brudar Božidar — Železarna Jesenice	
The factorial experiments and the method of orthogonal polynomials	101
DK: 519.24	
ASM/SLA: S12K	

СОДЕРЖАНИЕ

Marinček Borut — Katedra za metalurgijo
na Züriški tehniški visoki šoli

**Получение железа прямым восстановлением
руды. 65**

DK: 187.25:662.341.1-188.5

ASM/SLA: D8j, D5

Rak Inoslav — Metalna Maribor

**Проблематика сварки инструментальной
улучшаемой стали марки N-A-XTRA при
тяжёлых конструкциях. 73**

DK: 669.14.018.292

ASM/SLA: AŸn, k9

Uranc Franc — Železarna Ravne

**Влияние быстроты ударной силы на
вязкость инструментальной стали. 89**

DK: 620.178.74: 669.14.018.25

ASM/SLA: TSbQ6

Pratnekar Tone — Železarna Ravne

Оптимизация условий обработки. 93

DK: 621.9.011

ASM/SLA: G17a

Brudar Božidar — Železarna Jesenice

**Факторные опыты и прямоугольные по-
линомы. 101**

DK: 519.24

ASM/SLA: S12K

Prof. dr. ing. Borut Marinček,
Katedra za metalurgijo na Züriški tehniški visoki šoli

DK: 187.25 : 662.341.1-188.5
ASM/SLA: D8j, D5

Pridobivanje železa potom direktne redukcije rud

V članku so podane na kratko teoretske osnove redukcije železnih oksidov. Opisani so najvažnejši postopki za pridobivanje metaliziranih peletov (Krupp, Lurgi, SL/RN ter Midrex, Purofer, Wiberg in Hyl). Poleg osnovnih principov avtor analizira bistvene prednosti in slabosti omenjenih postopkov. Kot praktični primer navaja tehnološke karakteristike jeklarne v Hamburgu, ki dela z metaliziranim vložkom. Poseben poudarek je na tehnologiji izdelave jekel v UHP — elektro peči — delo z večjo količino žlindre, procesi odžveplanja, odfosforenja, poraba električne energije, stroški izdelave jekel in drugo. Predavanje avtorja je sklenjeno z diskusijo o perspektivi uporabe metaliziranih peletov v jeklarstvu.

Direktno izreducirano železo ima obliko kroglic, premera okrog 10 mm, ki so nekoliko porozne in jih imenujemo železova goba ali tudi metalizirani peleti. Staro železo, kot osnovni vložek za pretaljevanje v elektro obločni peči, lahko z dodatki metaliziranih peletov oplemenitimo in dobimo čistejšo jeklo. Danes je v svetu poznanih že okoli 300 vrst postopkov direktne redukcije rud. Le malo postopkov dela uspešno. Kakšni so razni postopki in kako poteka razvoj v svetu je predmet tega članka.

OSNOVE DOBIVANJA METALIZIRANIH PELETOV

Diagram območja redukcije železovih oksidov do metaliziranega železa kaže sl. 1. Važna je količina kisika, ki se reducira iz rude tj. stopnja redukcije. Ta je nanešena na abscisi. Ordinata je razdeljena v dva dela: zgornje območje množina kisika in spodnje območje metaliziranega železa. Na levi strani je območje rud (Fe_2O_3 in Fe_3O_4) in desno železne gobe. Najprej se zmanjšuje koncentracija Fe_2O_3 in narašča Fe_3O_4 ; isto se zgodi z Fe_3O_4 in wüstitom ter wüstitom in kovinskim železom. Ko zvišujemo redukcijsko stopjo pridemo v območje železove gobe. Goba bo torej sestavljena

na iz metalnega železa in wüstita (FeO). Čim večja bo redukcijska stopnja, več bo kovinskega železa in manj bo wüstita, oziroma kisika. Zelo dobro izreducirana goba ima redukcijsko stopnjo 0,95, slabše izreducirana pa 0,85. Med tema dvema stopnjama imamo industrijsko sestavo gobe.

Pri redukcijski stopnji 0,95 sestoji železna goba (brez jalovine) iz 91 % kovinskega železa in 9 % wüstita. Želimo, da je količina FeO čim manjša, ker bomo pozneje v elektro obločni peči rabili za njeno redukcijo redukcijske elemente (n. pr. C) in energijo oz. električni tok.

Prikazani diagram ni popolnoma točen. Zraven gobe pride še jalovina. Količina jalovine ostane tekom redukcije nespremenjena. Dobre rude imajo 1,5 do 5 % jalovine. Vse kar je več, dela v topilnicah težave, ker so za vezavo nekaterih komponent v jalovini potrebni večji dodatki CaO . Goba je torej sestavljena iz kovinskega železa (Fe_m), wüstita (FeO) in jalovine.

POSTOPKI PRIDOBIVANJA METALIZIRANIH PELETOV

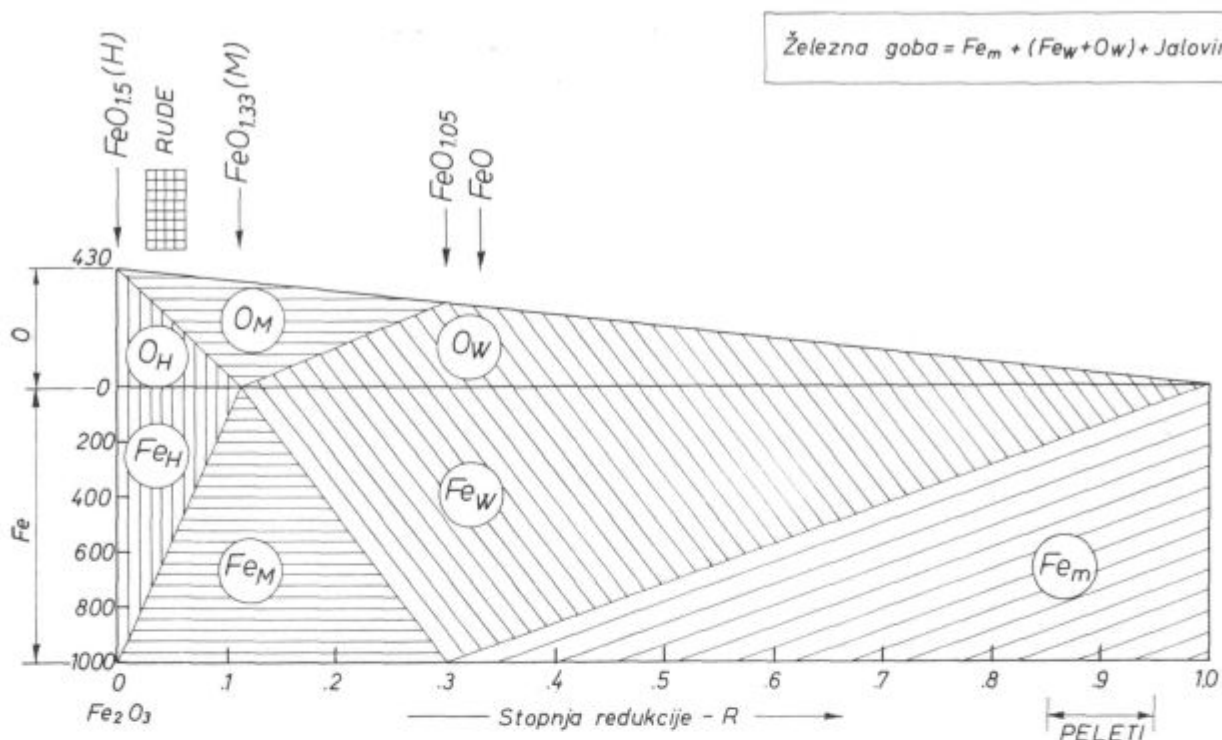
Po načinu redukcije delimo postopke v dve skupini:

1. postopki redukcije s trdnim ogljikom: n. pr. Krupp-postopek, Lurgi oz. SL/RN
2. postopki redukcije s plini H_2 in CO : n. pr. Midrex - Purofer - Wiberg - Hyl - postopek.

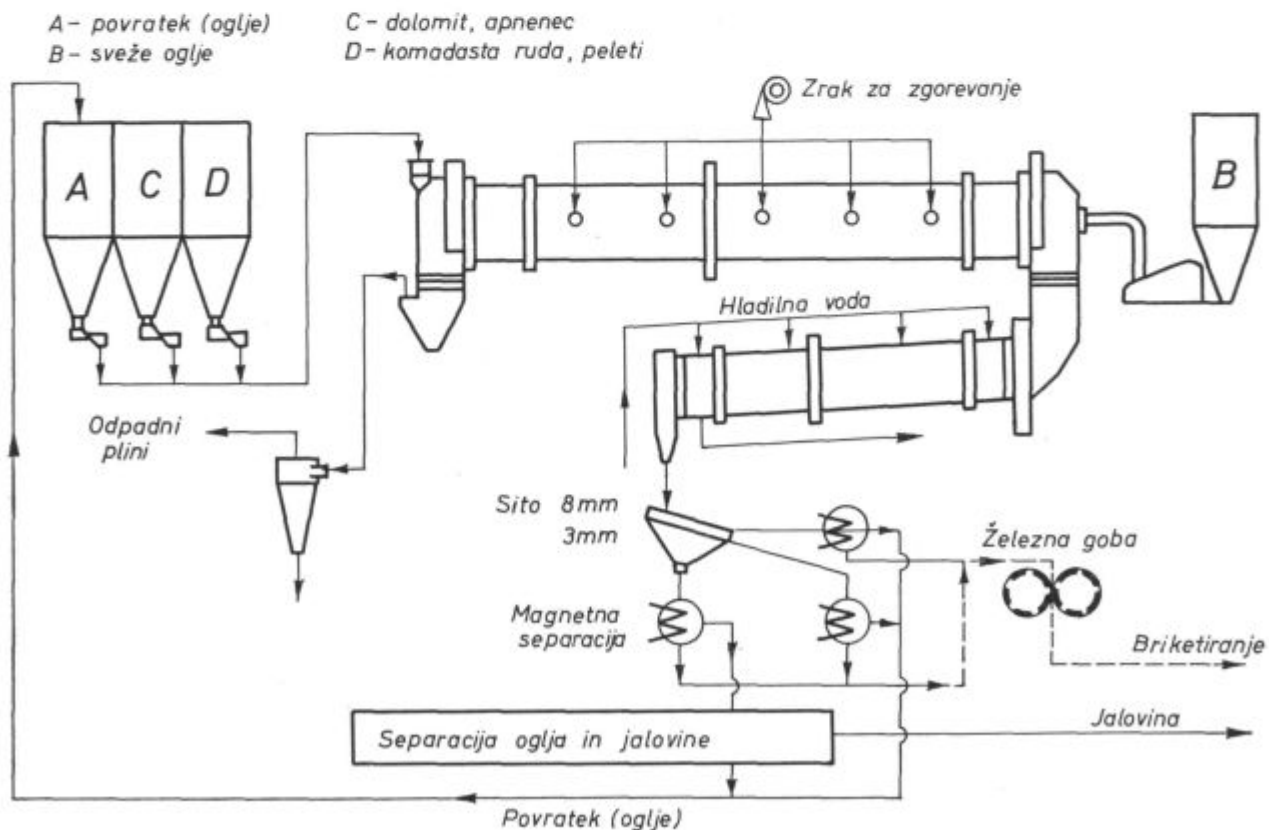
a) Postopki redukcije s trdnim ogljikom (Krupp- in SL/RN-postopek)

SL/RN-postopek uporablja za redukcijo rude rotacijsko peč (slika 2), ki je dolga do preko 100 metrov in ima premer do 6 metrov. Mešanica rude ali rudnih peletov svežega antracita in povratnega

* Predavanje je bilo na Ravnah 11. septembra 1972. leta
Članek sta pripravila po zapiskih predavanja: Dr. ing. B. Koroušič (Metalurški inštitut Ljubljana) in dipl. ing. V. Macur (Železarna Ravne)



Slika 1
 Shematska ponazoritev procesa izdelave železne gobe iz Fe-peletov



Slika 2
 Shematski potek SL/RN oziroma Krupp-postopka

antracita se doda v peč iz bunkerjev na levi strani. Mešanica se v peči ogreje na 900—1000° C in poteka redukcija po enačbi

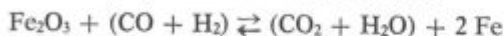


Peč ima v steni oz. v oblogi odprtine za dovod zraka, da lahko CO popolnoma zgori (do CO₂). Rabi se približno 3,5 · 10⁶ kcal na tono gobastega železa in to pri Lurgi- kakor pri Krupp-postopku.

Na koncu peči dobimo gobo, ki se v novi rotacijski peči hladi indirektno z vodo, preseje in neporabljeni antracit loči od gobe in se vrača nazaj v peč. Peči delajo s kapaciteto do 1000 t gobe/dan.

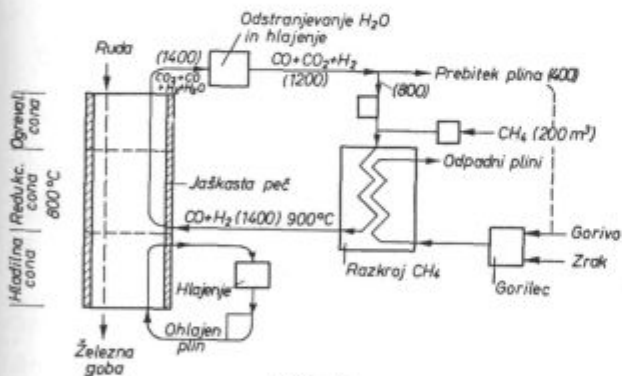
b) Postopki s plinastimi reducenti

Redukcija poteka na sledeč način:



Na tono železa je treba odstraniti 430 kg kisika. Za to redukcijo rabimo 560 m³ CO in H₂. Izrabi se samo 30 % plina, zato delajo vsi postopki s približno 1500 m³ CO in H₂.

Od plinastih postopkov je najbolj zanimiv *Midrex postopek*, ki ima najboljšo bodočnost. Naprava ima dva dela: en del predstavlja redukcijsko peč, drugi del pa proizvaja iz metana redukcijski plin CO + H₂ (sl. 3). Šahtna redukcijska peč je



Slika 3

Shematska ponazoritev Midrex-postopka (številke v oklepajih: m³ plina/t Fe)

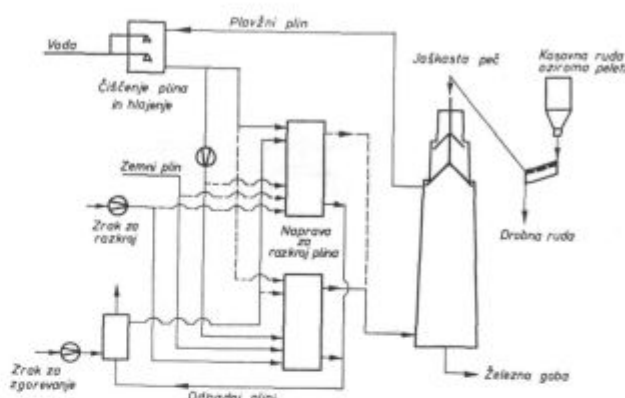
visoka okrog 10 m. Razdeljena je v tri cone: cona ogrevanja rude, redukcijska cona (okrog 800° C) in spodaj je hladilna cona. V redukcijsko cono se vpihava CO + H₂ s temperaturo okrog 900° C. Dimni plini gredo zgoraj iz peči v hladilno komoro (z vodno prho), kjer se ohladi in se izloči voda. Prečiščen plin (CO + CO₂ + H₂) se meša s CH₄ in vodi v napravo za izdelavo novega redukcijskega plina po:



Reakcija je endotermna. Toploto dovajamo rekuperativno, da se reakcijski prostor ogreje na 900—1000° C. Rekuperativne cevi imajo premer 20 cm in so polnjene z nikljevim katalizatorjem, ki ima dve nalogi:

1. da prepreči izločanje ogljika in
2. omogoča, da poteka proces pri čim nižji temperaturi (ca 800° C).

Katalizator je zelo važen, ker je zelo občutljiv na žveplo in drog. Tona gobe rabi 3,5 · 10⁶ kcal kot zemeljski plin. Midrex postopek naredi v eni šahtni peči dnevno okoli 1000 ton železove gobe.



Slika 4

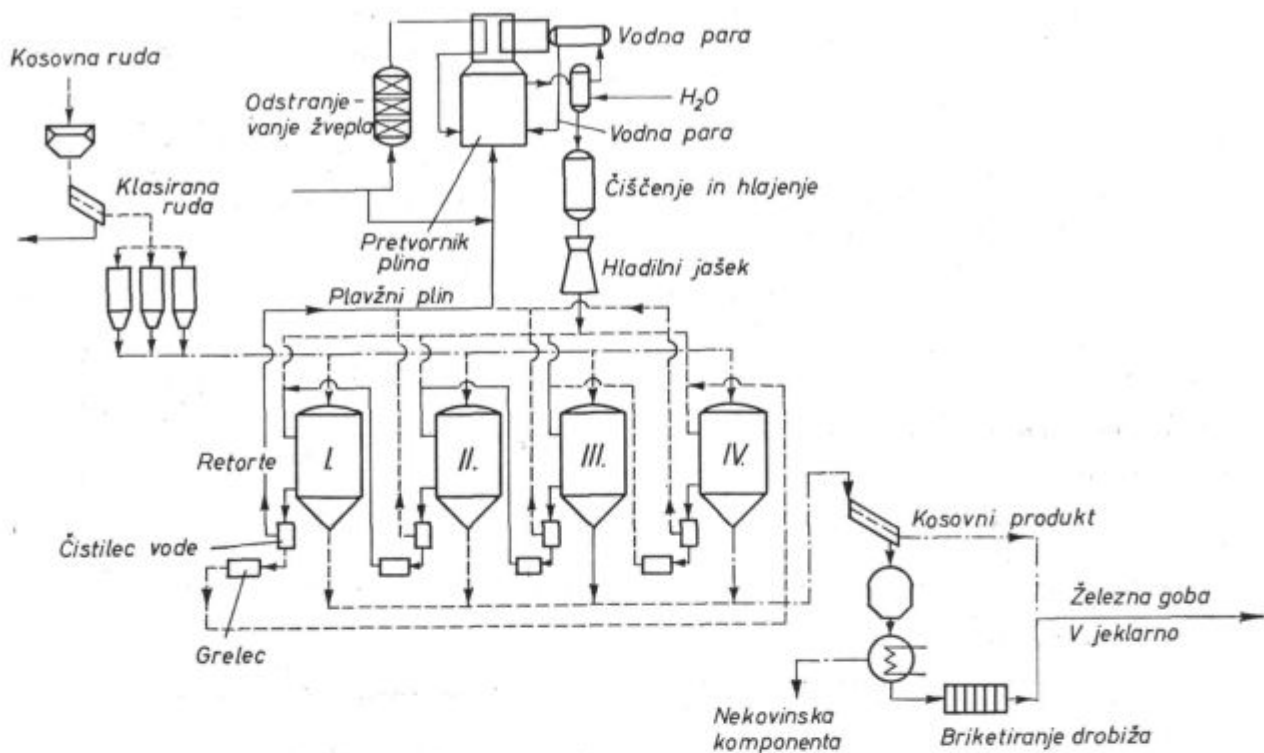
Shema delovanja Purofer-postopka

Purofer postopek (sl. 4) dela podobno kot *Midrex postopek*. Razlika je v tem, da dela regenerativno. Katalizator, ki je iz zmesi glinice in niklja, se ogreje na višjo temperaturo in akumulira toploto. Ko je zmes dovolj ogreta, se spusti CH₄ + CO₂, izvede reakcija (glej zgoraj) in porabi toplota. Slaba stran postopka je, da dela nekontinuirno. Spreminja se redukcijska stopnja, kar pa ni ugodno. Produkcija znaša 500 ton/24^h; verjetno postopek nima bodočnosti. Bodočnost imajo postopki, ki dajo enakomeren produkt s čim višjo stopnjo redukcije.

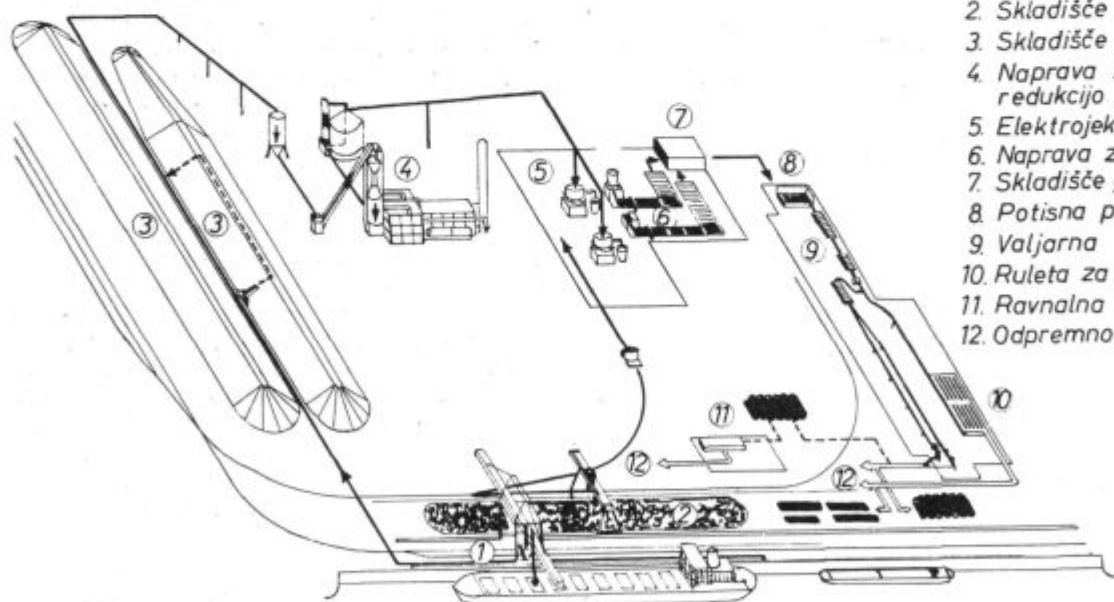
Hyl postopek (sl. 5) imajo samo v Mehiki, kjer imajo poceni metan; novo postrojenje se gradi v Braziliji. Reakcija CH₄ + H₂O ⇌ CO + 3 H₂ se vrši kontinuirno, redukcija rude pa diskontinuirno v posodah iz železa, ki imajo ca 20 ton. Posoda se zapolni z rudo, ki se postopoma s plinom reducira, hladi in nosi direktno v jeklarsko peč. Postopek ima prednost, da se pri plinski reakciji (gl. zgoraj) voda nastala z ohlajanjem izloči in dobimo plin, ki ima 25 % Co in 75 % H₂. Slaba stran je, da rabimo 4,5 · 10⁶ kcal na tono gobe.

PRIMER ŽELEZARNE V HAMBURGU (sl. 6)

To je primer integralne jeklarne, ki ima *Midrex postopek* pridobivanja gobastega železa. Jeklarne ima dve 90-tonski UHP elektro obločni peči. Gredice 120 × 120 × 15 m se delajo kontinuirno. Iz njih valjajo betonsko železo in razne profile. Skupno je zaposlenih 800 ljudi. Naredi se 300.000—400.000 ton jekla na leto. Ko bo zgrajena še ena valjarna, bodo naredili 500—600.000 ton jekla na leto.



Slika 5
Shematska predstava Hyl-postopka

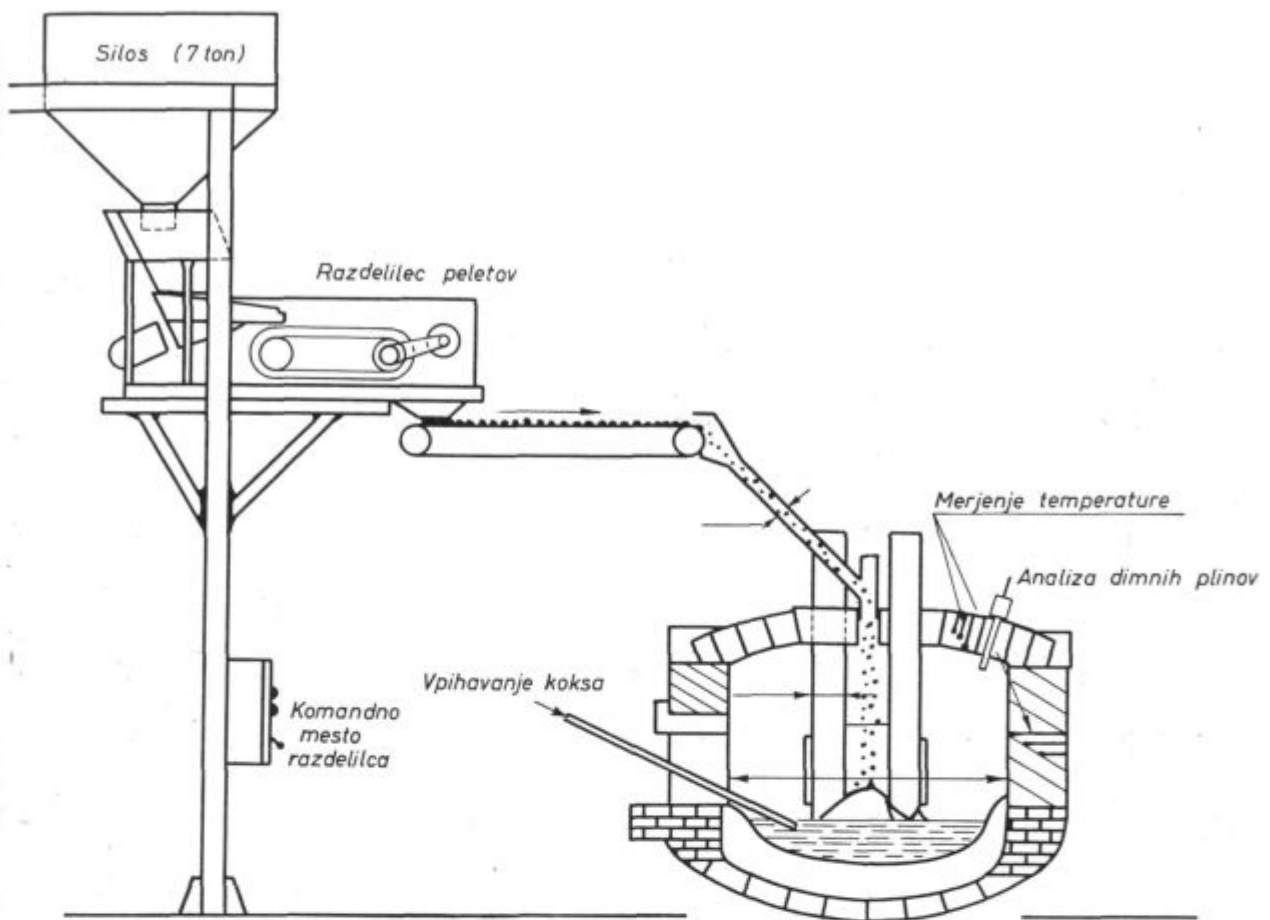


Slika 6
Jeklarna v Hamburgu

Metalizirani peleti imajo 1,5 % C in redukcijsko stopnjo 0,95. Ta ogljik se namenoma shrani za redukcijo wüstita v jeklarski peči; pri tem se peleti naogljijo tako, da se v redukcijski plin dovaja še nekaj metana, ki pri temperaturi okrog 500° C razpade v C + 2 H₂.

PREDELAVA ŽELEZOVE GOBE V ELEKTRO OBLOČNI PEČI

UHP elektro obročna peč v Hamburgu ima transformator z močjo 40 MVA. Peč najprej raztali 1/3 vložka iz starega železa. Po potrebi se pri začetku taljenja doda ruda in apno. Pelete začno



Slika 7

Naprava za kontinuirano dodajanje briketov

dovajati na vrh peči (sl. 7) s pomočjo transportnega traku in sicer po raztalitvi starega železa. V peč se dodajajo med polno obremenitvijo tj. peč se ne izklaplja. Količina žlindre je večja kot pri navadnem procesu, zato gredo elektrode v žlindro in obloka ne vidimo. Žlindro moramo z nagibanjem peči odstraniti. Odfosforenje je ugodno zaradi velike količine žlindre in dosti kisika.

Železarna v Hamburgu je bila prvotno zgrajena za betonsko železo. Danes pa že izdelajo 1/3 legiranih jekel. Izdelati nameravajo 2/3 legiranih jekel in ostalo betonsko železo. Gredice imajo odlično razteznost, ker je ruda čista. Metalizirane pelete izdelujejo iz švedskih rud. Poraba električne energije v UHP-peči je okrog 500 kWh/t. Danes jih stane tona železove gobe 180 DM. Od tega odpade 1/3 na predelavo in 2/3 na ceno rude. Z nekaterimi enostavnimi posegi bi se danes lahko poraba energije za proizvodnjo železove gobe dala znižati od $3,5 \cdot 10^6$ kcal/t na $2,0 \cdot 10^6$ kcal/t gobe tj. predelava bi se lahko pocenila še za 10–20 DM na tono, ev. tudi še več. Goba se mora pri vskladščanju dobro zaščititi, ker ima tendenco, da oksidira.

RAZPRAVA

F. Vizjak, Ravne: Kako vpliva sestava žlindre na procese pri proizvodnji jekla?

Prof. Marinček: Slabo je to, ker imamo veliko jalovine v gobi in zato bomo imeli tudi veliko žlindre. Čim več je jalovine, tem več je potrebno dodajati apna; bazičnost se drži v mejah 2 do 3 napram navadnemu postopku, ko je razmerje $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 3$ do 4,5.

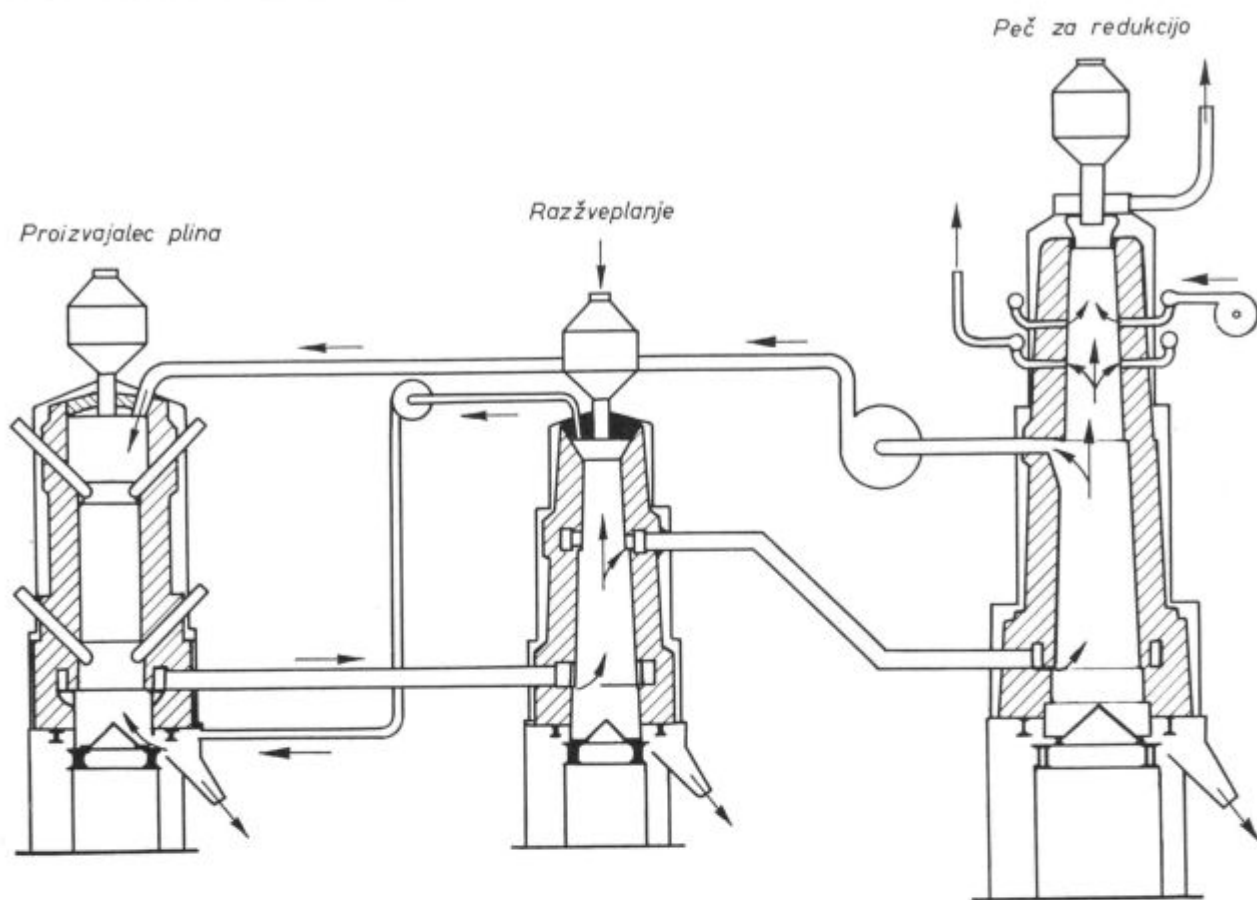
F. Mahorčič, Ravne: V Jugoslaviji nimamo ne rude, ne reducentov in bo potrebno tako napravo narediti nekje ob morju. Kako daleč se je razvil postopek z reducentom iz nafte?

Prof. Marinček: Wiberg postopek (slika 8) dela tudi z nafto. Potrebna toplota se dovaja električno. Peč za izdelavo redukcijskega plina se napolni s koksom in skozi vodi CO_2 , ki reagira z nafto in tvori se $\text{CO} + \text{H}_2$. Istočasno se lahko dovaja tudi CH_4 , ali pa se rabi koks. Te kombinacije so možne in se na teh postopkih danes dela.

V. Macur, Ravne: Kakšna je čistoča švedskih rud, ki jih uporabljajo pri Midrex postopku v Hamburgu in za koliko se dajo znižati škodljivi elementi?

Prof. Marinček: Švedske rude imajo 1,5 do 3,0% jalovine. Fosfor se pri izdelavi gobe ne da odpraviti, ampak pozneje v elektro obločni peči. Velika prednost postopka je, da uporablja metan, ki ima malo žvepla.

J. Arh, Jesenice: Ali lahko pelete zakladamo s košarami? Kakšni so praktični problemi pri izdelavi jekla zaradi velike količine žlindre?



Slika 8
Shema Wiberg-Söderfors postopka

Prof. Marinček: Peleti se dajo v obložno peč zakladati s košarami, vendar to ni ekonomično zaradi toplotnih izgub in izgub na času. Zlindra se pri obložni peči odstrani z nagnjenjem peči; pri tem teče žlindra v ponvo, ki je spodaj pod pečjo.

G. Klančnik, Ljubljana: Ali lahko v Sloveniji, v naslednjih desetih letih, računamo na uporabo metaliziranih peletov iz tujega tržišča, ali pa je boljše razviti lastno proizvodnjo metaliziranih peletov iz rud?

Prof. Marinček: Proizvodnja metaliziranih peletov bo vedno večja in bo v naslednjih petih do desetih let znašala 5% produkcije jekla ali več, predvsem tam, kjer imajo ugodno surovinsko bazo. Za Slovenijo bi bilo ugodno, da se nekje ob morju postavi takšna naprava in naredi dolgoročno pogodbo z lastniki dobrih rud. V naslednjih 2–3 letih se bo videlo, kaj je bolj ekonomično: ali vzeti bolj revno rudo in jo obogatiti, ali pa kupovati bogato rudo iz Švedske, Liberije, Brazilije itd. Vsekakor je ugodno, če nisi vezan na uvoz.

G. Klančnik, Ljubljana: Proces pridobivanja železne gobe se bo v prihodnjih petih letih toliko izpopolnil, da bo na njega treba računati. Za čisti vložek smo v Sloveniji zelo zainteresirani. Poleg tega je surovo železo predrago.

Verjetno to muči tudi druge v svetu in bo treba davek plačati.

Prof. Marinček: Skrbno bo treba zasledovati razvoj tehnologije in ekonomičnosti v svetu. Kot primer naj velja postopek pridobivanja peletov v Hamburgu. Investicijski stroški na tono jekla, pridobljenega po LD postopku in v sklopu visokih peči, znašajo 800–900 DM. Investicijski stroški jekla, izdelanega v obložni peči na surovinski bazi peletov, pa znašajo 450 DM na tono jekla.

F. Vizjak, Ravne: Ali na proizvodnjo peletov vpliva tudi ogljik in redukcijna sposobnost oksidov?

Prof. Marinček: Danes se veliko dela na določevanju redukcijne sposobnosti oksidov. Koliko ti vplivajo, se še ne ve točno. V šahtni peči je dovolj časa in vprašanje redukcijne sposobnosti ni tako važno. Važen je razpad med redukcijo; nekatere rude so pri tem bolj občutljive, druge manj.

B. Koroušič, Ljubljana: Kakšen je pomen metalizirane vložke glede na razvoj kontinuiranih postopkov proizvodnje jekla?

Prof. Marinček: Kontinuirni postopki imajo interes za železarnice, ki delajo vedno iste produkte npr. betonsko železo. Pri drugih, ki delajo različne produkte, ni važno.

V. Rac, Ravne: Kakšna legirana jekla so se do sedaj že proizvajala in ali lahko za vložek vzamemo legirane odpadke?

Prof. Marinček: Zaželeno je, da se dela s čistimi odpadki. Peleti prinesejo dosti kisika in imamo pri taljenju »odgor« nekaterih elementov kot so Si, Mn, Cr itd.

J. Arh, Jesenice: Koliko odstotkov vložke odpade na pelete?

Prof. Marinček: V Hamburgu so delali poskuse z uporabo 0–100% dodanih metaliziranih peletov. Običajno vzamejo 50% starega železa in 50% peletov.

F. Mahorčič, Ravne: V Sloveniji imamo plavže. Ali bi lahko koristili pelete z nižjo redukcijno stopnjo kot vložek za plavž?

Prof. Marinček: Novi članek v Stahl und Eisen piše, da uporaba metaliziranih peletov odkriva novo dobo v proizvodnji plavžev. Poveča se proizvodnja peči. Izkoristek kalorij pa je dosti slabši kot v klasični visoki peči. Važno je, da bo bodoča peč imela za redukcijno sredstvo samo CO.

G. Klančnik, Ljubljana: Uporaba železove gobe v obločni peči bi prinesla nekatere koristi kot npr. znižanje porabe kWh, povečano produktivnost itd. Zavedati pa se moramo, da je železova goba danes dražja od starega železa. Vendar, mi smo proizvajalci kvalitetnih in plemenitih jekel, zato je za nas odločilna kvaliteta jekel. Če se doseže bolj kvalitetno plemenito jeklo in poleg tega znat-

no višji odstotek izplena (ker je pri tem manj slabega produkta), potem je treba videti koristi v multiplikativni ekonomičnosti.

Prof. Marinček: To je centralno vprašanje metaliziranih peletov. Peleti prinesejo različne prednosti in gledati se mora samo kombinacija teh prednosti.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel sind im kurzen die theoretischen Grundlagen für direkte Reduktion der Eisenoxyde gegeben. Die wichtigsten Verfahren für die Gewinnung der metallischen Pellets (Krupp, Lurgi, SL/RN, Midrex, Purofer, Wiberg und Hyl) sind angegeben. Es werden die Grundprinzipien so wie die wesentlichen Vor- und Nachteile dieser Verfahren analysiert. Für den praktischen Beispiel werden die technologischen Merkmale der Hamburger Stahlwerke, welche mit den vorreduzierten Pellets im

Einsatz arbeiten, angewendet. Besondere Betonung gilt der Technologie der Stahlerzeugung im UHP Elektroofen, der Arbeit mit grösserer Schlackenmenge, dem Entphosphorungs- und Entschwefelungsvorgang, dem Energieverbrauch, dem Kostenaufwand bei der Stahlerzeugung und anderem.

Der Vortrag des Autors wird mit einer Diskussion über die Aussichten der Anwendung der vorreduzierten Pellets in der Stahlerzeugung beschlossen.

SUMMARY

Theoretical fundamentals of the reduction of iron oxides are shortly described, on the most important processes for production of metallized pellets (Krupp, Lurgi, SL/RN and Midrex, Purofer, Wiberg, and Hyl) are presented. Beside the basic principles, author also analyses the essential advantages and disadvantages of the mentioned processes. As a practical example, technological scheme of the Hamburg steel works which uses metallized

charge is explained. Technology of steel manufacturing in UHP electrofurnace, work with greater amount of slag, desulphurisation and dephosphorisation processes, electrical energy consumption, costs of steel manufacturing are specially stressed. Author's paper was complemented by the discussion on the prospect of using metallized pellets in steel-making.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено короткое описание теоретической основы восстановления окисей железа. Описаны самые важные процессы получения металлизированных окатышей (Krupp, Lurgi, SL/RN, Midrex, Purofer, Wiberg и Hyl). С учётом основных принципов, автор излагает существенные преимущества и недостатки упомянутых процессов. В виде примера из промышленности рассмотрены технологические характеристики сталеплавильного завода

в Гамбурге, который работает с металлизированным садом. Особено подчеркнута важность технологии производства стали в электрической печи, работа с большим количеством шлака, о способах десульфурации и уменьшения фосфора, расход электроэнергии, производственные расходы стали и пр. В заключении статьи рассмотрено о перспективности употребления окатышей в производстве стали.

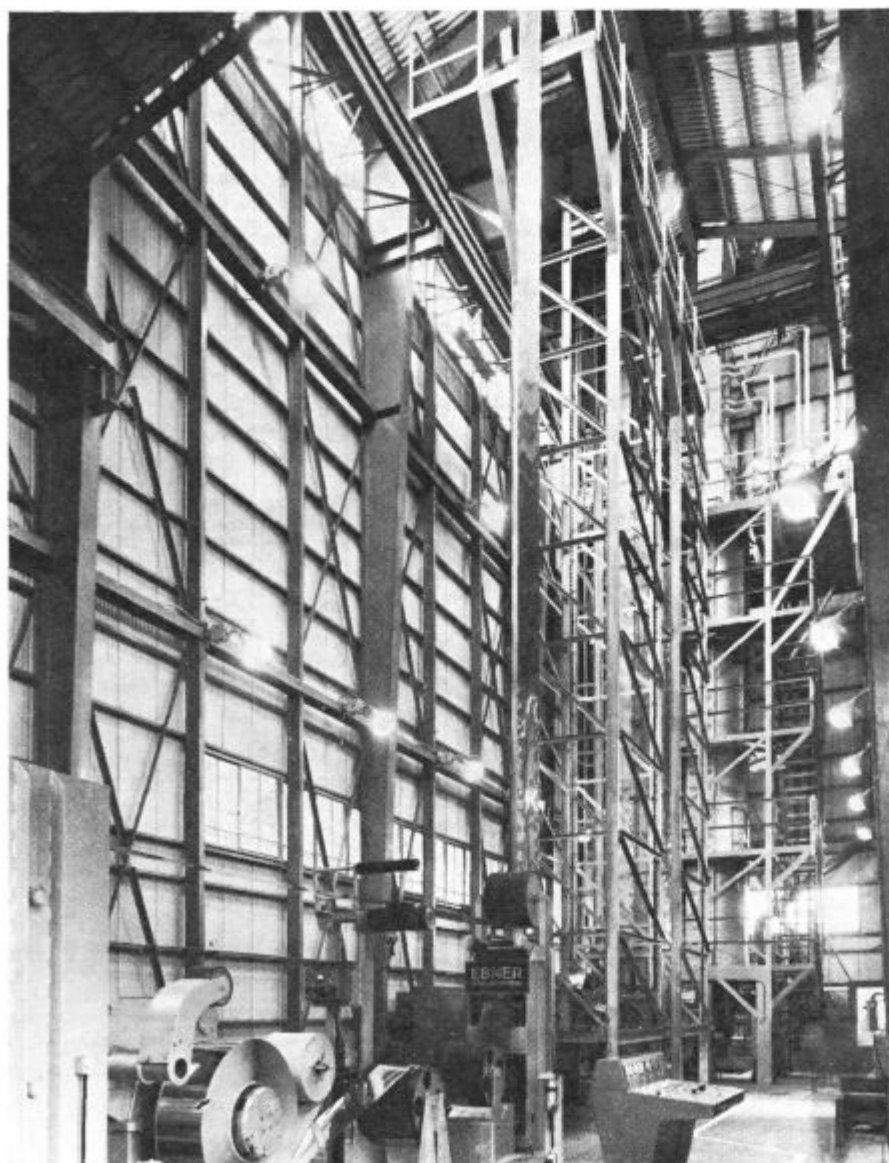
EBNER

Industrieofenbau

A 4021 Linz/Austria
Postfach 345

Tel. 07222 57 4 71
Telex 02/1415

Proizvodnja električno in plinsko ogrevanih industrijskih peči za termično obdelavo jekel, barvastih kovin in zlitin; ter naprav za varovalno atmosfero vseh vrst.



Slika 1: Kontinuirna peč za svetlo (belo) žarjenje Cr in CrNi legiranih jeklenih trakov, kapaciteta max. 650 kg/h, širina traku max. 320 mm, priključna moč ca. 300 kW, max. temp. obratovanja: 1.100° C

(Pogled z odvijalne strani)

Problematika varjenja poboljšane konstrukcijskega jekla tipa N-A-XTRA v težkih konstrukcijah!

Med poboljšana dobro variva jekla štejemo visoko trdnostna jekla z omejeno vsebnostjo C, dobro žilavostjo in istočasno visoko mejo plastičnosti, ki ni dosežena samo s kemično sestavo, temveč v glavnem s poboljšanjem po valjanju.

Zaradi visokih mehanskih lastnosti omogočajo taka jekla lažje in cenejše konstrukcije, s tehnološke strani pa prinašajo več problematike kot visoko trdnostna normalizirana jekla.

K varjenju poboljšanih jekel, se lahko pristopi šele po dobrem poznavanju celotnega spektra strokovne literature, po do podrobnosti izdelani varilni tehnologiji, po do podrobnosti preverjeni usklajenosti varilne opreme z delovno ekipo in po zagaranirani disciplini delovne ekipe do tako zahtevnega varjenja, kajti že večje vremenske spremembe lahko privedejo do večjih motenj in napak.

Jeklo tipa N-A-XTRA 70 je primerno za uporabo v vseh težkih varjenih konstrukcijah; uporabili smo ga pri varjenju težkega tlačnega cevovoda v debelinah od 11 do 27 mm.

Značilnosti jekla N-A-XTRA 70

Jeklo je izdelek Tyssnovega koncerna in predstavlja v Evropi najbolj uporabljeno konstrukcijsko jeklo poboljšane tipa za tlačne cevovode, mostove, tlačne posode za nizke temperature in ima naslednje karakteristike:

— izdelano je po Siemens-Martinovem postopku, poboljšano po vročem valjanju v napravi, ki

jeklo kontinuirno segreva, kali z vodo ter popušča na določeno trdnost;

— minimalne mehanske karakteristike so v smeri pravokotno na valjanje naslednje (1) — tabela 1

— za statično obremenjene konstrukcije (< 1000 nihajev) znaša varnostni faktor $s = 1,8$, kar velja za napetostno nežarjene konstrukcije. Za dinamično obremenjene konstrukcije (> 1000 nihajev) je $S \sim 1,5$, vendar ga je točneje potrebno določiti po posvetu med izdelovalcem pločevine, naročnikom in nadzornim organom. Diagram št. 1 (2) prikazuje za N-A-XTRA 70 trajno utripno trdnost pri 2×10^6 nihajih.

Če primerjamo vrednosti α , ki so vnešene v diagram št. 1 s tistimi za normalizirana jekla, opazimo, da N-A-XTRA 70 prenese pri 10^3 — 10^4 nihajih dvojno višino trajne utripne vrednosti kot pa jeklo St 52.3 (3). Pri povišanju nihajev in v primeru da je α negativen, pa ta vrednost pada in se vrednosti trajne utripne trdnosti obeh jekel izenačujejo in tako pri jeklu N-A-XTRA 70, glede na normalizirana visokotrdnostna jekla pri dinamičnih obremenitvah pridobimo le malo.

— Z dopustno napetostjo pri izračunu neke konstrukcije reguliramo, da ne pride do nasilne porušitve, plastične deformacije ali utrujenostnega loma, tako dolgo dokler ta napetost ni prekoračena. Pri teh varnostnih ukrepih pa ni vzeta v obzir lastnost kubičnega prostorsko centriranega α Fe, da se z znižanjem temperature njegova deformabilnost skokoma spreminja in je pri določeni temperaturi pri napetostih, ki so daleč pod mejo

Tabela 1

Oznaka	σ_s kpm/mm ²	σ_B kpm/mm ²	δ_s %	ψ %	Žilavost — V zarezu kpm/cm ²
N-A-XTRA 70	70	80—95	16	55	5 pri 0° C 4 pri — 20° C 3,5 pri — 40° C
Kem. analiza:	0,20 % C, 0,50—0,90 % Si, 0,70—1,10 % Mn, 0,04 % P, 0,04 % S, 0,60—1,00 % Cr 0,20—0,60 % Mo, 0,08—0,12 % Zr				

Tabela št. 1
Mehanske karakteristike jekla N-A-XTRA 70

A - jeklo z valjčno kožico
 D - neobdelani sočelni zvar
 C - neobdelani dvojni kotni zvar
 $\lambda = \frac{\sigma_v}{\sigma_0}$

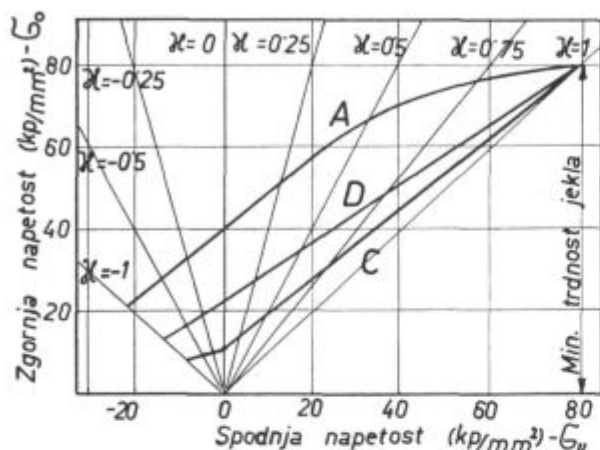


Diagram št. 1

Trajna utripna trdnost jekla N-A-XTRA 70 pri 2×10^6 nihajljih

Tabela 2

Metoda	Oblika preizkušanca	Kriterij	Prehodna temperatura °C		
			Jeklo	Zvar	Prehodna cona
1	2	3	4	5	6
Žilavostna proba	V zarez — nestarano stanje	T 3,5	— 75 do — 120	— 60	— 45
	V zarez — starano stanje	T 3,5	— 40 do — 80		
Kohaerazije proba	Ko ($r \leq 0,005$)	TL _{Ko}	— 40 do — 60		
	Bo ($r \leq 0,005$)	TL _{Bo}	— 80 do — 110	— 50	— 30
Navarilni preizkus	450 × 200 × 30 mm		do — 20 < 110° žilav lom		
Drop weight test	P 2	NDT	— 50 do — 80	— 75	— 35
Robertson test	260 × 350 × 30 mm	CAT	— 50 do — 60	— 55	— 35
Drop weight tear - test	$r \leq 0,005$ mm	Ta	— 35 do — 50		
Ostri upogibni preizkus	$r \leq 0,005$ mm	Ti	— 80 do — 110	— 80	
Zarezni natezni preizkus	$r = 0,1$ mm	Ti	— 80 do — 90	— 80	

Tabela št. 2

Pregled prehodnih temperatur za jeklo, zvar in prehodnocono jekla N-A-XTRA 70 po različnih kriterijih določanja krhkega loma

plastičnosti oziroma dopustno napetostjo in se sproščajo kot krhki lomi in to kar je za krhke lome značilno pred makroskopsko deformacijo (2).

— Zato so uvedeni kriteriji, s katerimi lahko za vsako jeklo napovemo, pri kateri prehodni temperaturi, žilav lom prehaja v krhkega. Temperatura obratovanja konstrukcije mora biti v vsakem primeru nad to kritično temperaturo.

— Za ocenitev sigurnosti konstrukcije konvencionalni preizkus na žilavostnih skuskih (žilavostni preizkus je svojo uporabo popolnoma opravičil za določanje lastne žilavosti jekla oziroma za kontrolo kvalitete in kontrolo metalurških lastnosti in vplivov kot so kemična analiza, toplotna obdelava, hladna predelava itd.) ne zadošča (4) in je potrebno uporabiti take metode, pri katerih lahko bolje zasledujemo in določujemo temperature, pri katerih nastopajo razpoke in na drugi strani sposobnost jekla, da take razpoke zadrži. Pri tem je potrebno upoštevati še to, da z znanstvenega stališča neka metoda ni zadovoljiva, kadar s kompromisom določimo prehodno temperaturo (kot npr. T pri 3,5 kpm/cm²), oziroma s številčno vrednostjo delo, ki ga porabimo pri neki temperaturi da dobimo npr. 50 % mat ali 50 % kristalinea preloma. Metoda je šele takrat ekzaktna, kadar določimo prehodno temperaturo na podlagi spremembe važne

smiselne fizikalne veličine (npr. kadar se lomna napetost skokoma menja v ozkem temperaturnem področju). Take metode so Drop weight test, Robertson test, Double tension test itd.

V tabeli 2 so navedene prehodne temperature po različnih kriterijih za jeklo N-A-XTRA 70.

Do tako velikega števila metod (navedene so le nekatere), je prišlo zaradi različnih pogojev, ki pri obremenitvah različnih konstrukcij nastopajo. Dosedanja spoznanja (4) prikazujejo, da lahko primerjamo med seboj rezultate metod za ugotavljanje krhklega loma, samo takrat, kadar so obremenilni pogoji (temperatura, napetostno stanje, hitrost obremenitve) primerjalni. Tako npr. ne moremo med seboj primerjati rezultate, ki jih dobimo z metodami, ki ponazarjajo obnašanje materiala v času nastopa razpoke z rezultati metod, ki ponazarjajo obnašanje materiala v času razširjanja razpok oziroma ujetja teh (ne moremo npr. primerjati prehodno temperaturo $T_{3,5}$ dobljeno s porušitvijo žilavostnih skuskov, s prehodno temperaturo NDT dobljeno z Drop weight testom).

Kot rezime tega razglabljanja, je ugotovitev, da je za določitev najnižje obratovne temperature neke konstrukcije (s tem izbira osnovnega in dodajnega materiala) potrebno uporabiti velike preizkuse (Large—Scale—Tests kot je npr. Izotermni Robertson test za dinamične obremenitve in veliki zarezni preizkus za statične obremenitve).

Preiskave pred začetkom varjenja.

Uporabnost nekega visokotrdnostnega jekla, moramo ocenjevati kompleksno in to predvsem s stališča možnih vzrokov, ki lahko privedejo do porušitve konstrukcije (5):

- slaba izvedba projekta konstrukcije;
- anizotropnost kvalitete materiala;
- slaba izvedba v delavnici;
- spremembe v konstrukciji v času njene uporabe.

Najvažnejši faktorji, ki lahko privedejo konstrukcijo do porušitve in izvirajo iz gornjih okvirnih postavk pa so:

- termični cikel v času operacije varjenja;
- napetostni nivo in porazdelitev napetosti;
- vsebnost vodika v zvaru;
- debelina zavarjenega materiala;
- neenakomernosti različnih stopenj, ki se pojavijo v času izdelave in po njej;
- naraščanje napak v času uporabe konstrukcije;
- naraščanje krhkosti zavarjenega materiala, staranje, hladna deformacija itd.;
- oblika obremenitve — statična ali dinamična.

Preizkusi, katere pri današnjem stanju tehnike lahko izvedemo in ki navedene faktorje zajemajo,

so izbrani tako, da ponazarjajo pojave, ki izhajajo iz časa varjenja ali dejanske uporabe konstrukcije. Klasificiramo jih glede na področje zajemanja, ki so naslednja:

- razpokljivost v hladnem (Cold cracking)
- razpokljivost v vročem (Hot cracking)
- lamelarna iztrgljivost (Lamellar Tearing)
- pojav krhklega loma pod statičnimi ali dinamičnimi pogoji (Brittle fracture initiation)
- razširjanje krhklega loma in sposobnost ujetja (Arrest properties).

S temi področji so podani fenomeni, ki lahko nastopajo. Izdelovalec konstrukcije pa na osnovi njih lahko presodi, kateri od fenomenov se mu pri izdelavi lahko pojavlja ali celo več skupaj.

V nadaljevanju smo izvedli preiskave, s katerimi smo skušali za naš primer čimbolje zajeti zgornja priporočila IIW, s tem določiti nivo zahtevnosti projekta glede na uporabljeni osnovni material in na osnovi preiskav izdelati celotno varilno tehnologijo, brez katere si uspešnega varjenja ne moremo zamisliti.

Za določitev maksimalne trdote, ki lahko v prehodni coni nastopa, za določitev temperature predgrevanja pri varjenju, za določitev hladne razpokljivosti in ocenitev toplotne razpokljivosti zvara, je bila uporabljena pločevina 22 mm z naslednjimi fizikalnimi karakteristikami — tabela 3:

Tabela 3

Saržna št.	σ_s kpm/mm ²	σ_B kpm/mm ²	δ_5 %	Žilavost, DVM zarez a 0° C, kpm/cm ²
136712	74,9	84,0	18	14,6 15,1 15,0

Kem.

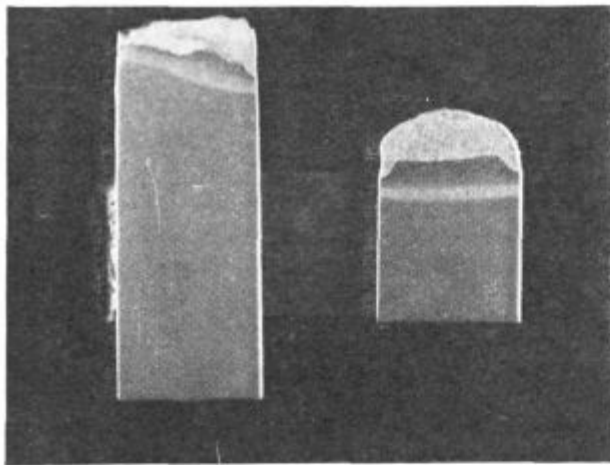
analiza: 0,17 % C, 0,66 % Si, 0,85 % Mn, 0,020 % P, 0,016 % S, 0,034 % Al, 0,76 % Cr, 0,35 % Mo

Tabela št. 3

Mehanske karakteristike jekla N-A-XTRA 70 za saržo 136712

1. Določitev maksimalne trdote

Uporabljena je bila metoda »in situ« (6,7) pri kateri so bili valjčki \varnothing 10 mm različne dolžine, vtaknjeni v izvrtino pločevine iste debeline kot je dolžina valjčka in preko katerega se je navarilo verek z varilnimi parametri 170 A, 25 V, 150 mm/min, z bazično elektrodo, ki je bila posušena pri 300° C v trajanju 2^h. Na iztisnjenih valjčkih so bili izvedeni metalografski skuski. Slika 1 prikazuje presek obeh valjčkov in sicer \varnothing 10 mm v dolžini 12,5 in 25 mm.



Slika št. 1

Metalografski presek valjčkov, izvedenih po metodi »IN SITU«

V sredini pod varkom so bile izmerjene trdote, v smeri proti osnovnemu materialu, kar prikazuje diagram 2. Maksimalna izmerjena trdota je znašala 487 HV.

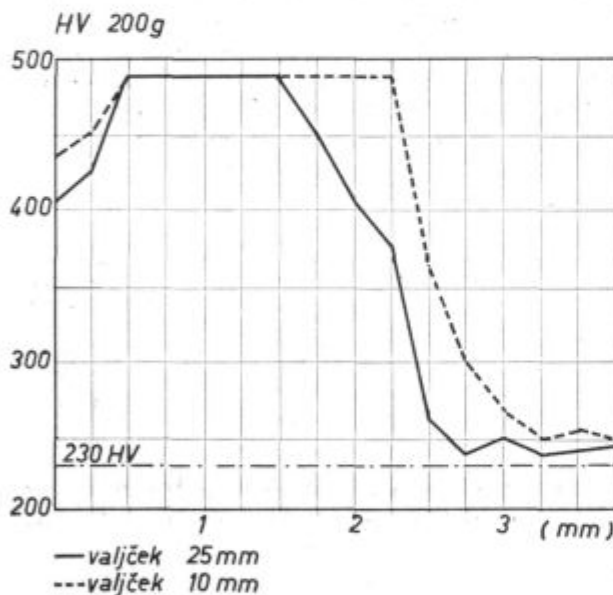


Diagram št. 2

Potek trdote, izmerjene na obeh valjčkih

Izračun trdote (8, 9) nam podaja naslednjo vrednost; po nekem kriteriju IIW, je maksimalna trdota:

$$H_{\max} = (666 \times C_{\text{eq}} + 40) \pm 40 = 420 \pm 40; \text{ velja za trdoto HV } 10 \text{ kg}$$

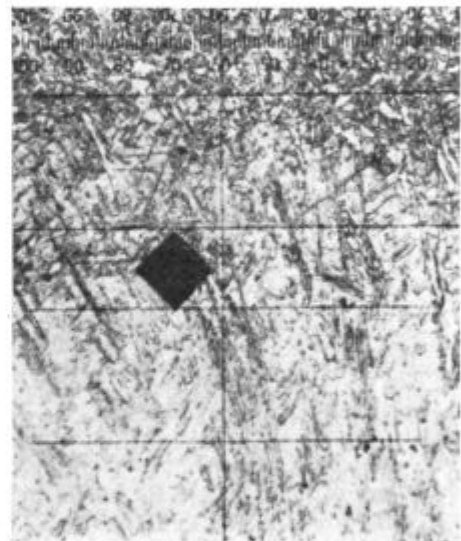
$$C_{\text{eq}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{V}}{14} = 0,57$$

V sredini tik pod varkom sta izvedena tudi metalografska posnetka; na valjčku dolžine

12,5 mm je izvedena slika 2, na valjčku dolžine 25 mm pa slika 3.

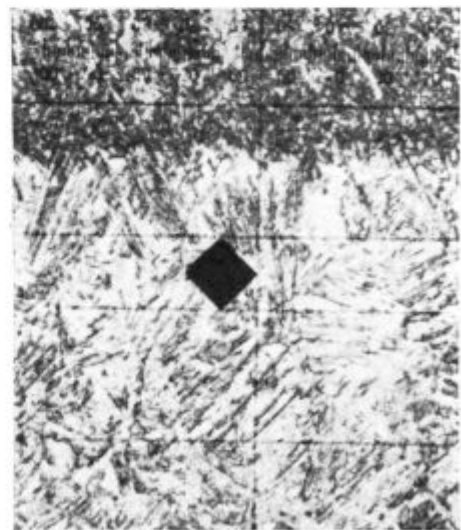
Iz navedenega je razvidno, da imamo v obeh ekstremnih primerih ohlajevanja približno enako trdoto, struktura je v obeh martenzitna, razlika je le v velikosti martenzitnih zrn.

Nujnost pojave nizkoogljičnega martenzita pri poboljšanih jeklih, zahteva zaradi neobičajnosti obširnejšo razlago (10). Pri višje trdnostnih normaliziranih jeklih, dobimo pri preveliki hitrosti ohlajanja v prehodni coni v področju, ki je bilo segreto nad AC_3 točko, višjeogljični martenzit (nizkoogljični martenzit ne dobimo, ker je jeklo prenizko legirano in so ohlajevalne hitrosti za nastanek, prenizke), ki je krhek in se zato pri nor-



Slika št. 2

Metalografski posnetek strukture pod temenskim zvarkom valjčka, dolžine 12,5 mm, povečava $100 \times$



Slika št. 3

Metalografski posnetek strukture pod temenskim zvarkom valjčka, dolžine 25 mm, povečava $100 \times$

maliziranih jeklih poslužujemo predgrevanja predvsem zato, da preprečimo tvorbo martenzita — zaželjene so vmesne strukture, ki imajo dobro žilavost. Obratno pa je pri poboljšanih jeklih, kjer že pri normalnem varjenju ohlajevalne hitrosti omogočajo nastop nizkoogljičnega martenzita, zato ker so kritične ohlajevalne hitrosti za takšno sestavo jekla mnogo nižje, od tistih pri normaliziranih jeklih. Metalurško gledano so krivulje TTT diagrama pri poboljšanih jeklih pomaknjene bolj na desno kot pri normaliziranih.

Iz diagrama št. 3 opazimo primerjavo med žilavostjo martenzita z nizkim in višjim procentom

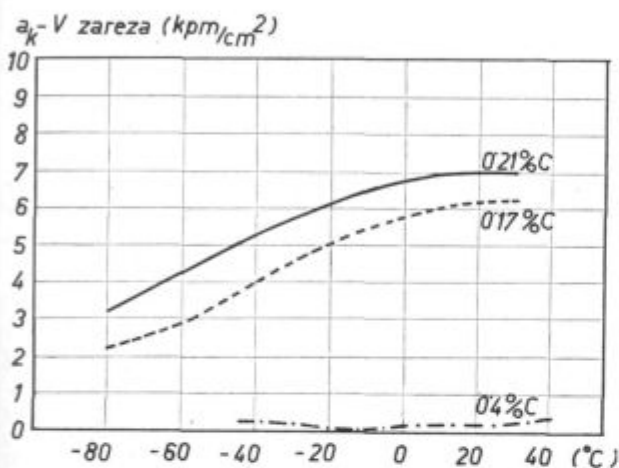


Diagram št. 3

Primerjava žilavosti med jeklom z nizkim in visokim % C v martenzitu pri različnih temperaturah

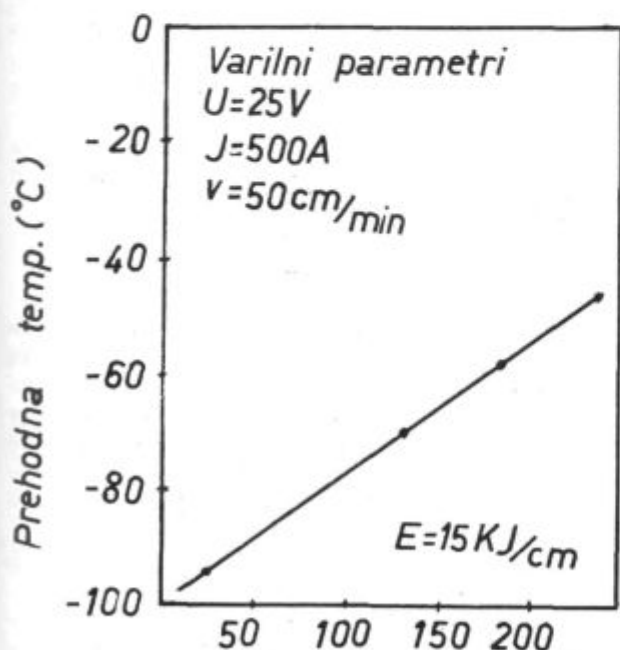


Diagram št. 4

Odvisnost prehodne temperature od delovne temperature pri varjenju

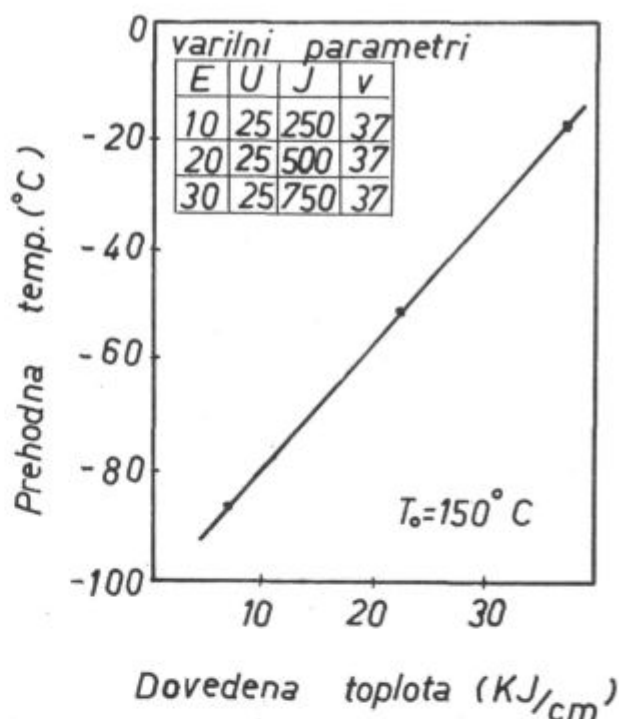


Diagram št. 5

Odvisnost prehodne temperature od vnešene toplote pri varjenju

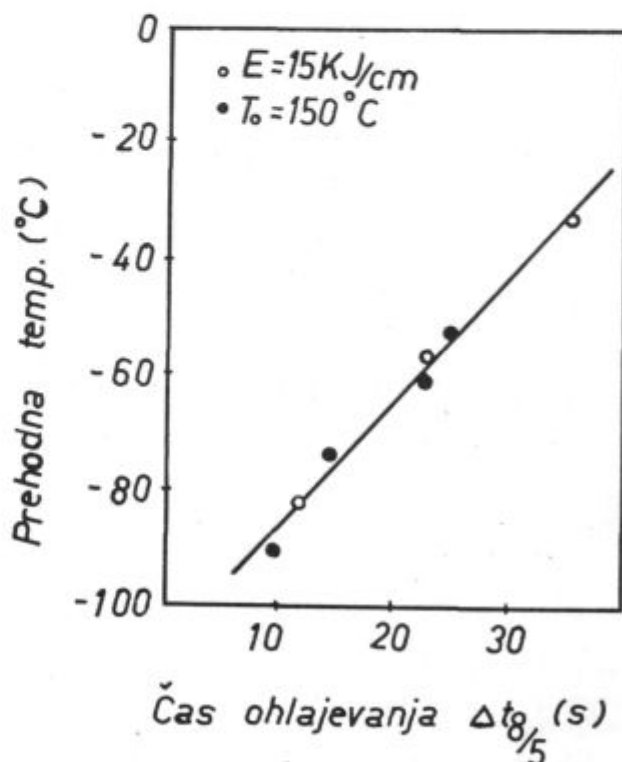


Diagram št. 6

Odvisnost prehodne temperature od ohlajevalnega časa po varjenju

C (10). Martenzit s ca 0,20 % C ima prehodno temperaturo med -50 do -70°C , medtem ko martenzit z 0,4 % C prikazuje prehodno temperaturo nad $+50^\circ\text{C}$.

Ce se sedaj povrnemo k jeklu N-A-XTRA 70, bomo zaradi naštetih trditev stremeli, da pri varjenju v vsakem primeru ustvarimo takšne pogoje, da bo vedno nastopil nizkoogljični martenzit.

Ker je Ms točka za tvorbo martenzita pri tem jeklu šele nad 500°C , moramo te pogoje pri ohlajanju osigurati v intervalu med $800\text{--}500^{\circ}\text{C}$, kar časovno znaša ca. 14—18 sek. Po sliki 2 in 3 lahko sklepamo, da so bili ti pogoji v obeh primerih izpolnjeni, razlika je le v velikosti zrn. Torej lahko trdimo, da čim manjša so martenzitna zrna oziroma čim višja je hitrost ohlajevanja, tem boljša je žilavost in nižja je prehodna temperatura, kar potrjujejo diagrami 4, 5, 6 (15), ki ponašajo žilavost v prehodni coni za N-A-XTRA 70 v odvisnosti od delovne temperature, vnešene energije in ohlajevalne hitrosti.

Kot bomo kasneje videli, ne smemo z nižanjem delovne temperature pretiravati.

2. Določitev količine H₂ v zvaru

Količino H₂ v zvaru izvedenem z elektrodo Tenacito 75 ročno obločno in v zvaru izvedenim s praškom OP 40 TT in žico Ni, Cr, Mo, 2,5 — UP avtomatsko pod praškom je bila določena po DIN 8572 z metodo ekstrakcije.

Elektroda je bila posušena pred določanjem H₂ v zvaru pri 250°C 2^h, varilni prašek pa pri 300°C 2^h. Po 48^h ekstrakcije, so bili za elektrodo Tenacito 75 v bireti komaj opazni sledovi H₂, torej je H₂ v zvaru pod 0,1 ccm/100 gr zvara. V zvaru, ki je bil izveden avtomatsko pod praškom pa je znašala količina H₂ 1,1 ccm/100 gr zvara. S tem pa ni izključena možnost povišanja koncentracije H₂ v zvarni talini pri praktičnem varjenju. Ta povišek je odvisen od atmosferskih pogojev, na katere so poboljšana jekla zelo občutljiva (14) — predvsem korenski varki.

Tudi prisotnost H₂ v zvaru poboljšanih jekel, zahteva obširnejšo razlago. Moderna znanost (12, 13) pripisuje, da je vzrok za nastanek defektov, ki se pojavijo pri ohlajanju pod 200°C ravno v nepravilnem izločanju H₂. Navedeni pojav imenujemo hladno razpokljivost, ki se kaže v mikro kakor tudi v makro obliki. Pri tem pa je važna kritična količina H₂ v zvaru in pa inkubacijska doba, po kateri se razpokljivost pojavlja.

Da se razpokljivosti zvarov, zaradi izločanja H₂ izognemo, predhodno pločevino v okolici (100 mm na vsako stran zvarnega žleba) bodoče zavarjenega zvara predgrejamo, v težjih slučajih pa še zvar nato pogrevamo. Kakšen je efekt vsebnosti H₂ v zvaru, je razvidno iz diagrama 7 (15) in velja za zvar N-A-XTRA 70.

Torej čim nižja je delovna temperatura in višja je vsebnost H₂ v zvaru, tem nižja napetost je potrebna, da pride do pojava razpok. Navedena trditev je torej v nasprotju z diagrami 4, 5 in 6, ki veljajo za idealne pogoje, ko H₂ ni prisoten v zvaru ali pa ko je delovanje H₂ odpravljeno s

TRC-preizkus

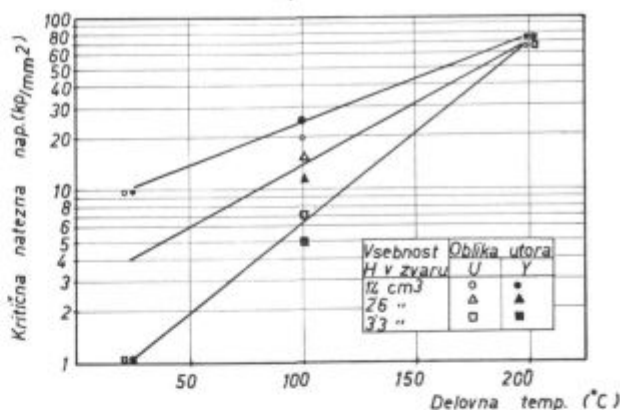


Diagram št. 7

Kritična napetost, potrebna za tvorbo hladne razpokljivosti v odvisnosti od vsebnosti H₂ v zvaru

predgrevanjem na 200°C . Zato je nujno potrebno poznati vsebnost H₂ v zvaru (izvesti preiskave v ambientu, v katerem se praktično vari) ter glede na to vrednost izbrati kompromis med njo, dovedeno toploto in temperaturo predgrevanja.

Ker preiskav v ambientu dejanskega varenja nismo mogli izvesti, smo preventivno predpisali, za kolikor možno zaščitno zvarne taline pred povišano koncentracijo H₂ naslednje omejitve:

- prepoved varjenja, ko se temperatura okolice dvigne nad 30°C in relativna vlažnost nad 80 %;
- sušenje elektrod in praškov se mora vršiti pri temperaturi nad 300°C v času trajanja minimalno 2^h. Posušene elektrode morajo biti vskladiščene pri temperaturi 150°C v prenosni peči na varilčevem delovnem mestu;
- varilni prašek mora potovati direktno iz peči v avtomat;
- ponovno sušenje elektrod in praška, se mora izvršiti, če so bili podvrženi delovanju atmosfere več kot 2^h.

3. Fenomen hladne razpokljivosti

Hladna razpokljivost ali razpokljivost povzročena zaradi H₂ (13) je tipična varilna napaka, ki se pojavlja v prehodni coni ali zvaru v času ohlajevanja. Razlikujemo podzvarne razpoke, ki se v prehodni coni razširjajo vzdolž zvara in korenske ter temenske razpoke, ki so lokalizirane na neena- komernosti zvara, katerih pojav je pospešen z efektom zarez.


Pri opazovanju nastajanja hladne razpokljivosti, moramo zasledovati pogoje ohlajevanja (višina vnešene toplote, oblika zvara, debelina pločevine), ki diktirajo nastop kalilnih struktur; vsebnost H₂, ki prihaja pri varjenju v talino (obloga elektrod, praški, atmosfera, hidratne substance na površini zvarjenja) in napetosti, ki se pojavijo po varjenju v zvarnem spoju. Na kratko so napetosti naslednje: direktne napetosti zaradi krčenja po

ohlajevanju, napetosti zaradi premene iz γ področja, indirektno vpetostne napetosti, ki izvirajo iz nezmožnosti razširjenja ali krčenja ter zunanje napetosti, ki izvirajo iz zaostalih napetosti posameznih konstrukcijskih elementov, iz lastne teže elementov, iz vpetostnih napetosti drugih spojev itd. Nastale napetosti se pri določenih pogojih lahko seštevajo in delujejo na povečanja krhkosti prehodne cone in zvara ter povzročijo dekohezivsko razpokljivost predvsem v zadnjem stadiju ohlajevanja med 800 in 500°C, torej v področju pojavljanja martenzitne premene.

V primeru, da ima jeklo relativno visoki indeks zakaljivosti (presoja po C_{eq} , TTT diagramu, metodi »in situ«) nastopa nagnjenost k hladni razpokljivosti.

Zaradi tega je potrebno izločiti vpliv in dohod H₂ k občutljivim strukturam v prehodni coni ali zvaru. To dosežemo s predgrevanjem in pogrevanjem ter ustrezno vmesno temperaturo, kar je odvisno od tipa jekla, njegove debeline in vnešene toplote. Pri pojavljanju hladne razpokljivosti, ni nujno, da so razpoke vidne na površini in da se pojavijo takoj po varjenju (s tem v zvezi nastopa problem defektoskopskega odkrivanja). Razpoke se v zvaru pojavijo v času do 20^h po varjenju in se lahko ustavijo predno prodrejo na površino.

Izmed metod za določanje hladne razpokljivosti, smo se v okviru možnosti odločili za samovpetostni preizkus Tekken Test (17), ki je primeren za selekcijo varilnih metod, pri tem pa vplivajo na rezultat preizkusa parametri kot so: predgrevanja, vnešena toplota in izbira elektrode. Diagram št. 8 prikazuje % hladne razpokljivosti pri različnih temperaturah predgrevanja. Preizkus je bil izveden na debelini pločevine = 22 mm s karakteristikami, ki so vpisane v tabeli 3 z ročno elektrodo \varnothing 4 mm, varilni parametri so bili 170 A, 25 V,



$$\text{Raz.} = \frac{H_c}{H} \times 100$$

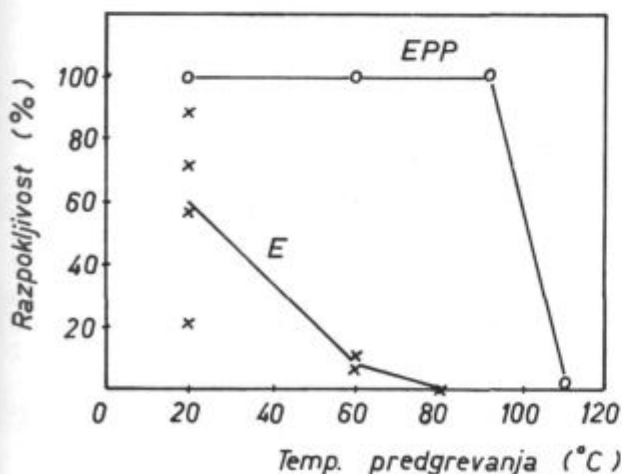


Diagram št. 8

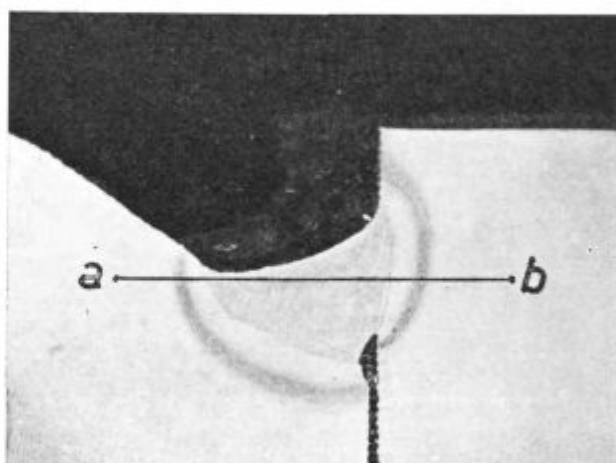
Odvisnost hladne razpokljivosti od temperature predgrevanja pri varjenju

170 mm/min. Nadalje je bil preizkus izvršen avtomatsko pod praškom z varilno žico \varnothing 3 mm s parametri 420 A, 28 V, 450 mm/min.

Sliki 4 in 5 prikazujeta presek preko testnega zvara, izvedenega z ročno elektrodo. Testni zvar na sliki 4 je izveden pri +20°C, na sliki 5 pa pri +100°C. V primeru varjenja testnega preizkusa z ročno obločno elektrodo, se je hladna razpokljivost pojavila v prehodni coni (slika 4), kar je bilo tudi za pričakovati. Hladna razpokljivost v zvaru je v tem primeru bila odpravljena pri predgrevanju nad 80°C.

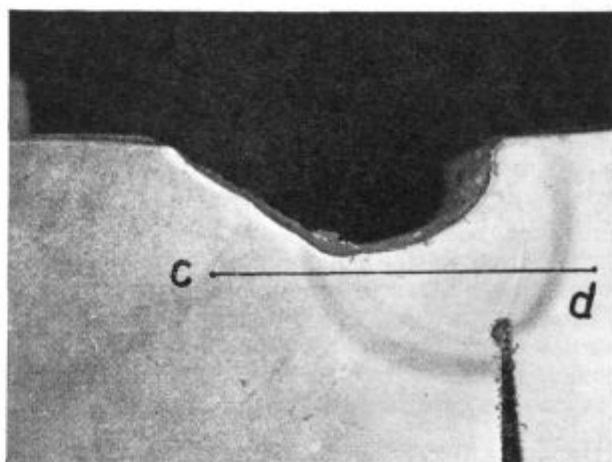
Sliki 6 in 7 pa prikazujeta presek preko testnega zvara, izvedenega avtomatsko pod praškom. Testni zvar je na sliki 6 izveden pri +90°C, na sliki 7 pa pri +110°C. V tem primeru se je nepričakovano pojavila razpokljivost v hladnem v zvaru (slika 6).

Detajlna analiza je podala naslednje zaključke: v primeru ko je bil testni zvar zaključen ročno, je zaradi nižje legiranosti zvara glede na osnovni ma-



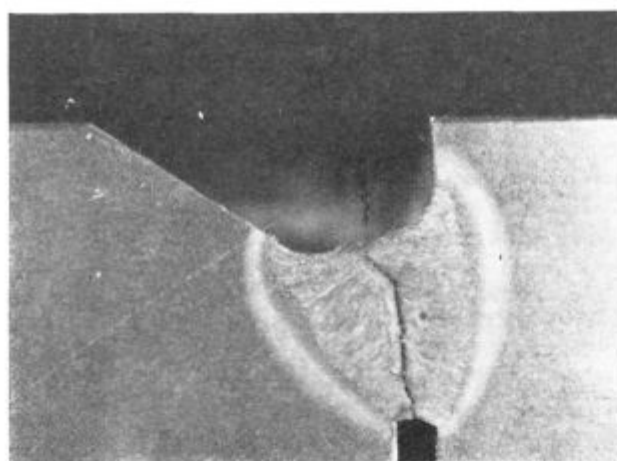
Slika št. 4

Tekken test, izveden za ročno obločno varjenje brez predgrevanja, povečava 3 : 1



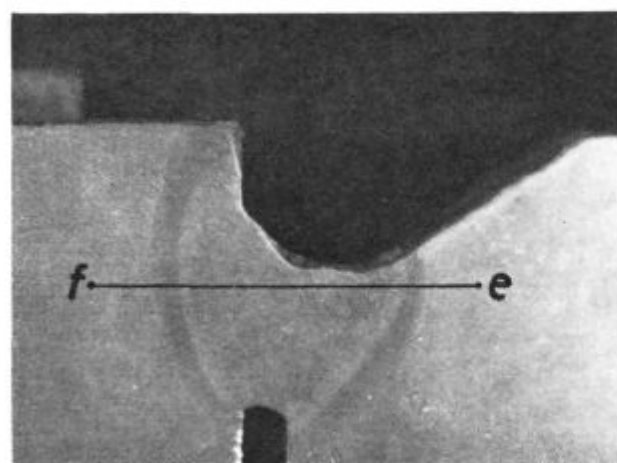
Slika št. 5

Tekken test, izveden za ročno obločno varjenje s predgrevanjem na 100°C, povečava 3 : 1



Slika št. 6

Tekken test, izveden za avtomatsko varjenje EPP s predgrevanjem na 90 °C, povečava 3:1



Slika št. 7

Tekken test, izveden za avtomatsko varjenje EPP s predgrevanjem na 110 °C, povečava 3:1

terial, bila tendenca migracije H₂ v smeri prehodne cone, kjer se zaradi vpetostnih napetosti in trdih struktur pojavijo posledice nepravilnega izločanja H₂ kot hladne razpoke, ki pa so odpravljene z ustreznim nivojem predgrevanja. V primeru avtomatsko izvedenega varka, pa se je zaradi močno legirane varilne žice zvar tako naleziral, da se je na eni strani znižala kritična ohlajevalna hitrost in se je zvar zakalil, na drugi strani pa je tendenca po migraciji H₂ v prehodno cono izravnana, posledica tega je ostajanje H₂ v zvaru in že zaradi naštetih parametrov nastopi hladna razpokljivost v zvaru, ki je odpravljena prav tako z ustreznim nivojem predgrevanja. Diagram 9 prikazuje potek trdot za oba primerja; razvidna je močna razlika v trdoti zvara, izvedenega ročno obločno in zvara izvedenega avtomatsko pod praškom.

Na koncu je poudariti, da samovpetostni preizkusi ne podajajo kvantitativnega vpliva vpetosti na hladno razpokljivost. Temu se približujejo pre-

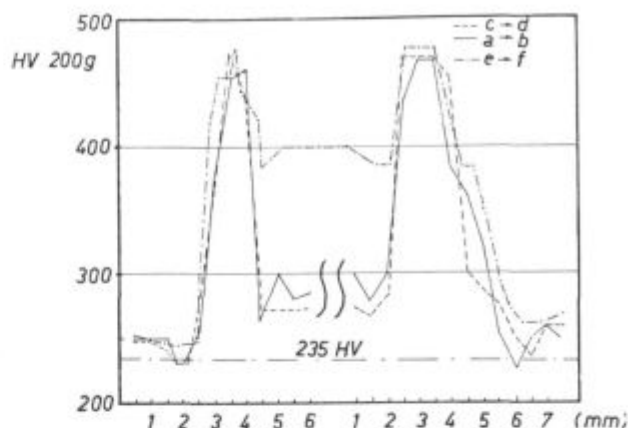


Diagram št. 9

Potek trdote prečno preko zvarov izvedenih po Tekken testu za ročno obločno in avtomatsko varjenje EPP

izkusi, ki kontrolirano lahko spreminjajo vpetost tekom preizkusa kot na primer TRC (Tensile restraint cracking test) ali RRC (Rigid restraint cracking test), ki pa občutno presegajo okvir industrijskega laboratorija (13).

4. Določitev temperature predgrevanja in temperature med varki

S preizkusom na hladno razpokljivost, smo določili temperaturo predgrevanja, nad katero se ta ne pojavi več. Ker je hladna razpokljivost v glavnem odvisna od kemične analize pločevine ali zvara, vsebnosti H₂ v zvaru in vpetosti po varjenju, se temperatura predgrevanja lahko dovolj točno določa z izrazom Ita in Bessya (18).

$$T_{oc} = 1440 \cdot P_c - 392$$

$$P_c = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{t}{600} + \frac{H}{60}$$

t = debelina pločevine (mm)

H = difuzijski H₂ (cm³/100 g zvara)

P_c = 0,34 — za kemično analizo pločevine

P_c = 0,342 za kemično analizo zvara izvedenega avtomatsko pod praškom (0,14 % C; 0,55 % Si; 0,57 % Mn; 1,57 % Ni; 0,88 % Cr; 0,44 % Mo).

Po tem izrazu izračunana minimalna temperatura predgrevanja znaša ca 79° C za ročno obločno varjenje in ca. 101° C za varjenje avtomatsko pod praškom. Za oba primerja smo izbrali temperaturo predgrevanja 110° C s predpostavko, da debelina pločevine ne preseže 22 mm in da je vsebnost H₂ pod 1,5 ccm/100 g zvara. Ta temperatura predgrevanja predstavlja spodnjo mejo pod katero se varjenje ne sme izvrševati.

Omenjeni izraz je nastal zaradi netočnosti določanja varivosti in temperature predgrevanja na osnovi C_{eq} in trdote v prehodni coni. Veljalo je

namreč načelo, da čim višji je C_{eq} in maksimalna trdota v prehodni coni, tem večja je možnost nastopa hladne razpokljivosti. Da je to mnenje nevzdržno dokazuje dejstvo, da jekla z enakim C_{eq} pri različnih debelinah in vsebnosti H₂ v zvaru, kažejo različno nagnjenost k hladni razpokljivosti.

SATOH (19) je s sodelavci postavil nomograme za različne debeline pločevin, različne vnešene toplote in različne izraze P_w na osnovi katerih se lahko temperatura predgrevanja odčita. Diagram št. 10 prikazuje nomogram, ki je našemu primeru najbližji in v katerega so vnešeni naši podatki.

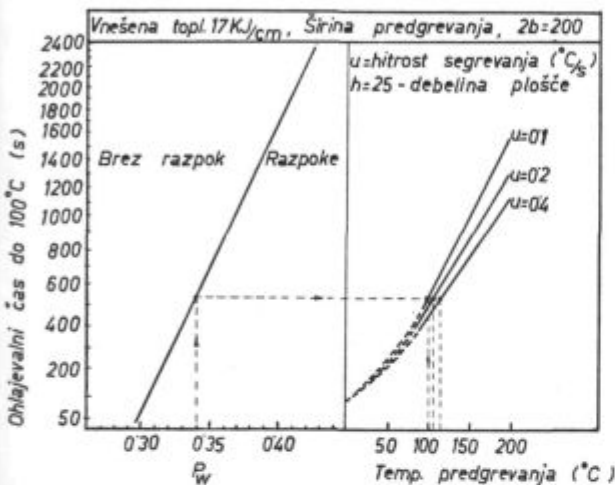


Diagram št. 10

Nomogram za določanje predgrevanja pred varjenjem za N-A-XTRA 70

$$P_w = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{H}{60} + \frac{40 \times 10^3}{K}$$

K = faktor vpetosti; pri y vpetostnem preizkusu postane tretji faktor $\frac{K}{40 \times 10^3} \approx \frac{t}{600}$ in s tem P_w enako P_c

5. Določitev zgornje in spodnje meje vnešene toplote

Dovedena toplota v zvar je odvisna od varilnih parametrov t. j. od napetosti, jakosti in hitrosti pomika. Pri tem je potrebno še upoštevati izkoristek, ki znaša pri varjenju pod praškom 0,9, pri ročnem obločnem varjenju pa 0,8.

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v} \text{ (Joule/cm)}$$

Kot smo že spredaj omenili, moramo v prehodni coni zagotoviti takšne pogoje, da bomo v vsakem primeru dobili žilavi nizkoogljični martenzit. Če to ni primer, potem zaradi prevelike dovedene toplote, dobimo v prehodni coni krhki martenzit z visoko prehodno temperaturo, v slučaju prenizke

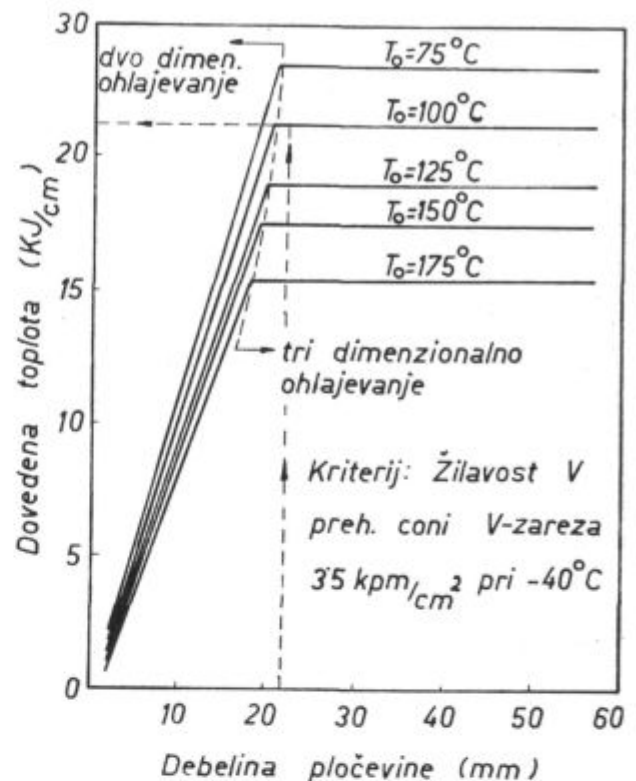


Diagram št. 11

Dovedena toplota v odvisnosti od debeline pločevine; razmejitev med dvo- in trodimenzionalnim ohlajevanjem

dovedene toplote pa trde strukture, ki so občutljive že na zelo nizke količine H₂ in to predvsem pri korenskih varkih.

Tyssen (11) je za jekla tipa N-A-XTRA izdelal diagrame, po katerih je glede na izbrano temperaturo predgrevanja možno določiti mejo zgornje in spodnje dovedene toplote, ki ustreza določeni debelini pločevine in zagotavlja ohlajevanje med 800 in 500° C v času 14–18 sek., kar daje duktilen in žilav martenzit z zelo nizko prehodno temperaturo. Diagram št. 11 prikazuje področje maksimalno dovedene toplote za naš primer.

Glede na dovedeno toploto, se morajo izbrati ustrezni parametri, ki se nastavijo na varilnem stroju. Iz diagrama je razvidno, da je potrebno biti posebno previden pri debelinah pod 22 mm, kjer je ohlajevanje v pločevinah dvodimenzionalno, torej počasneje in se morajo uvajati znatno nižje toplote, da ohranimo ohlajevalni kriterij. Nadalje je razvidno, da vnešena toplota pri debelini 20 mm naj ne presega 22.000 J/cm. Za naš primer smo si določili področje vnešene toplote, pri temperaturi predgrevanja in temperaturi med varki 110° C v območju 15.000–21.000 J/cm.

6. Ocenitev zvara na razpokljivost v vročem

Za ugotavljanje tega fenomena, ki se pojavlja v vročem t. j. v področju strjevanja zvara, smo uporabili Schnadtov Fisco test (17). Eutektik Fe—FeS ima tališče pri 988° C in je glavni povzročitelj

toplotnih razpok. Od vrste elektrode pa je odvisno koliko je v stanju FeS in druge nekovinske vključke iz zvara odžlindrati in zagotoviti odporost proti razpokljivosti v vročem. Razpokljivost v vročem je nato izhodišče za razpokljivost v hladnem in moramo glede na to dodajni material klasificirati. Varjenje na preizkušancu, je potekalo z razmakom: 1, 2, 3 in 4 mm.

a: razmak v korenu		N-A-XTRA 70		d=22mm	Oblika utora		
f _a : razpok. v vročem %		Sestava:		60°			
f _b : razpok. v hladnem %		017C, 066Si, 085Mn, 0020P		a			
Elektroda	a	f _a	f _b	0016S, 0034Al, 076Cr, 035Mo			
Tenacito 75	1	0	0	56	53	51	57 mm
"	2	0	0	60	40	46	45 mm
"	3	0	0	53	52	57	57 mm
"	4	10	0	59	53	50	51 mm
				21			

■ razpokljivost v vročem

Tabela št. 4

Rezultati Fisco testa za ročno obločno varjenje

Tabela 4 prikazuje % razpokljivosti v vročem in hladnem pri različnih razmakih v utornem žlebu za elektrodo Tenacito 75. Kot je razvidno, je elektroda zelo odporna proti toplotni razpokljivosti, hladna razpokljivost pa se v nobenem primeru ni pojavila.

Nasprotno pa tabela 5 prikazuje, da je kombinacija praška OP 40 TT z varilno žico Ni Cr Mo 2,5 UP bolj občutljiva na razpokljivost v toplem. Že pri stiku brez razmaka v korenu, je nastal določen % razpokljivosti v vročem, ki je potem bil neposreden inicijal za razpokljivost v hladnem. Varjenje s takim dodajnim materialom torej zahteva zelo pazljivo izdelano tehnologijo, ker lahko to kombinacijo označimo kot občutljivo na razpokljivost v vročem in hladnem, kar je bilo opazno že po diagramu 8.

IIW (5) je uvedel pojem toplotne razpokljivosti v prehodni coni ali likvacijsko razpokljivost. Za-

a: razmak v korenu		N-A-XTRA 70		d=22mm	Oblika utora			
f _a : razpok. v vročem %		Sestava:		60°				
f _b : razpok. v hladnem %		017C, 066Si, 085Mn, 0025P		a				
Elektroda	a	f _a	f _b	0016S, 0034Al, 076Cr, 035Mo				
CrNiMo-25UP OP40TT	0	35	924	75	165	26	385	4
"	05	210	970	109	534	54	54	5
"	1	232	100	132	15	5	51	5
				508	57	51	58 mm	
				18	15	136		
				70	70	58 mm		

■ razpokljivost v vročem
▨ razpokljivost v hladnem

Tabela št. 5

Rezultati Fisco testa za avtomatsko varjenje EPP

radi dovedene toplote, se na mejah γ zrn pojavi penetracija (ovlaženje zrn) nizko taljivih faz. Ko se γ zrna ohlajajo, so postopoma podvržena plastični deformaciji, zaradi naraščanja nateznih napetosti, ki izvirajo iz krčenja. Ker je film nizko taljivih komponent tanek in je njegov odpor proti plastični deformaciji nizek glede na tistega, ki ga nudijo γ zrna, nima možnosti, da deformacijo absorbira — posledica je razpoka. Navedena napaka lahko prav tako služi kot inicijal za hladno razpokljivost in sprožitev krhkega loma, zato jo omejujemo s pravilno izbiro osnovnega in dodajnega materiala (nizek P in S, C in Si omejena). V našem primeru nagnjenosti k likvacijski razpokljivosti v prehodni coni, nismo opazili.

7. Ocenitev nagnjenosti zvara in prehodne cone napram krhkosti ter razširjanje krhkega loma

Nagnjenost h krhkemu lomu (20) (Brittle fracture initiation) je v neki strukturi določena v trenutku, ko so doseženi kritični pogoji (nezmožnost deformacije materiala) na koncu neke prisotne zareze ali kvazi razpoke. Pri tem je potrebno poudariti, da se katerikoli lom vedno prične na nezveznosti v strukturi, ki praktično deluje kot zarez.

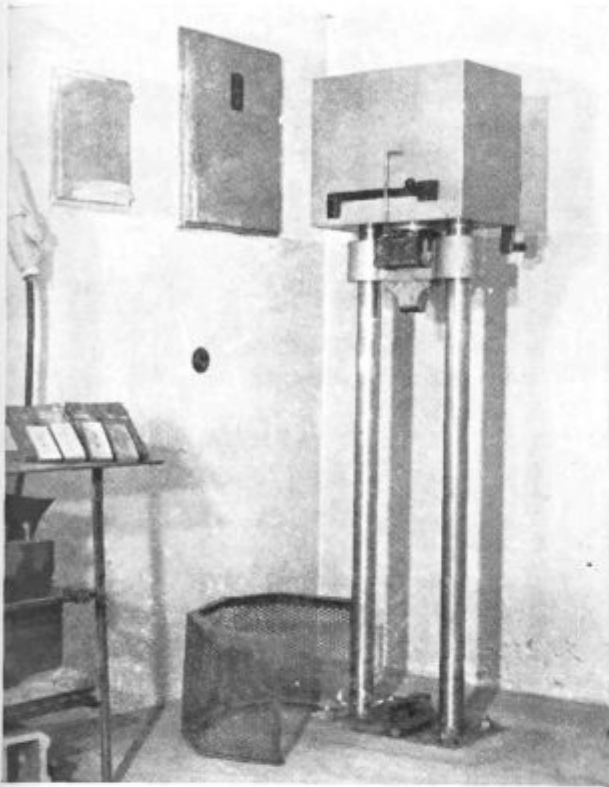
Na razširjanje krhkega loma imajo vpliv naslednji faktorji: temperatura, efekt debeline, vrsta mikro strukture kakor tudi velikost zrn, efekt staranja itd. Vsi navedeni faktorji zmanjšujejo področje okoli zareze, ki se še lahko plastično deformira. Predvsem pa prisotnost napetostnega polja, zarez in nizka lastna žilavost materiala istočasno, dajejo tipično nagnjenost h krhkemu lomu. V zvarih je področje zvara in prehodne cone nagnjeno k razširjanju krhkega loma predvsem zaradi:

- zunanje obtežbe;
 - varilnih zaostalih napetosti;
 - geometrijskih zarez;
 - napak varjenja;
 - pokljivosti v prehodni coni in zvaru;
- } efekt zareze

Praktični pomen določanja nagnjenosti h krhkemu lomu na preizkušancih je, reproducirati kolikor se da mogoče razmere, ki vladajo v korenu najbolj možnih prisotnih napak. Pri tem so rezultati preiskav po navadi izraženi s prehodno temperaturo (Transition temperature) tj. tisto temperaturo, ki jo podaja razlika med nizko in visoko zmožnostjo plastične deformacije. Preizkuse delimo v statične (Wide plate test, COD test, Linear elastic fracture test itd.) in dinamične (Drop weight test, Niblink test, Linear elastic fracture Mechanics test).

Ker je v našem primeru dinamična obremenitev v računu vzeta ca $x = 0,8-0,9$ smo se odločili za ocenitev nagnjenosti krhkega loma zvara in pre-

hodne cone po Drop weight testu — ASTM E 208 — 66 (21) in Pellinijevi teoriji (3, 22) napovedovanja krhkega loma. Aparaturo prikazuje slika 8.



Slika št. 8

Aparaturo za določanje prehodne temperature po metodi Drop Weight test — P 3

Po Pelliniju je NDT (Nil. Ductility Transition) temperatura tista temperatura, pri kateri preizkušane se ravno krhko poče. V Pellinijevem diagramu 12, ki je razdeljen v tri polja znaša razlika med NDT in CAT ca. 33° C.

NDT - Nil Ductility Transition
FTE - Fracture Transition El.
FTP - Fracture Transition Pl.
CAT - Crack Arresting temp.

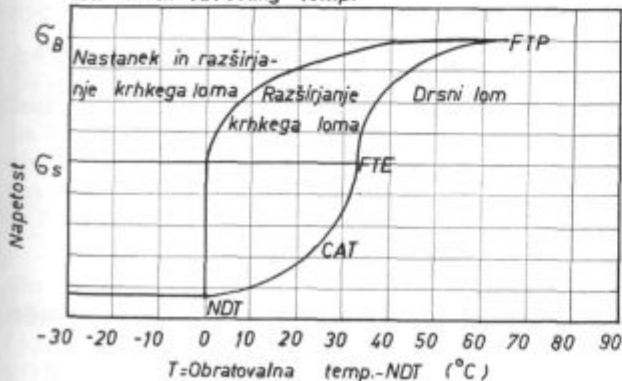


Diagram št. 12

Razmejitev med krhkim in duktilnim področjem lomov po Pelliniju

Če torej leži delovna temperatura objekta ca. 30° C nad NDT, potem ni nevarnosti, da bi nastopili krhki lomi, če pa je diferenca večja od 30° C, potem so pa krhki lomi izključeni.

V našem primeru znaša najnižja delovna temperatura + 5° C; v diagramu 13 so vnešeni rezultati preiskav NDT za zvar in prehodno cono v primeru ročno obločnega in varjenja avtomatsko pod praškom.

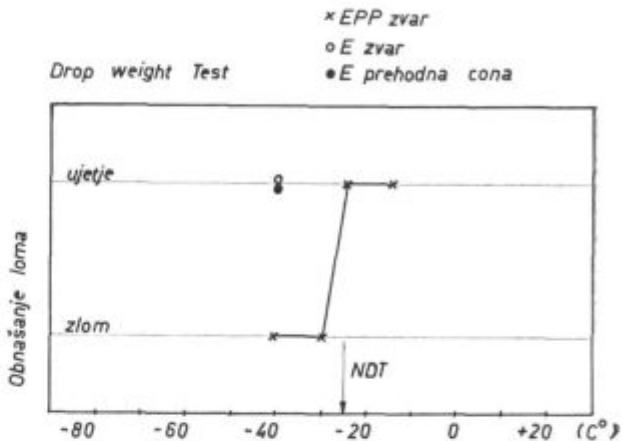


Diagram št. 13

Rezultati preiskav po Drop Weight testu — P 3, za zvar in prehodno cono

Iz diagrama 13 je razvidno, da sta zvar in prehodna cona v primeru ročno obločnega varjenja z elektrodo Tenacito 75 neobčutljiva za pojavljanje krhkega loma, saj se potujoča razpoka ujame še pri -40° C. V primeru varjenja avtomatsko pod praškom z varilnim prahom OP 40 TT in varilno žico CrNiMo 2,5 - UP pa dobimo prehodno temperaturo za NDT pri -25° C, kar nam, če ta podatek vnesemo v diagram 12, ravno še zagotavlja varnost proti nastopanju krhkega loma.

V zahtevnih in mejnih primerih kot je naš v primeru varjenja avtomatsko pod praškom, je potrebno poleg zgornje ugotovitve oceniti, kako bi se krhki lom razširjal, če bi nastopil in kakšna je možnost, da bi ga osnovni material, zvar ali prehodna cona ujeli (Arrest properties) (17). Krhki lom, ki se razširja, se ne ustavi, dokler:

- se ne zniža napetostno polje;
- se ne pojavi velika plastična deformacija: zaradi narastka temperature, znižanja debeline pločvine in dokler razpoka ne vstopi v bolj žilav material.

Praktična preiskava mora biti torej takšna, da določa temperaturo, nad katero se v preizkušancu in v dejanski konstrukciji ne razširjajo krhke razpoke. Dobljeno temperaturo imenujemo temperaturo ujetja (Arrest temperature). Med najbolj znanimi velikimi preizkusi (Large scale) so Robertson test, Double tension test, COD, Explosion bulge test itd.

Tabela 6

Elektroda	σ_s kpm/mm ²	σ_B kpm/mm ²	δ_5 %	Žilavost V-zareza kpm/cm ²	Kemična analiza
Tenacito 75,	66 — 70	72 — 76	20 — 24	14 pri + 20° C 12 pri 0° C 10 pri - 20° C 8 pri - 40° C 5 pri - 60° C	0,07 C; 1,4 — 1,6 Mn 0,55 — 0,65 Si; 0,2 — 0,3 Cr; 1,7 — 1,9 Ni; 0,2 — 0,3 Mo;
NiCrMO 2,5-UP + OP 40 TT,	65 — 70	78 — 82	18 — 21	13 pri + 20° C 12 pri 0° C 11 pri - 20° C 10 pri - 40° C 8 pri - 60° C	0,05 — 0,07 C; 0,7 — 0,9 Mn; 0,15 — 0,30 Si; 0,40 — 0,60 Cr; 2,2 — 2,5 Ni; 0,4 — 0,6 Mo;

Za prašek in elektrodo velja sušenje pred uporabo pri 300 — 350° C 2 — 4h.

Tabela št. 6
Mehanske lastnosti čistega zvara, izvedenega ročno obločno in avtomatsko EPP

Ker taki preizkusi občutno presegajo okvir industrijskega laboratorija, nismo mogli v tej smeri izvesti preiskav. Zadovoljili smo se s podatki, ki nam jih je v tej smeri podal proizvajalec pločevine.

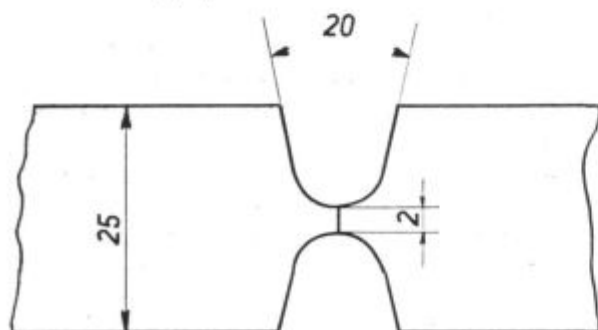
LASTNOSTI DODAJNEGA MATERIALA

Pri varjenju jekla N-A-XTRA 70 smo uporabili za ročno varjenje visokobazično elektrodo Tenacito 75, varilno žico NiCrMo 2,5-UP in varilni prašek OP 40 TT za varjenje avtomatsko pod praškom po DIN-u 8557-8b536. V tabeli 6 je prikazana analiza čistega zvara.

VARJENJE NA PREIZKUSNEM VZORCU

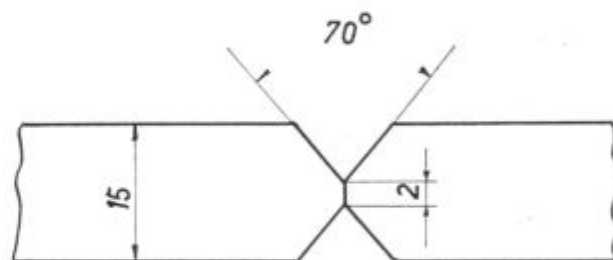
Da bi preverila usklajenost pločevine kvalitete N-A-XTRA 70 z dodajnim materialom za ročno in avtomatsko varjenje, sta bila zavarjena 2 preizkusna vzorca. Robovi za varjenje so bili po projektu določeni kot sledi:

Za ročno varjenje



Predgrevanje 140° C, ročno - obločno var.

Za avtomatsko varjenje



Predgrevanje 110° C, avtomatsko EPP.

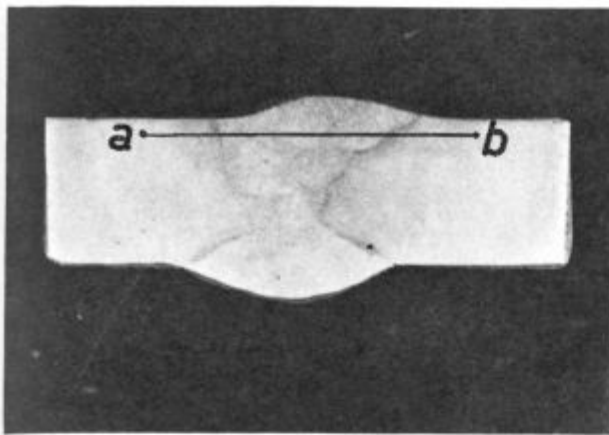
Temperatura, ki je navedena za predgrevanje je bila v enaki višini vzdrževanja med samim varjenjem. Po varjenju je sledilo pogrevanje 1—2h pri ca. 200° C. Iz preizkusnih vzorcev so bili izrezani preizkušanci za konvencionalne preiskave, ki so bile zahtevane po pogodbi in katerih rezultati so na tabeli 7

Način varjenja	Šarža	Oblika epruvete	G_s - kpm/mm ²	G_B - kpm/mm ²	Upogib D=4a	Žilavost, 0° C V-zareza - kpm/cm ²
avtomatsko	136322		75,2 74,0	84,0 88,9	180°	11,2 10,2 10,2
ročno	"		-	81,0 83,1	180°	8,7 8,5 6,2

- natezni preizkus s paralel. boki
 - natezni preizkus z vrtimi boki
 P - zareza v prehodni coni
 S - zareza v sredini zvara

Tabela št. 7
Mehanske karakteristike zvara po preizkusnem varjenju

Oba makro posnetka — slika 9 in 10 prikazuje ta prečni presek preko obeh zvarov. Na diagramu 14 so izmerjene trdote za oba primera.



Slika št. 9

Prečni presek preko zvara, izvedenega avtomatsko EPP

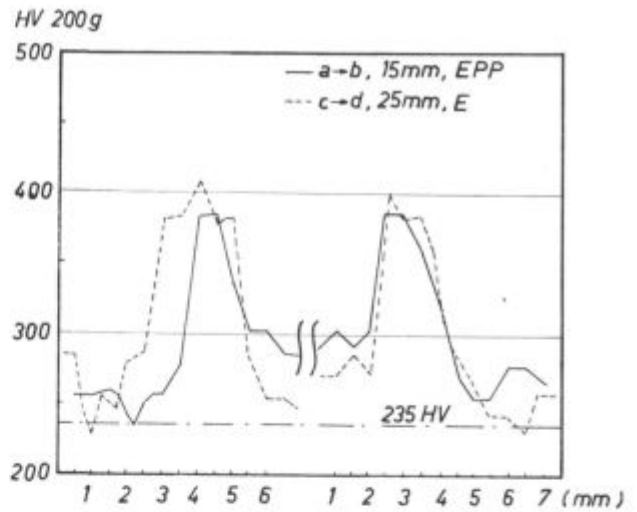
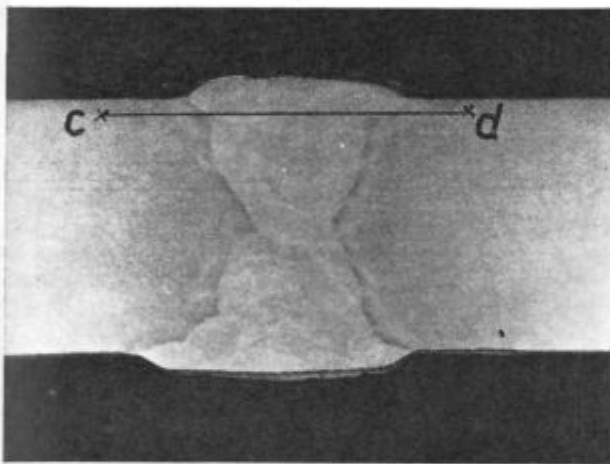


Diagram št. 14

Potek trdote, izmerjene preko obeh prečnih presekov



Slika št. 10

Prečni presek preko zvara, izvedenega ročno E

PROBLEMATIKA VARJENJA

Na osnovi sprednjih razglabljanj in preiskav, je bil določen tehnološki postopek dela pri varjenju cevovoda, ki je vseboval vsa detajlna navodila, da bi se preprečile večje napake in da bi se varjenje odvijalo v ozko dovoljenem območju.

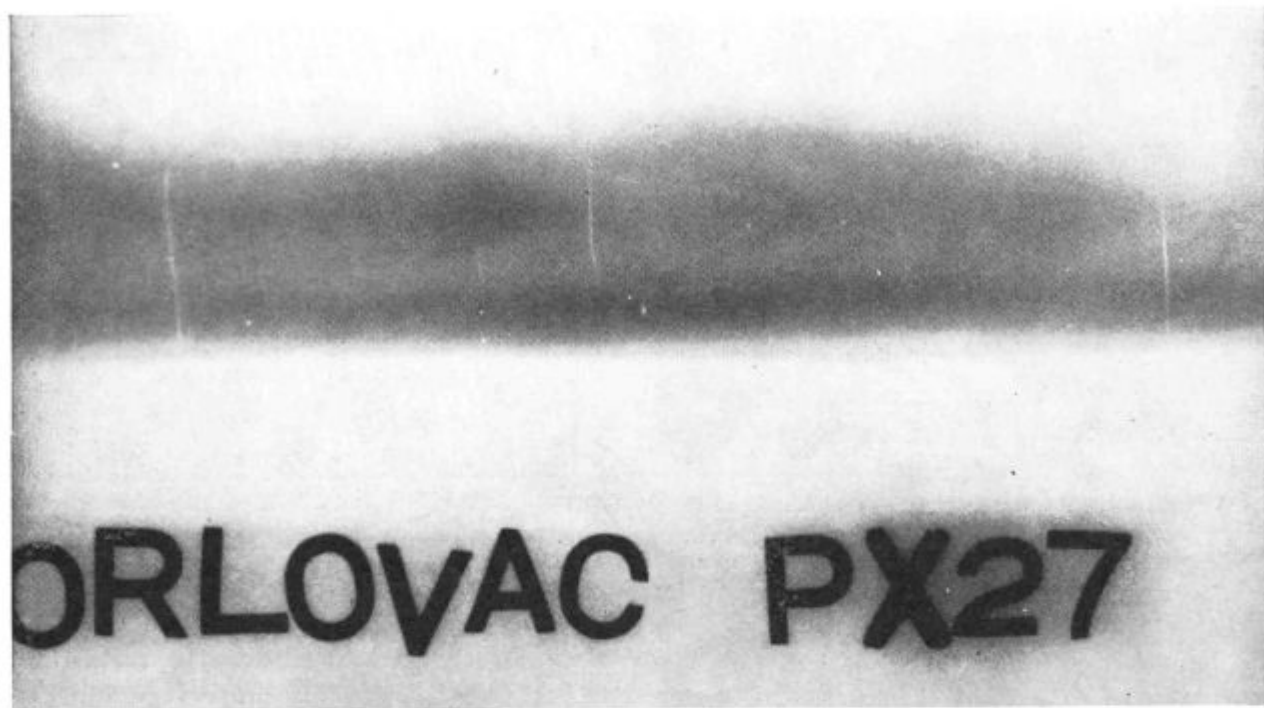
— Kljub vsej pazljivosti pa se zaradi različnih vzrokov predvsem v začetku varjenja pripetijo lahko spodrsaljaji. Defektoskopija prvega zvara, ki je bil zavarjen v delavnici avtomatsko pod praškom, je prikazala prečne razpoke v zvaru, kar je razvidno iz radiograma na sliki 11, in ki na površini niso bile vidne.

Detajlna analiza tega primera je pokazala naslednje vzroke: Varjenje je bilo izvedeno ko je bila relativna vlaga zelo visoka, dodatni material ni bil posušen do zadovoljive mere in temperatura predgrevanja je bila glede na vnešeno toploto prenizko izbrana. Posledica takega režima dela je bila ta, da je trdota zvara zaradi prehitrega ohlajevanja narasla na 350 — 390 HB. Zaradi višje legiranosti

zvara napram osnovnemu materialu — vsebnost Ni ca. 2,3, ki ima težnjo pomikanja AC₃ točke proti nižjim temperaturam, je tendenca H2, da ostaja v zvaru in ne migrira v prehodno cono. Posledica tega so (istočasno so prisotni trije škodljivi faktorji: povišana trdota, povišana koncentracija H2 v zvaru, vpetostne napetosti (10), hladne prečne razpoke v zvaru, ki so vidne na radiogramu ali ugotovljene z ultrazvokom. Z možnostjo nastopa takega tipa napak v zvaru, nastaja problem ugotavljanja in lociranja hladnih razpok. Radiografska metoda je uspešna, dokler se fenomen pojavlja v makro obliki, postane pa neuporabna tj. na radiogramu fenomena ne moremo več zaznati, če je v mikro obliki. V takem primeru preostane samo ultrazvočna kontrola, ki pa zahteva posebno izvežbanost in natančnost pri justiranju in kasneje pri samem pregledu.

— Na drugi strani pa preži nevarnost, ki pa jo z neporušeno defektoskopijo ne moremo odkriti in sicer kadar varimo pločevine tanjših debelin (< 20 mm). V takem primeru obstoja možnost prevelikega dovoda toplote, kar lahko prinese nepravilne posledice. Zvar zaradi prepočasnega ohlajevanja ne more doseči predpisane trdnosti, prehodna cona v predelu, kjer nastopa martenzit, postane krhka in predel osnovnega materiala, ki je bil podvržen temperaturi, ki je nad temperaturo popuščanja in pod AC₁ pločevine, pa se razširi in seveda zmeha. Da omenjene negativne posledice vsaj lahko ugotavljamo, je potrebno, da se pri vsaki cevi zavarijo v podaljšku iztečni preizkušanci, na katerih se morajo izdelati trgalni, upogibni in žilavostni preizkusi. Primarno pa je potrebno imeti točno in vestno kontrolo nad parametri varjenja in predgrevanja, ker vsako odstopanje v smeri povišanja dovedene energije privede do nepopravljivih posledic.

— Napetostno žarenje zvarov pri tej kvaliteti ni priporočljivo in tudi ni bilo izvedeno. Preizkusi,



Slika št. 11

Prečni presek preko zvara, izvedenega ročno obločno

ki so bili izvedeni v tej smeri (2) to potrjujejo, saj po napetostnem žarjenju se mehanske lastnosti prehodne cone znižujejo. Kot primer naj navedemo, da znaša prehodna temperatura dobljena z Robertsonovim testom (Large scale) za prehodno cono — 55° C, če napetostno žarjenje po varjenju ni izvršeno, dvigne pa se po napetostnem žarjenju na —35° C. Enako potrjujejo tudi žilavostni preizkus, Drop weight test in Kohaerazie preizkus (Small scale).

— Za doseg popuščenih efektov in znižanje trdotnih konic v prehodni coni, ki jih povzročijo zadnji temenski varki in s tem zmanjšanje efekta zarez, ki na prehodu zvar — osnovni material vedno nastopajo, smo upoštevali tehnološki prijem (8) pravičnega zaključevanja varjenja na temenu zvara in to tako, da je zadnji varek izveden na sredini temena in tako termično vpliva na spodnje varke in njih prehodne cone.

ZAKLJUČEK

Pred pričetkom varjenja poboljšane tipa jekla je v grobih obrisih potrebno upoštevati naslednje:

— potrebno je določiti nivo dovedene toplote. Posebno je pri tem potrebno upoštevati prehod iz dvodimenzionalnega v trodimenzionalno ohlajevanje.

— Glede na vsebnost H₂ v zvaru, ki je izveden ročno obločno in avtomatsko pod praškom je potrebno določiti temperaturo predgrevanja, temperaturo med varki ter temperaturo pogrevanja.

— Da bi dosegli optimalne mehanske lastnosti zvara in prehodne cone je potrebno s preizkusi določiti kompromis med dovedeno toploto v zvar in temperaturo predgrevanja. Z drugimi besedami potrebno je dovesti tolikšno količino toplote, da se žilavost zvara in prehodne cone ne zniža, pri tem pa da ostane še jamstvo proti nastopanju hladne razpokljivosti.

— Potrebno je izvršiti selekcijo dodatnega materiala glede na razpokljivost v vročem in na likvacijsko razpokljivost v prehodni coni.

— Glede na delovno temperaturo, v kateri bo objekt obratoval in glede na vrsto obremenitve, kateri bo podvržen, je bistvene važnosti, da že pred pristopom k varjenju določimo njegovo prehodno temperaturo, nad katero se ne bodo pojavljali in razvijali krhki lomi. Poudariti je potrebno, da mora biti prehodna temperatura, (Large scale, Small scale), v vsakem primeru pod najnižjo delovno temperaturo objekta. Omenjeno velja za osnovni material, zvar in prehodno cono.

Literatura

1. Vd TÜV — Vorläufiges Werkstoffblatt 257/66 — Hochfeste vergütete Sonderbaustähle HOAG N-A-XTRA 55, 60, 65, 70.
2. B. Müssgen, J. Degenkolbe: Erfahrungen mit wasservergüteten C1MoZr-legierten Baustählen; Molybden — Dienst 70/71.
3. T. Varga, W. Felix, W. Müller: Die Eigenschaften von Schweissverbindungen aus vergüteten Baustählen; Schweisstechnik Zürich 5/70.
4. J. Degenkolbe: Vergleich von Sprödbruchprüfverfahren; Sonderdruck aus der Zeitschrift TU Bd 10/69.

5. IIW Document IX-766-71: Questionnaire on the use of type testing for assessment of weldability and resistance to brittle fracture.
6. H. Granjon, S. Debiez, R. Gaillard: Nove metode, rezultati in perspektive pri določanju varivosti jekel; predavanja na Zavodu za varjenje, Ljubljana 1967.
7. J. Žvokelj: Presoja kaljivosti jekel pri varenju; *Železarski zbornik* 4/69.
8. S. Anik: Hardness distribution in the heat affected zone of heat treated high strength steels; IIW document II-402-66.
9. IIW Document IX-747-71: Some observation on weldabilities of thick high strength steels and welding procedures applying to steel structures for civil engineering.
10. J. Degenkolbe, B. Müsngen: Schweißen hochfester vergüteter Baustähle, Untersuchungen an Cr-Mo-Zr legierten Stählen.
11. Tyssen, Stranski institut für Metallurgie, Abteilung Werkstoffkunde, Schweisstechnik — 1971; Empfehlungen für das Schweißen von N-A-XTRA.
12. H. Kihara: Welding cracks and notch-toughness of heat-affected zone in high-strength steels; 1968 IIW HOUDREMONT LECTURE.
13. Salkin: IIW Document IX-766-71: Type tests to assess the sensitivity to cold cracking.
14. H. Oba, S. Susei, Y. Fujishiro: IIW Document IX-747-71: Some observation on weldabilities of thick high strength steels and welding procedures applying to steel structures for civil engineering.
15. Degenkolbe, D. Uwer: Erfahrungen beim schweißen wasservergüteter Stähle mit Streckgrenzen von 47 bis 90 kp/mm². Tyssen — Stranski Institut für Metallurgie, Abteilung Werkstoffkunde — Schweisstechnik 71.
16. H. Suzuki: On the use of high strength steels in Japan; IIW colloquium commission IX — Stockholm 71.
18. Y. Ito, Bessyo: Weldability formula of high strength steels; IIW Document IX-576-68.
19. K. Satoh: Determination of preheating conditions to avoid weld cracking in steel constructions; IIW Document IX-730-71.
20. Cepolina: Type tests to assess-sensitivity towards brittle fracture; IIW Document IX-766-61/IXF-71-20.
21. ASTM E2 08-66T: Conducting drop-weight test to determine Nil. — ductility transition temperature of ferritic steels.
22. W. E. Müller: Druckrohrleitungen neuzeitlicher Wasserkraftwerke; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1968.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel werden die Probleme beim Schweißen des vergüteten Konstruktionsstahles des Types N-A-XTRA behandelt. Dieser vom Thyssen stammende Stahl ist für eine Druckrohrleitung von 2500 mm Durchmesser angewendet worden. Probleme welche beim Schweißen eines solchen Stahles auftreten, sind hauptsächlich nicht von Stahltyp und von dem Stahlerzeuger abhängig, weil die nach bestimmten Kriterien gelöst werden müssen, welche für alle hochfesten Stähle gemeingültig sind. Wir sind der Meinung, dass ähnliche Probleme auch bei den einheimischen vergüteten Stählen, welche noch im Entwicklungsstadium sind, auftreten werden.

Die Betonung gilt den Schwierigkeiten mit welchen sich der Erzeuger der schweren Konstruktionen bei der Auswahl des Schweißzusatzmaterials befassen muss, denn das Problem ist mit einem einwandfrei erzeugtem Stahl, noch lange nicht gelöst. Ausser der projektiven Ausführung muss aus Sicherheitsgründen noch die technologische Ausführung der Konstruktion gewährleistet werden. Bei der Ausführung einer schweren Konstruktion können verschiedene Einflussfaktoren auftreten, welche bei der statischen Berechnung nicht eingefasst oder vorgesehen werden können. Die moderne Wissenschaft versucht in dieser Richtung mit verschiedenen Prüfungsmethoden den Zustand, im welchen sich die Konstruktion später befinden

wird, so gut wie möglich zu ergreifen und auf Grund dieser Prüfungen die Sicherheitsgrenzen der Konstruktion festzustellen, wenn diese vollbelastet wird.

Die Forschungsarbeit umfasst vor allem die Untersuchungen des Mechanismus der Entstehung und Ausbreitung des Sprödbruches und der Methoden mit denen das Auftreten und Ausbreiten des Sprödbruches vorausgesagt werden kann. Auf Grund solcher Vorschungsergebnisse und Voraussagen wird versucht die Konstruktion vor solchen Schadensfällen zu sichern. Schwierigkeiten treten auf bei der Auswahl der Methode für die Bestimmung des Sprödbruches und anderer Methoden für die Bestimmung der Schweißbarkeit.

Unter den zahlreichen Kriterien von welchen jedes auf seine eigene Art die einzelnen Einflüsse (die nicht standardisiert sind) zu erfassen versuchen, ist es schwer diejenigen auszusuchen, welche für eine bestimmte Konstruktion am besten geeignet sind.

Im Rahmen der Möglichkeiten, die uns zur Verfügung stehen, versuchen wir die richtigen Kriterien auszuwählen und auf deren Grund eine entsprechende Schweisstechnologie auszuarbeiten, welche auch im Falle einer nicht kontrollierten Beanspruchung der Konstruktion eine noch genügende Elastizität gewährleisten würde, um die Möglichkeit eines Sprödbruches auszuschließen.

SUMMARY

Problems on weldability of N-A-XTRA tempered structural steel are discussed in the paper. This steel manufactured by Thyssen Company was used for pressure pipeline of diameter 2500 mm because such high quality steel in greater amounts is not yet manufactured by domestic manufacturers. Problems in welding such steels are in general not dependant on the steel quality or manufacturer because they are solved by criteria valid for all high-strength steels. Similar problems will appear also with domestic tempered structural steels which productions is being developed.

The intention was to show the difficulties in choosing correct weldable material for heavy constructions because

this problem is not solved only by the quality of manufactured steel. The safety of the construction must be guaranteed by the design and by the technological realization. In constructing heavy constructions many factors appear which cannot be included or foreseen in the statistics. Modern science tries by various systems of tests to simulate the conditions under which the construction will later operate and thus to find the guaranteed limit for a safe construction under full load. Research work is directed mainly to the mechanism of appearing and propagation of brittle fracture and to the methods used in forecasting the appearing and propagation of brittle fractures thus enabling us to prevent the construction

from such fracturing. Difficulties appear in choosing the best methods for determining brittle fracture and the methods for determining the weldability. Among various criteria which include single influences (parameters are not standardized) in specified ways, it is difficult to select the most suitable one for single constructions.

A trial in selection of the correct criteria was made according to the available possibilities, and a corresponding technology of welding which will enable the ductility and elasticity of the construction also in the case of uncontrolled loads was designed, excluding the possibility of brittle fracturing.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены проблемы сварки инструментальной улучшаемой стали марки N-A-XTRA. Эту марку стали — изделие немецкого концерна Тиссен — употребили для изготовления нагнетательного трубопровода \varnothing 2.500 мм. Этот сорт стали благодаря своего высокого качества производится в нашей стране лишь в небольшом количестве.

При сваривании конструкций из этой стали возникают разные проблемы которые не зависят только от производителя и от вида конструкции и разрешаются по определенным показателям. Эти показатели имеют действительность для всех сортов стали высокой вязкости. Можно предполагать, что похожая проблематика получится при производстве домашней инструментальной стали для улучшения которая ещё находится в начальной стадии развития.

Тенденция статьи рассмотреть затруднения с которыми должен считаться производитель крупных конструкций при выборе сварочного материала (также добавочного), так как только с выработкой качественной стали проблем ещё не закончен. Параллельно с гарантией на надёжность конструкции что касается проектирования требуется загарантировать также технологическую часть выполнения. При изготовлении крупных конструкций возникает целый ряд проблем охватить которых нет возможности а также

и предвидеть в статистическом расчёте. При помощи различных систем исследования современная наука стремится охватить ситуацию которая будет применена позже при крупных конструкциях, и, на основании которых можно будет определить до которых пределах загарантирована надёжность конструкции при волной нагрузки. Такое исследование должно главным образом охватить механизм возникновения и расширения хрупкого излома; необходимо также взять во внимание методы исследования на основании которых можно предполагать вероятность появления и расширения хрупкого излома. На основании полученных данных стремимся предохранить конструкцию от хрупкого излома. Затруднения возникают при выборе методов определения свариваемости. Из сравнительно большого числа критерий, из которых каждый стремится по своему охватить отдельные параметры (при чём они не стандартизованы) представляет затруднение в выборе самых подходящих для определённую конструкцию. В пределах допустимости, которые находятся в распоряжении цель исследования выбрать правильные критерии и, на их основании выработать подходящую технологию сварки, которая также в случаи неконтролируемой нагрузки обеспечить дуктильность и упругость конструкции, так что возможность хрупкого излома исключается.

Žilavost konstrukcijskih jekel v odvisnosti od hitrosti preizkusa

Žilavost cementacijskih jekel se lahko močno spreminja v odvisnosti od njihove sestave. Najugodnejša žilavost jekla z 1,5 % kroma in prav toliko niklja je pri petkrat večji udarni hitrosti kot najugodnejša žilavost nelegiranega cementacijskega jekla. Poskušalo se je ugotoviti, kakšna je odvisnost žilavosti od hitrosti preizkušanja pri orodnih jeklih, saj večja žilavost pomeni odpornost orodja proti večjim sunkom sil.

Z obsežnimi preiskavami žilavosti cementacijskih jekel in jekel za kroglične ležaje so ugotavljali vpliv hitrosti na žilavo obnašanje izdelkov iz teh jekel.

Žilavost navadno pojmujejo kot produkt sile in deformacije, kar se meri s porabljenim delom za porušitev upogibne probe. Pri cementiranih konstrukcijskih jeklih nastopajo večosne napetosti in zato naj se konstrukcijski deli, ki naj bi bili najboljši, čimmanj deformirajo. Tako se teži za večjo porušno trdnostjo, to je, za izravnavo napetosti na najbolj obremenjenih mestih. Zato je žilavost materiala ne samo raztržna trdnost materiala jedra, temveč odpornost izdelka proti dinamičnim in statičnim obremenitvam nasploh.

Žilavostni preizkus naj se ravna po vrsti jekla, kajti na zmožnost za deformacijo vplivata predvsem temperatura in pa hitrost deformacije. Tako so pričakovali podobne žilavosti pri jeklih, ki so se podobno obnašala pri statičnem upogibnem preizkusu. Pričakovanja so se potrdila s preizkusi na probah, ki niso bile togo vpete in torej ni nastopal zarezni efekt. Niso pa se pričakovanja izpolnila pri preizkusih prob, ki so bile enostransko togo vpete pri udarnem upogibnem preizkusu. Za eno nelegirano in dve legirani cementacijski jekli so odkrili, da so vrednosti pri upogibu skoraj enake kadar je polmer upogiba velik in da so si močno različne, če je ta polmer majhen. Žilavost se je lahko v redu razločevala le pri probah z zarezami ali pri probah, ki so se pri preizkusih ostro upognile. Tako se je določil vpliv ostrine žareze. Glede določanja vpliva hitrosti so poskusne omejitve večje in se je najenostavneje povečalo preizkusno hitrost tako, da se je povečalo začetno energijo preizkusa.

Pri večjih hitrostih udarcev, to je pri večji energiji, so žilavosti prob iz mehkih jekel za cementacijo po pravilu manjše kot pri manjših pre-

izkusnih hitrostih. Jeklo za kroglične ležaje pa se je pri preizkusih obnašalo drugače. Pri tem so imeli dve obliki prob, ene valjaste, z zarezo in druge brez zareze ter pravokotnega preseka. Vpliv hitrosti je bil pri obeh vrstah prob podoben. (1)

Zmanjšanje žilavosti, oziroma dela porabljenega za zlom prob, pri višjih preizkusnih hitrostih se razlaga z učinkom, ki naj bi bil podoben onemu, ki nastopa pri znižanju temperature. Z enakimi dimenzijami prob se pride v krhko območje, v odvisnosti od žilavosti jekla, pri večjih ali pri manjših preizkusnih hitrostih. Pri nihalih, kakršna se navadno uporabljajo, pride celo do tega, da razmeroma majhna energija udarca ne zadostuje več za krhek način preloma. Ugotovili so, da je razločevalnost raznih preizkusnih metod pri različno trdnih jeklih različna. Razločevalnost pri preizkušanju krhkih jekel je največja, kadar jih preizkušamo na udarno upogibno žilavost, malo manj se razlikujejo jekla med seboj glede največje udarne upogibne sile, ki že povzroči lom in najmanjša je razlika v statičnih upogibnih silah potrebnih za zlom vsakega od krhkih jekel. Značilno je, da si postajajo pri bolj krhkih jeklih dinamične in statične lastnosti podobnejše vzporedno z večanjem krhkosti.

Iz diagramov sila-upogib in sila-čas (upogiba) so ugotovili, da je porast upogibne trdnosti pri večji hitrosti večji pri bolj žilavem jedru in bolj žilavi površinski plasti probe. Žilavost površinske plasti je torej zelo pomembna. Ugotovili pa so tudi da pri OCR 4 ex. sp. ni bistvene odvisnosti žilavosti in upogibne trdnosti od hitrosti upogibanja. Značilno je, da se s povečano hitrostjo preizkušanja žilavost zmanjšuje pri mehkih jeklih, ki so ali ki niso površinsko utrjena. Upogibna sila pri površinsko utrjenih (cementiranih) probah raste s hitrostjo upogiba, pri navadno kaljenih pa se ne spreminja v odvisnosti od hitrosti upogiba, čeprav se meja plastičnosti dviga. Statična in udarna upogibna trdnost sta enaki. Vzrok temu je najbrž ta, da se vkljub veliki hitrosti prej doseže kritična strižna napetost, potrebna za plastično deformacijo, kot normalna napetost raztržne trdnosti. Če bi še nadalje dvigali hitrost preizkušanja (nad 6 m/sek), bi se upogibna sila povečevala, saj bolj žilava jekla dosežejo vrh upogibne trdnosti pri višji preizkusni hitrosti kot manj žilava jekla.

Iz tega bi se dalo sklepati, da se zelo trdna jekla pri zelo majhnih hitrostih tudi delno strižno

prelomijo in da se z rahlim zviševanjem preizkusne hitrosti povečuje delež strižnih napetosti glede na normalne napetosti v probi.

Upogibna sila je odvisna od žilavosti materiala in od hitrosti preizkušanja. Vpliv hitrosti na krhkost preloma je možno določiti že, če imamo eno od preizkusnih hitrosti nad 2 m/sek. Zobniki vzdržijo večje sile, če so iz bolj žilavega materiala, toda statični preizkusi ne kažejo odvisnosti sile od žilavosti. Po tem se vidi, kako je hitrost preizkušanja pomembna postavka pri določanju lastnosti jekel, ki se uporabljajo za dinamično obremenjene dele. Odkrili so tudi, da je možno žilava jekla jasno razlikovati med seboj po žilavosti le tedaj, če imajo probe zarezo ali če se kako drugače omogoči oster upogib.

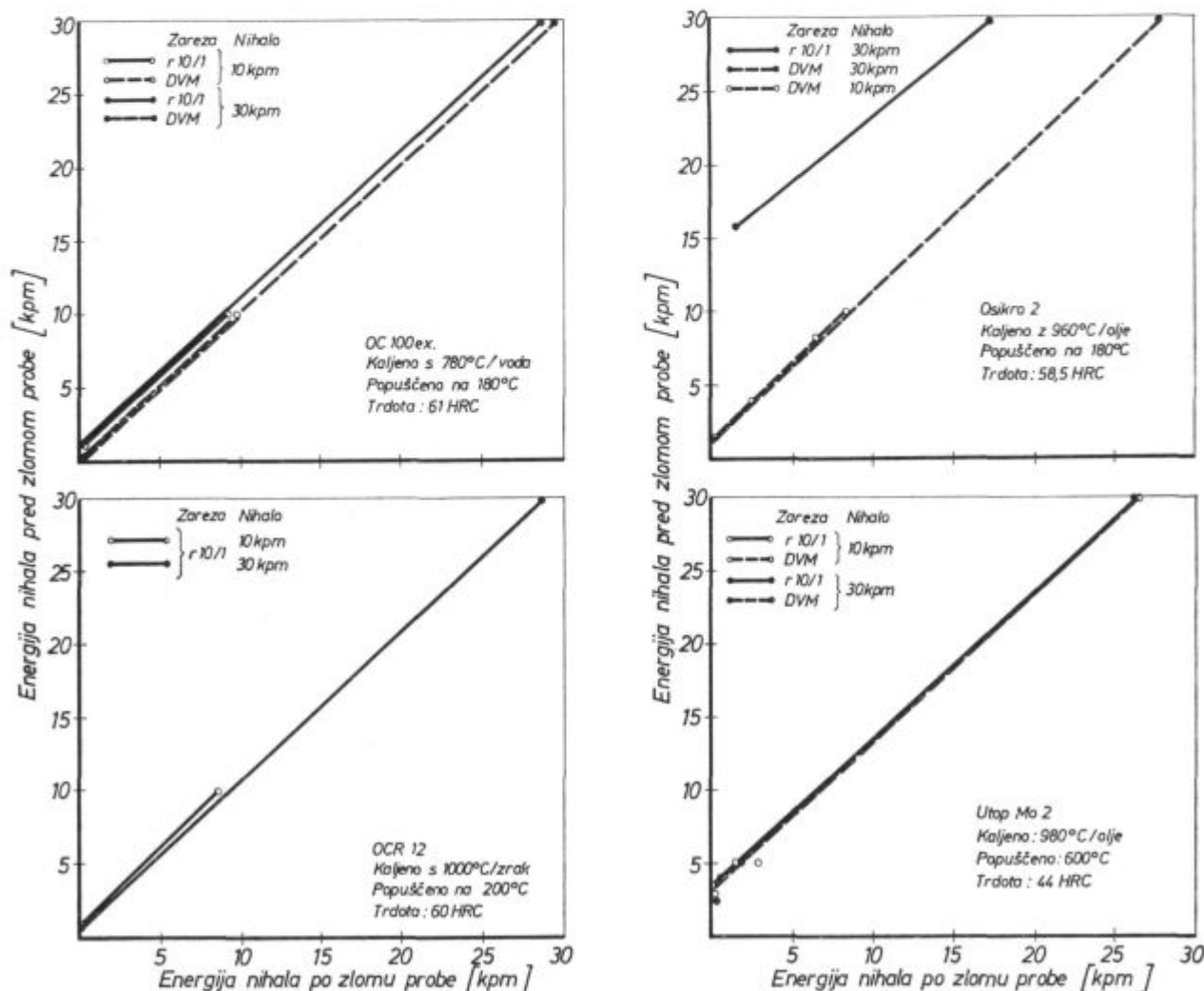
Poskusi s posnemanjem krivulj sila-upogib so pokazali, da se z zviševanjem hitrosti preizkušanja povečujeta tudi meja plastičnosti in porušna sila. Največja porušna sila je za jekla z veliko žilavostjo jedra pri višjih preizkusnih hitrostih kot za jekla z manjšo žilavostjo jedra.

POSKUSI Z ORODNIMI JEKLI

Te ugotovitve, dobljene na ležajnem in na cementacijskih jeklih, so se poskušale dopolniti in potrditi s preizkusi orodnih jekel. Za poskuse so se vzela jekla OC 100 ex. (Č.1941), OCR 12 (Č.4150), Osikro 2 (Č.6443), Utop Mo 2 (Č 4751). Izdelale so se žilavostne probe z zarezi dveh tipov. Milejše zareze imajo zaokrožitev 10 mm in globino 1 mm, drugi tip zareze so standardne zareze DVM. Probe so se izdelale tako, da so imele trdoto kot jo imajo navadno orodja, ki so izdelana iz enakih jekel. Poskusi so se opravljali na velikem in majem Charpy kladivu (30 in 10 kpm energije) tako, da sta se izdelali napravama ustrezni merili in se je nihali lahko spuščalo s poljubne višine. Tako so se lahko dosegle za zlom probe energije od 0 do 30 kpm in hitrosti do 5,4 m/sek.

Tako so bile dane možnosti za določanje vpliva zareze, energije in hitrosti na žilavost.

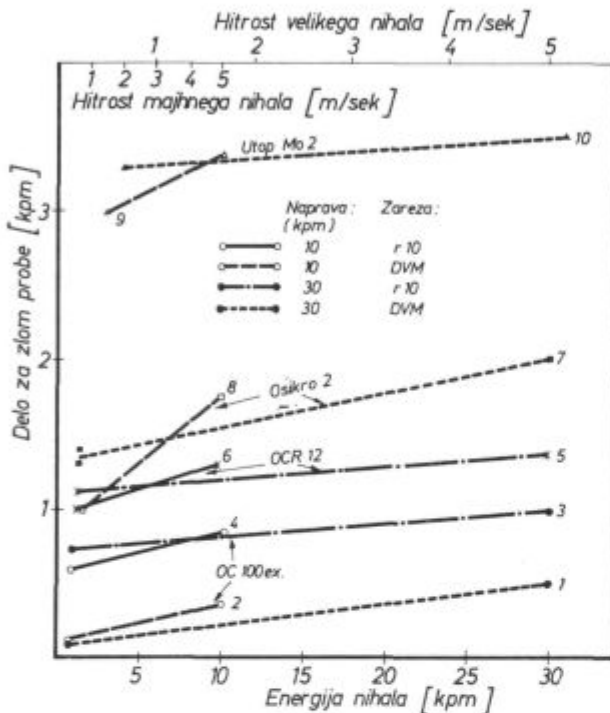
Slika 1 kaže rezultate preizkusov štirih jekel. Vidi se podobnost odvisnosti žilavosti od energije



Slika 1
Rezultati preizkusov za štiri različne vrste orodnih jekel

nihala pri vseh preizkušanih jeklih, saj je velikost dela za zlom premalo poudarjena glede na velikost energije nihala, da bi bile opazne razlike v nagibih krivulj za posamezna jekla.

Smiselna se zdijo predvsem razlikovanja med rezultati, ki so dobljeni z različnimi energijami obeh nihal, prav tako pa tudi med rezultati dobljenimi na raznih tipih prob. Hitrosti nihal se spreminjajo v enakih območjih, zato je zadosti, če upoštevamo samo energijske spremembe. Slika 2



Slika 2

Odvisnost dela, potrebnega za zlom probe od energije nihala in njegove hitrosti

kaže, da se pri vseh preizkušanih jeklih porabi več dela za zlom, če je energija nihala večja. Pri vseh poskusih z manjšim nihalom se poraba energije za zlom hitreje povečuje s povečevanjem začetne energije nihala kot pri večjem nihalu. Vendar pa pri majhnem nihalu nikoli ni treba toliko energije za zlom kot pri velikem. Ker vemo, da se pri manjšem nihalu dosežejo malo manjše največje hitrosti kot pri večjem, lahko sklepamo, da na porabo energije vplivata teža in energija nihala kot njegova hitrost. Zaradi tega so tudi razlike v žilavosti, merjeni z majhnimi energijami obeh nihal večje kot če se žilavost preizkuša z večjimi energijami nihala. Z večanjem energije si namreč hitrosti obeh nihal postajata bolj podobni glede vpliva hitrosti na odpornost jekla proti udarcem. Težje nihalo, ki ga dvignemo na majhno višino, bo imelo ob udarcu na probo majhno hitrost, poskus bo skoraj statičen. Pri enaki energiji bo manjše nihalo dvainpolkrat hitreje udarilo na probo. Razlika med porabljenim delom za zlom tistih prob iz OC 100 extra, katere so imele ostro zarez, je večja pri večjih hitrostih obeh nihal kot

pri manjših. To se lahko razloži z zelo veliko krhkostjo tega jekla. Pri manjših hitrostih je razlika med žilavostjo (porabljenim delom) določenega jekla, določeno na majhnem in velikem nihalu, velika tedaj, ko lomimo zelo žilave probe. Dokaz za to so krivulje: 3 in 4 (za probe iz OC 100 extra, z milo zarez), 7 in 8 (za probe iz Osikro 2, z ostro zarez), 9 in 10 (za probe iz Utop Mo 2, z ostro zarez).

Razlika med delom, ki se porabi za zlom krhkih in bolj žilavih jekel, se s povečevanjem hitrosti preizkušanja povečuje, razlika med žilavimi jekli pa se s porastom preizkusne hitrosti spet zmanjšuje, ali pa je težnja za zmanjšanjem razlike. Obenem se vidi, da ostro zarez pri najbolj žilavih jeklih (npr. Utop Mo 2, krivulji 9 in 10) precej zavre porast dela za zlom pri večjih energijah nihala in pri večjih hitrostih. Srednje žilavo jeklo se pokaže kot manj občutljivo na ostrino zarez pri hitrejših udarcih (Osikro 2).

Posebno značilna je podobnost odvisnosti žilavosti od hitrosti pri jeklih OC 100 extra in OCR 12. Čeprav je OCR 12 precej bolj žilav od nelegiranega orodnega jekla (pri majhnih hitrostih udarcev je žilavost jekla OC 100 extra velika za 70 % od žilavosti jekla OCR 12), je vendar tako občutljiv na hitre udarce, da se njegova prednost zmanjša za 5 %, ko se hitrost udarca poveča od 0,5 na 5 m/sek.

Podatki s tega diagrama dopuščajo primerjati med seboj jekla glede odpornosti proti različno hitrim udarcem in udarcem različnih gibalnih količin, oziroma različnih energij. Ne moremo pa primerjati teh jekel glede odpornosti proti zarezam različnih ostrin, ker se Utop Mo 2 in Osikro 2 ne moreta lomiti, če imajo probe samo milo zarez. Za preizkuse jekla OCR 12 pa so obstajale samo probe z milo zarez.

Preizkusi prob z ostro zarez (DVM) so torej po žilavosti razvrstili jekla od OC 100 (žilavost 0,1 do 0,5 kpm, oziroma 0,14 do 0,7 kpm/cm² pri probah z ostro zarez ter 0,6 do 1 kpm pri probah z zarez r 10/1), OCR 12 (žilavost prob z milo zarez je 1 do 1,35 kpm), Osikro 2 (žilavost prob z zarez DVM je 1 do 2 kpm, to je 1,4 do 2,8 kpm na cm²) in Utop Mo 2 (žilavost je pri probah z zarez DVM od 3 do 3,5 kpm, kar je 4,3 do 5 kpm na cm²). Takšna razvrstitev jekel glede na žilavost ni popolnoma razumljiva. Od prob OC 100 extra bi pričakovali več. V dobro rezultatom za OCR 12 je treba povedati, da so bile pri probah iz tega jekla zarez tipa r 10/1 mm brušene in so tiste brazde, od brušenja, pri preizkusih učinkovale kot mikrozarez. Pri probah iz drugih jekel so se zarez izdelale pred kaljenjem in ni bilo brazd v prečni smeri na probo.

Če se šteje za resnično žilavost tista energija nihala, katera ravno še zlomi probo (mejna energija), se vidi, da je jeklo Osikro 2 razmeroma manj žilavo glede na ostala jekla kot pa pri preizkusih z večjimi energijami nihala. To se lahko pripíše večjemu vplivu trdnosti na odpornost proti udarcem, ki niso hitri. Tako se vidi, da bi bile pri udarcih s hitrostjo pod 1 m/sek gladke probe iz

jekla OCR 12 bolj ali enako žilave kot zarezane probe iz jekla Osikro 2.

Kot kaže slika 1, se je za vsako jeklo z lahkoto ugotovilo, katera energija nihala ravno še zlomi probo. Najbrž pa ne bi bilo prav pojmovati žilavost kot tisto najmanjše delo, ki že povzroči lom probe, ampak bi bilo primerneje opredeliti žilavost kot odpornost proti udarcem kot določenim sunkom sile z določenimi hitrostmi. Najbolje bi bilo postaviti za posamezna jekla, ali skupine jekel, meje za sunke sil, s katerimi bi se jekla preizkuašla. Iz teh raziskav se vidi, da ni za žilavostno obnašanje probe odločilna samo hitrost sunka sile, ampak celotna gibalna količina.

S temi rezultati, dobljenimi na navadnih Charpy nihalih se še ne more v celoti prikazati, kako velike so lahko razlike v odpornosti proti udarcem različnih hitrosti. Medsebojni vpliv ostrine zarez, hitrosti in mase sunka sile pa je vendar razločno viden in govori v prid preciznejšemu opredeljevanju žilavosti.

Dokler nam samo žilavostni preizkus daje pomeni obvestila o dinamičnem obnašanju trdih, orodnih jekel, bi bilo prav, da se z njim dobi še več informacij. Problematika žilavosti se mora primerjati z uspehi pri vpeljavi natančnih omejitev in razdelitev v tehniko določanja dinamične trdnosti materialov.

ZAKLJUČEK

Preizkuse odpornosti jekel na različne sunke sil različnih hitrosti so pokazale, da se žilavost jekel s povečevanjem hitrosti udarnega nihala zmanjšuje in da se z zvečevanjem sunka sile pri isti hitrosti žilavost povečuje. Pri krhkih jeklih je razločevalnost po žilavosti večja kot razločevalnost po statični trdnosti ali napetosti pri udarni obremenitvi.

Za določevanje najprimernejše toplotne obdelave vsakega orodja bi bilo dobro preizkušati žilavost s takšnimi hitrostmi, ki pridejo v poštev med delovanjem orodja iz določenega jekla. Toda metoda določanja žilavosti z nihalom ne omogoča preizkusov z najustreznejšimi hitrostmi. Preizkušanje jekel na odpornost proti primerno določenim sunkom sile je napredek v preiskavah trdih jekel, ki se le redko dinamično preizkušajo drugače kot na žilavost.

Literatura:

Brugger H., G. Kraus: Einfluss der Zähigkeit auf das Verhalten von Einsatzstählen im statischen und dynamischen Biegeversuch. Archiv für das Eisenhüttenwesen 32 (1961), August, Heft 8, str. 529—531.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Zähigkeit wird mit der grösseren Versuchsgeschwindigkeit kleiner und mit der Vergrösserung der Stosskraft grösser. Ein schneller Schlag verursacht eine kleinere Deformation als ein langsamer. Da die Werkzeuge bei verschiedenen Geschwindigkeiten angewendet werden,

wäre real möglich die Kerbschlagzähigkeit eines jeden Werkzeugstahles bei einer solchen Geschwindigkeit zu bewerten, welche bei den Werkzeugen aus diesen Stahl vorkommt.

SUMMARY

Toughness is reduced by the increased testing rate and is increased by the increased thrust. Faster blows cause smaller deformations than slower ones. Because tool steels are used for the tools operating at various speeds,

a possibility exists to estimate the toughness of each steel at the speed which will later be used in operation of tools made of this steel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании взято во внимание, что инструмент для обработки материала употребляется при разных скоростях. Установлено что с увеличением быстроты движения прибора для обработки вязкость стали уменьшается а с увеличением ударной силы увеличивается. Сравнивая более быстрые удары с более медлен-

ными определено, что первые вызывают менее существенную деформацию материала. При учёте быстроты движения ударов прибора можно подать оценку вязкости отдельного сорта стали прибора взяв во внимание обычно применяемую скорость каждого сорта стали отдельно.

Optimizacija obdelovalnih pogojev

Osnova za izračun cene izdelave so vedno tehnološki podatki katere določata tehnolog ali mojster. Določanje parametrov obdelave kamor spadajo: rezalna hitrost, pomik noža in globina rezanja je bila več ali manj prepuščena praktičnim izkušnjam, ki pa vedno niso bile optimalne. Optimalno določanje obdelovalnih pogojev je povezano z dolgotrajnimi poskusi ugotavljanja izdržljivosti noža oziroma rezalnega roba in s kasnejšim vrednotenjem dobljenih rezultatov. Ročno računanje v nobenem primeru ne pride v poštev. Zato je v članku opisana metoda in podane končne formule za izračunavanje končnih rezultatov na računalniku. Za posamezne formule je potrebno napisati le ustrezne programe za elektronski računalnik. Za ilustracijo je v članku podan praktičen primer določanja optimalnih pogojev obdelave za struženje ležajnega obroča.

UVOD

Po vsem svetu opazimo močno gibanje, ki zahteva večjo odgovornost in večjo svobodo posameznika. Tendence hitrega razvoja v tehnologiji in izobraževalne stopnje so orodje za revolucijo v izdelovalni tehnologiji, ki jo danes doživljamo. Tehnološki razvoj in konstrukcije sodobnih obdelovalnih strojev omogočajo, da nadomestimo uporabljene empirične metode v tehnologiji izdelave z znanstvenimi metodami. Istočasno je narasla tudi socialna zahteva osvoboditi posameznika opravljanja dela. Važno vlogo pri razvoju izdelovalne tehnologije predstavlja ekonomski faktor.

Zato se pojavljajo težnje, da se nek izdelek obdeluje z optimalnimi rezalnimi pogoji. Teženj po optimizaciji obdelave je vse več, vedno bolj ko se vključujemo v mednarodno delitev dela. Optimiranje je še posebno pomembno takrat, ko se serije večjih podobnih izdelkov ponavljajo preko celega leta ali celo več.

Optimiranje pa ni samo določanje razmerij pri odrezovanju, ki zagotavlja maksimalno možno izdelavo v časovni enoti. Velik vpliv na višino stroškov ima zmogljivost materialov, rezanja in obnašanja materiala obdelovanca. Zato je ena od pomembnih bodočih razvojnih nalog nujen nadaljnji razvoj rezalnih materialov.

Material orodja mora imeti veliko enakomernost, s tem pa je možno doseči tudi veliko sigurnost proizvodnje. Tudi na področju materiala obdelovancev je v zadnjem času uspelo zaradi boljšega poznavanja poteka obrabe med orodjem in

obdelovancem pripraviti določena jekla, katera bodo dovoljevala večje delovne čase kot tudi večje hitrosti rezanja.

Danes mnogi obdelovalni stroji ne dovoljujejo optimalne vrednosti obdelave, n. pr. večje hitrosti struženja. To nas opozarja, da ni dovolj velika instalirana moč, da bi se lahko stružilo ekonomično z velikimi preseki in istočasno pri velikih hitrostih rezanja. Končno večkrat stroji ne zadovoljujejo statični in dinamični togosti, ki je porok za obdelavo brez napak, kar naj bi bilo nujno zlasti pri uporabi visoko obstojnih in krhkih rezalnih materialov. Uporaba optimalnih pogojev obdelave pri katerih bodo časi obdelave konstantni, narekuje tudi vse večji prodor računalnikov v podjetja. Če so bili računalniki do nedavnega pretežno samo za računanje osebnih dohodkov, moramo trditi danes, da so močno pomagalo že v tehnologiji izdelave. Optimiranje tehnologije izdelave zahtevajo tudi kalkulacijski oddelki, kjer se formirajo cene izdelave itd.

Skratka smo pred dejstvom, da damo računalniku pravilne podatke, iz katerih bo mogoče vedno odločiti o nadaljnjih posegih v proizvodni proces.

V članku bo zato opisan postopek optimiranja parametrov pri struženju. Zaradi lažjega razumevanja bo dodan še praktični primer optimizacije obdelave na polavtomatski stružnici SPL-32 za grobo obdelavo ležajnega obroča.

Optimizacija parametrov pri struženju

V tehnologiji je danes stalno potreba, da dvomimo v osnovne domneve, ko imamo na razpolago nove tehnike in informacije. Pri odrezavanju kovin je dobro znan odnos, ki ga je prvi postavil F. W. Taylor leta 1907:

$$v \cdot T^n = \text{konst.} = C \quad (1)$$

kjer je hitrost rezanja in T obstojnost orodja, n ter C sta pa konstanti za posebne rezalne pogoje in kombinacije orodje — obdelovanec.

Ta osnovna enačba se v bistvu nanaša na značilnost trajanja orodja, v njej pa ima najmočnejši vpliv rezalna hitrost. Čeprav je bila Taylorjeva enačba velik korak naprej pred približno 60 leti, ne upošteva vpliva geometrije orodja, globine rezanja ali pomika na obstojnost orodja. Njena uporaba vsebuje izbiro poljubnega pomika, ki je navadno prelahk za maksimalno ekonomičnost, sledi pa ji določevanje obstojnosti orodja za določeno število rezalnih hitrosti.

Ko smo dobili konstanto C in n iz eksperimentalnih podatkov, moramo dopustiti poljubno obstojnost orodja, da izračunamo rezalno hitrost. Često navajajo 60 minutno obstojnost orodja za stružnice, čeprav se ta velikokrat raztegne na 8 ur za stroje z mnogo orodji, da se omogoči menjava orodja.

Druga popolnoma različna metoda za izbiro rezalnih hitrosti je, da se sklicujemo na tabele objavljene v različnih strojniških priročnikih, kateri navajajo priporočljive rezalne hitrosti za specifične kombinacije orodij in delovnih materialov. Domneva, na kateri sloni ta pristop je, da obstaja enotna optimalna rezalna hitrost za posamezno kombinacijo orodja in materiala obdelovanca.

Koncept delovne envelope (ovojnice) v ekonomiki obdelovanja

Obstoj področja ekonomsko ugodne operacije obdelovalnega procesa je dobro znan (zlasti za struženje) in so ga v teoretični obliki predstavili številni avtorji. Pri reševanju postavljene naloge smo se ozirali predvsem na izvajanje, ki ga predstavlja J. R. Crookall.

Koncept delovne envelope, ki predstavlja dovoljena in zaželjena operacijska področja obdelovanja, je razvit za določeno kombinacijo obdelovanca in orodja. Analiza stroška in časa določi ekonomsko envelope, ki je omejena z maksimalnim in minimalnim stroškom produkcije in v sklopu katere je na razpolago izbira operacije, ki je najbližja optimalni. Upoštevati je treba tudi učinek različnih omejitev kot so moč stroja, kombinacija orodje — obdelovanec glede na različne načine skrhanja orodja, togost obdelovanca in površinska hrapavost.

Ekonomično struženje zahteva v naraščajoči avtomatizirani proizvodnji večkrat prednost krajšega delovnega časa in s tem uporabo visoke hitrosti rezanja. Pri izbiri krajšega časa se bo povečala produkcijska količina (število kosov na časovno enoto), toda po času T se orodje obrabi za določeno vrednost, in zaradi tega sledijo tudi pogostejše menjave orodja in s tem daljše mirovanje stroja. Pri neki določeni hitrosti rezanja lahko pričakujemo minimalni produkcijski čas. Tudi z gledišča stroškov dobimo pri neki rezalni hitrosti točko minimalnega stroška. Točka minimalnega stroška pa se pojavi pri nižji rezalni hitrosti, kot točka minimalnega časa. Tako hitrosti za minimalni strošek in maksimalno količino produkcije označujejo kompromisno področje med dvema idealoma, ki jih pa ni mogoče istočasno zadovoljiti. Normalno je najočitnejši cilj doseči pri proizvodnji minimalni strošek, ni pa vedno nujno. Zastavljeno nalogo smo reševali z gledišča minimalnega stroška.

Stroškovna enačba za struženje

Proizvodni strošek na kos

Celotni proizvodni strošek na kos je sestavljen iz naslednjih stroškov:

a) strošek vpetja, izpetja in nastavljanja na kos (din/kos)

$$C_1 = R_1 \cdot t_n \quad (2)$$

R_1 — celotni režijski stroški in direktni delovni strošek (din/min)

t_n — čas vpenjanja, izpenjanja in nastavljanja na kos (min/kos)

b) Obdelovalni strošek na kos (din/kos)

$$C_2 = \frac{\pi \cdot R_1 \cdot d_w \cdot l_o}{s \cdot v} \quad (3)$$

d_w — premer obdelovanca (m)

l_o — dolžina rezanja (mm)

s — podžajanje na vrtljaj (mm/vrt)

v — rezalna hitrost (m/min)

c) Strošek menjave orodja na kos (din/kos)

$$C_3 = \frac{\pi \cdot d_w \cdot l_o}{s \cdot v \cdot T} \cdot R_1 \cdot t_w \quad (\text{din/kos})$$

t_w — čas menjave orodja (min)

T — trajanje orodja (min)

Trajanje orodja T pomeni, da je orodje doseglo neko stopnjo obrabe in ga je potrebno vzeti iz dela. Trajanje orodja izrazimo z enačbo:

$$VB = e^A \cdot v^B \cdot s^C \cdot T^D$$

To enačbo preuredimo:

$$v \cdot s^{C/B} \cdot T^{D/B} = (VB \cdot e^{-A})^{1/B} = C_{TS} \quad (4)$$

$$v \cdot s^m \cdot T^n = C_{TS}$$

Iz te enačbe izrazimo čas trajanja orodja T :

$$T = C_{TS}^{1/n} \cdot v^{-1/n} \cdot s^{-m/n}$$

Tako je podano število menjav orodja na kos z :

$$z = \frac{\text{čas struženja}}{\text{trajanje orodja}} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot l_o}{s \cdot v} \cdot \frac{T}{1} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot l_o}{C_{TS}^{1/n}} \cdot v^{(1/n)-1} \cdot s^{(m/n)-1}$$

Čas menjave orodja na kos:

$$C_3 = R_1 t_w \cdot \frac{\pi \cdot d_w \cdot l_o}{C_{TS}^{1/n}} \cdot v^{(1/n)-1} \cdot s^{(m/n)-2} \quad (5)$$

d) Strošek brušenja orodja lahko smatramo kot vsoto stroškov, ki so neodvisni od količine, ki jo je treba odbrusiti (R_2) in stroškov, ki predstavljajo obnovitev konice orodja. To zadnje brušenje je sestavljeno iz brušenja boka pri globini $VB \times \sin \alpha$ (α -kot proste površine) in brušenje

varnostnega roba. Če označimo R_3 strošek brušenja enotne globine proste ploskve je strošek brušenja:

$$C_4 = R_2 + R_3 (q + VB \cdot \sin \alpha) \cdot \frac{\pi \cdot d_w \cdot l_o}{C_{TS}^{1/n}} \cdot v^{(1/n)-1} \cdot s^{(m/n)-1} \quad (6)$$

V primeru, če stružno ploščico zavržemo, je:

$$R_2 = R_3 = 0$$

torej $C_4 = 0$

e) Strošek orodja na kos pri vsakem ponovnem brušenju, bo odvisen bodisi od celotnega razpoložljivega materiala, ki ga odbrusimo, bodisi od števila razpoložljivih rezalnih robov. Če je celotna odstranjena debelina U , je možno naslednje število brušenj:

$$\frac{U}{(q + VB \cdot \sin \alpha)}$$

Če je W nabavna cena orodja, je strošek znižanja vrednosti na trajanje orodja:

$$\frac{W}{e + U/(q + VB \cdot \sin \alpha)}$$

kjer je $e = 1$ za vsa orodja, za odvržena orodja pa je $U = 0$ in e število razpoložljivih rezalnih robov (največkrat 3, 4, 6 ali 8)

Strošek orodja na kos izrazimo z enačbo:

$$C_5 = \frac{W}{e + U/(q + VB \cdot \sin \alpha)} \cdot \frac{\pi \cdot d_w \cdot l_o}{C_{TS}^{1/n}} \cdot v^{(1/n)-1} \cdot s^{(m/n)-1} \quad (7)$$

Celotni strošek obdelave na kos C (din/kos) je enak vsoti stroškov podanih z enačbami:

$$C = R_1 \cdot t_n + \frac{R_1 \cdot \pi \cdot d_w \cdot l_o}{s \cdot v} + \left[R_1 \cdot t_w + R_2 + R_3 (q + VB \cdot \sin \alpha) + \frac{W}{e + U/(q + VB \cdot \sin \alpha)} \right] \cdot \frac{\pi \cdot d_w \cdot l_o}{C_{TS}^{1/n}} \cdot v^{(1/n)-1} \cdot s^{(m/n)-1} \quad (8)$$

Minimalni strošek na kos

Če odvajamo enačbo (8) z ozirom na » v « in izenačimo z nič, dobimo:

$$\frac{\delta C}{\delta v} = 0 = - \frac{R_1 \cdot \pi \cdot d_w \cdot l_o}{s \cdot v^2} + S \cdot \frac{\pi \cdot d_w \cdot l_o}{C_{TS}^{1/n}} \cdot \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \cdot v^{(1/n)-2} \cdot s^{(m/n)-1}$$

kjer je:

$$S = R_1 \cdot t_w + R_2 + R_3 (q + BV \cdot \sin \alpha) + \frac{W}{e + U/(q + VB \cdot \sin \alpha)}$$

Tako je rezalna hitrost za minimalni strošek na kos pri konstantnem podajanju s :

$$v = \frac{C_{TS}}{s_m} \cdot \left(\frac{R_1}{s} \cdot \frac{1-n}{n} \right)^2 \quad (9)$$

Če odvajamo enačbo (8) z ozirom na s in izenačimo z nič, dobimo:

$$\frac{\delta C}{\delta s} = 0 = - \frac{R_1 \cdot \pi \cdot d_w \cdot l_o}{s^2 \cdot v} + S \cdot \frac{\pi \cdot d_w \cdot l_o}{C_{TS}^{1/n}} \cdot v^{(1/n)-1} \cdot \left(\frac{m}{n} - 1 \right) \cdot s^{(m/n)-2}$$

Tako je pomik za minimalni strošek na kos pri konstantni hitrosti v :

$$s = \left(\frac{C_{TS}}{v} \right)^{1/m} \cdot \left(\frac{R_1}{S} \cdot \frac{m-n}{n} \right)^{n/m} \quad (10)$$

Ker sta enačbi (9) in (10) med seboj neskladni, ni nobene posamezne vrednosti s in v , ki bi dala najmanjši strošek. Z ozirom na enačbo (8) pa se pokaže, da se približamo celotnemu minimalnemu strošku na kos, ko se podajanje progresivno večja. Torej lahko dosežemo najnižji strošek s tem, da uporabimo najvišje možno podajanje ($s = s_{max}$). Obstajajo pa praktične omejitve velikosti podajanja glede na moč stroja in glede na kvaliteto obdelane površine. Ko določimo največje dovoljeno podajanje za posebne obdelovalne pogoje, lahko enačbo (9) uporabimo za ugotovitev optimalne rezalne hitrosti.

Izračun optimalne rezalne hitrosti

Za operacijo struženja zunanlega valjčnega prstana $\varnothing 243,5 \times 194 \times 83$ ugotavljamo optimalno rezalno hitrost.

Podatki

Podatki stroja

Vrsta stroja	polavtomatska stružnica
Tip	SPL 32
Proizvajalec	Kovosvit Holoubkov
Skupna dolžina	3050 mm
Širina	2080 mm
Višina	1600 mm
Teža	3800 kp
Stružna dolžina	400 mm
Največji obodni premer nad posteljo	575 mm
Največji obodni premer nad suportom	315 mm
Območje pomikov suporta	0,05—2,80 mm/vrt
Moč glavnega motorja	17/22 kW
Število vrtljajev gl. motorja	1445/2980 min ⁻¹
Skupna vgrajena moč stroja	25 kW
Dovoljeni moment	120 kpm

Število vrtljajev delovnega vretena: 63—90—125—180—250—350—500—710—1000—1400

Podatki orodja

Ploščice (dvostranske) Sandvik Coromant SNMG 19 06 16 S6 (P40)

Držalo:

Sandvik Coromant T MAX — P PSBNR 20 — 6 hR 174.3 3232 — 19

Cena ploščice $W = 33$ din

Število rezalnih robov $e = 8$

$$\text{Cena enega rezalnega roba } W_{1, \text{rob}} = \frac{W}{e} = \frac{33}{8} = 4,13 \text{ din/rob}$$

Čas menjave ploščice $t_w = 0,60$ min

Radij (nosni): $r = 1,6$ mm

Ker se stružne nože po določeni obrabi ne brusijo, ampak se jih zavrže sledi:

$$U = R_2 = R_3 = 0 \text{ in } C_4 = 0$$

Material obdelovanca

Oznaka: Č. 4144 (OCR 4)

Toplotna obdelava: normalizirano

Teža odkovka: 16 kp

Specifična sila rezanja: $k_s = 260$ kp/mm²

Geometrija obdelovanca: $d_w = 254$ mm

Geometrija obdelovanca: $l_0 = 83$ mm

Toleranca: $\pm 0,3$ mm

Globina rezanja: $a = 5,5$ mm

Hrapavost: $R_t = 12,5$ μ m

$$K_{sl} = k_s (\sin \alpha)^{1-z} = 260 (\sin 75^\circ)^{1-0,26} = 263 \text{ kp/mm}^2$$

$$1-z = 0,74 \text{ in } z = 0,26$$

Podatki material obdelovanca-orodje

Pri analizi regresije smo določili regresijske koeficiente

$A = -7,138$	konstanta
$B = 1,382$	eksponent hitrosti
$C = 0,078$	eksponent podajanja
$D = 0,523$	eksponent časa

Enačba obstojnosti orodja (4) se glasi:

$$v \cdot s^m \cdot T^n = C_{TS}$$

$$m = \frac{C}{B} = \frac{0,078}{1,382} = 0,057$$

$$n = \frac{D}{B} = \frac{0,523}{1,382} = 0,380$$

$$C_{TS} = (AB \cdot e^{-A}) = (VB \cdot e^{7,138})^{1/1,382}$$

Konstanto C_{TS} izračunamo za tri dovoljene širine obrabe VB:

$$VB1 = 0,80 \text{ mm}, C_{TS1} = 147,9$$

$$VB2 = 1,00 \text{ mm}, C_{TS2} = 171,1$$

$$VB3 = 1,20 \text{ mm}, C_{TS3} = 200,4$$

Ostali podatki

Celotni režijski in direktni delovni strošek:

$$R_{th} = 80 \text{ din/h}$$

$$R_1 = \frac{R_{th}}{60} = \frac{80}{60} = 1,33 \text{ din/min}$$

Čas vpenjanja, izpenjanja in nastavljanja na kos s hidravlično vpenjalno napravo

$$t_n = 1 \text{ min}$$

4.2. Omejitve

Kot je že omenjeno v poglavju 3.2, lahko dosežemo najnižji strošek tako, da uporabimo najvišje podajanje, ki je omejeno z momentom na vretenu in s kvaliteto obdelane površine. Pri tako izbranem podajanju nato izrazimo največjo rezalno hitrost, ki je omejena z močjo stroja. V tako določenem območju mora ležati podajanje in rezalna hitrost.

a) Omejitev podajanja glede na hrapavost obdelane površine:

$$s = (8 \cdot R_t \cdot r)^{1/2} \cdot KOR \quad (10)$$

kjer je: R_t — srednja višina neravnosti (mm)

r — nosni radij ploščice (mm)

KOR — korelacijski faktor, odvisen od vrednosti R_t

$$s = (8 \cdot 0,0125 \cdot 1,6)^{1/2} \cdot 0,75 = 0,30 \text{ mm/vrt} \quad (11)$$

b) Omejitev momenta

$$F_v < F_m = \frac{M_z \cdot 2000}{d} \quad (12)$$

$$F_v < K_{sl} \cdot a \cdot s^{1-z} < F_m \quad (13)$$

Kjer je: M_z — dovoljeni moment stroja (kpm)

d_w — premer obdelovanca (mm)

F_m — mejna dovoljena sila momenta (kp)

F_v — rezalna sila (kp)

K_{sl} — globina rezanja (mm)

Tako lahko izrazimo najvišje podajanje omejeno z momentom

$$s = \frac{2000 \cdot 120^{1(1-0,26)}}{263 \cdot 5,5 \cdot 254} = 0,56 \text{ mm/vrt} \quad (14)$$

c) Omejitev moči

$$N_c = \frac{F_v \cdot v}{6120 \cdot \eta} < N_m \quad (15)$$

N_c — potrebna moč za rezanje (kW)

F_v — rezalna sila (kp)

N_m — moč glavnega motorja (kW)

η — mehanski izkoristek (0,85)

v — rezalna hitrost

$$v < \frac{6120 \cdot \eta \cdot N_m}{F_v} = \frac{6120 \cdot \eta \cdot N_m}{K_{sl} \cdot a \cdot s^{1-z}}$$

$$= \frac{6120 \cdot 0,85 \cdot 22}{263 \cdot 5,5 \cdot 0,3^{1-0,26}} = 197,4 \text{ m/min}$$

Pri izračunu največje rezalne hitrosti, omejene z močjo stroja, smo upoštevali največje podajanje, omejeno glede na hrapavost obdelane površine.

4.3. Določitev optimalne rezalne hitrosti in prikaz v diagramih

Optimalno rezalno hitrost izračunamo z enačbo (8):

$$V_{opt} = s^{-m} \cdot C_{TS} \cdot \left(\frac{R_1}{S} \cdot \frac{n}{1-n} \right)^n$$

Za podajanje vzamemo: $s = 0,3$ mm/vrt. To vrednost nam daje enačba za omejitvev podajanja glede na hrapavost površine (11).

$$V_{opt} = C_{TS} \cdot 0,30^{-0,057} \cdot \left(\frac{1,33}{4,93} \cdot \frac{0,380}{1-0,380} \right)^{0,380} = C_{TS} \cdot 0,541 \quad (16)$$

Ker stružnih ploščic po določeni obrabi ne brusimo, ampak jih odvržemo, sledi:

$$R_2 = R_3 = U = 0 \text{ od tod } S = R_1 t_w + W/e = 1,33 \cdot 0,6 + 33/8 = 4,93$$

za dobljeno obrabo $VB = 0,80$ mm : $C_{TS} = 147,9$

$$V_{opt1} = 147,9 \cdot 0,541 = 80,0 \text{ m/min}$$

za dovoljeno obrabo $VB = 1,00$ mm: $C_{TS} = 171,1$

$$V_{opt2} = 171 \cdot 0,541 = 92,5 \text{ m/min}$$

za dovoljeno obrabo $VB = 1,20$ mm: $C_{TS} = 200,4$

$$V_{opt3} = 200,4 \cdot 0,541 = 108,3 \text{ m/min}$$

Izračunane optimalne rezalne hitrosti so manjše od rezalne hitrosti $v = 197,34$ m/min, katera je določena z močjo glavnega motorja in jih zato lahko uporabljamo.

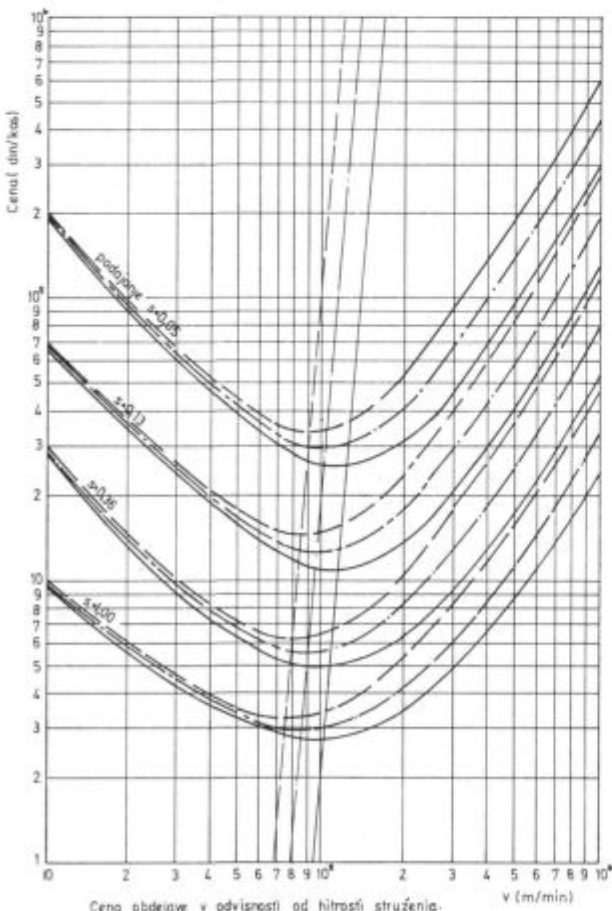
Z upoštevanjem vseh pogojev dela, dobi v našem primeru stroškovna enačba (7) obliko:

$$C = R_1 \cdot t_n + \frac{R_1 \cdot \Pi \cdot d_w \cdot l_o}{s \cdot v} + \frac{\Pi \cdot d_w \cdot l_o}{C_{TS}^{1/n}} \cdot s^{(m/n)-1} \cdot v^{(1/n)-1} \cdot (R_1 \cdot t_w + W/e)$$

ko vstavimo številčne vrednosti dobi enačba obliko:

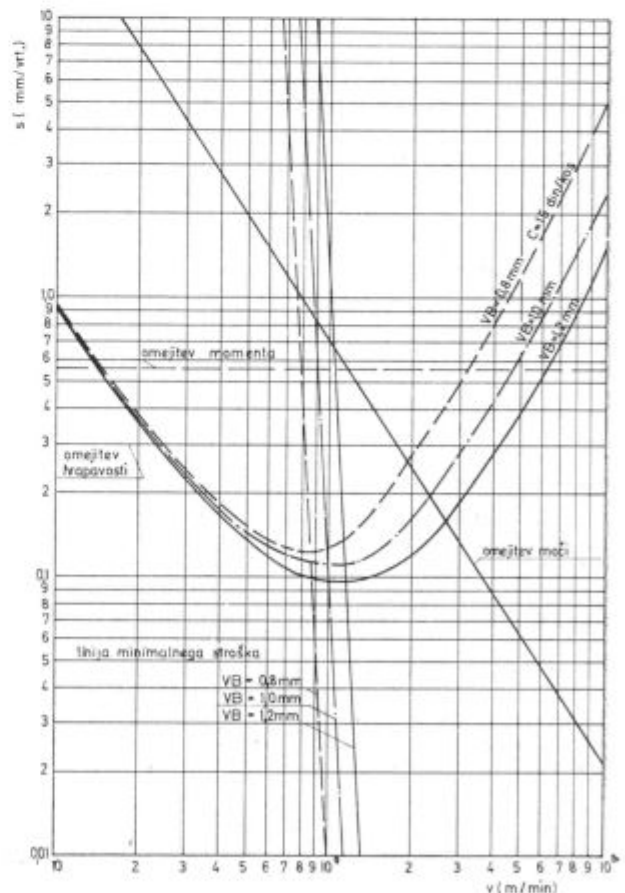
$$C = 1,33 \cdot 1 + 1,33 \cdot \Pi \cdot 0,254 \cdot 83 \cdot s^{-1} \cdot v^{-1} + \Pi \cdot 0,254 \cdot 83 \cdot C_{TS}^{-1/380} \cdot s^{(0,057/0,380)-1} \cdot v \cdot (1,33 \cdot 0,6 + 33/8) = 1,33 + 88,08 s^{-1} \cdot v^{-1} + 326,1 \cdot C_{TS}^{-2,632} \cdot s^{-0,851} \cdot v^{1,631} \quad (17)$$

S to enačbo prikažemo tabelarično, kako se spreminja obdelovalni strošek C (din/kos) v odvisnosti od rezalne hitrosti v (m/min) in podajanja s (mm/vrt) za posamezne širine obrabe VB . Rezultati, ki so izračunani v tabelah funkcije C (din/kos) so prikazani v diagramu $C-v$ za podajanja $s = 0,05, 0,13, 0,36, 1,00$ mm/vrt. (slika 1).



Slika 1

Cena obdelave v odvisnosti od hitrosti struženja V (m/min)



Slika 2

Določanje optimalne rezalne hitrosti v odvisnosti od obrabe orodja

Na osnovi izračunanih vrednosti za obstojnost orodnega materiala smo ugotovili potek cene za vzdolžno obdelavo ležajnega obroča. Iz diagrama, ki prikazuje razmerje med hitrostjo rezanja in ceno obdelave, lahko odčitamo tudi optimalno hitrost obdelave. V diagramu v-s, so podane krivulje VB = 0,8, 1,00, 141,20 (sl. 2), iz katerega odčitamo optimalno hitrost obdelave).

Koncept omejitev ali ovojnic (diagram na sliki 2) nas opozarja na to, da je problem obdelave odvisen od cele vrste spremenljivk, ko moramo omejitve, medsebojne odvisnosti in naše zahteve vskladiti v kompromisno izbiro parametrov obdelave. Elementi obdelovalnega sistema so: obdelovalni material (ki ga ne moremo spreminjati); obdelovalni stroj (je na izbiro v omejenem obsegu in z zelo različnimi parametri — revolverška ali polavtomatična stružnica), orodje (kjer lahko izbiramo pri držalnih in kvaliteti ploščic). Po takem pristopu in vsestranskem ocenjevanju posameznih komponent lahko dobimo dokončne optimalne pogoje za določene obdelovance.

V našem primeru smo napravili šele začetni pristop k zasledovanju cene obdelave v odvisnosti od posameznih parametrov obdelave. Odprtih je ostalo še vrsta parametrov, ki jih moramo pri celoviti optimizaciji obdelovalnega postopka upoštevati. Tu je še zasledovanje vpliva hladilnih tekočin, merilnega postopka med ali po obdelavi, način vpetja in izpetja, interni transport obdelovancev, izpadi proizvodnje, obseg serij idr.

ZAKLJUČEK

Članek je rezultat raziskav obdelovalnosti domačih materialov, v katerih se teži za tem, da se tehnologija obdelovalnosti raziskuje neposredno na obdelovalnosti in ne na probnih kosih. Raziskava je bila organizirana v okviru »Makro projekta« pri Fakulteti za strojništvo v Ljubljani pri projektu »Avtomatizacija maloserijske, individualne in srednjeseerijske proizvodnje«.

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Artikel ist das Ergebnis der Beständigkeitsuntersuchungen der Hartmetallplättchen Sandvik Coromat und der Bearbeitbarkeit des einheimischen Kugellagerstahles.

Die bisherigen Methoden für die Bestimmung der Bearbeitungsbedingungen beruhen auf den Erfahrungen, waren aber nicht immer die besten.

Die beschriebene Methode umfasst nicht die neuesten Ermittlungen auf dem Gebiet der Bearbeitbarkeit, sondern ergänzt nur die Ergebnisse der Werkzeugbeständigkeit mit dem gesamten bei der Bearbeitung auftretenden Aufwand. In der Praxis ist es manchmal schwer die Untersuchungsergebnisse in den praktischen Gebrauch einzuführen, da die Dauerhaftigkeit des Werkzeuges, sowohl von der Ungleichmässigkeit der bearbeitenden Teile, wie von dem Bestreben das Werkzeug in bestimmten Zeitabständen zu wechseln beeinflusst wird. Der Zweck dieser

Arbeit ist auch eine Methode für schnelle Berechnung der Bearbeitungskosten auf dem Computer zu geben. Es ist allgemein bekannt, dass alle Kalkulationen und die Berechnungen der Preise der Fertigteile auf den Daten aus der Technologie beruhen. Für die bessere Illustrierung dieser Methode ist ein praktischer Beispiel angegeben, an welchem die beschriebene Methode überprüft worden ist. Aus diesem Beispiel ist zu entnehmen, dass das Rechnen mit der Hand zu dauerhaft und praktisch unbrauchbar ist, deswegen ist die Anwendung des Computers und der entsprechenden Programme dringend. Aus dem verhältnismässig einfachem Drehbearbeitungsverfahren eines Kugellageringens ist zu ersehen, dass der Übergang auf die maschinelle Datenbearbeitung der technologischen Parametern nicht einfach ist, da die gesamten Daten und Informationen in einer entsprechenden Form oder Koeffizienten angegeben werden müssen.

SUMMARY

The paper presents results of investigation of the durability of Sandvik Coromat cemented carbide alloy bits and of the machinability of domestic materials for ball bearings.

The methods of determining the machining conditions were based till now only on experiences which were not always optimal. The described method does not include new findings on machinability but it only supplements the results of tool life time with evaluation of all the cost of machining. Often results of investigations cannot be directly transferred to practical use because tool life depends also on ununiformity of workpieces and on the

custom that the tool it to be changed after a certain time. The paper gives the method for fast evaluation of machining costs by computer. It is well known that all the calculations and price determinations of products are based on data given by technology. The method is illustrated a practical example on which the described method was tested. The example shows that manual calculation is very long lasted and practically useless, therefore computer and corresponding programs are necessary. A relatively simple process of turning and bearing ring shows that transition to a computer procesing of technological parameters is not simple because all the data and informations must be given in a corresponding form or as coefficients.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

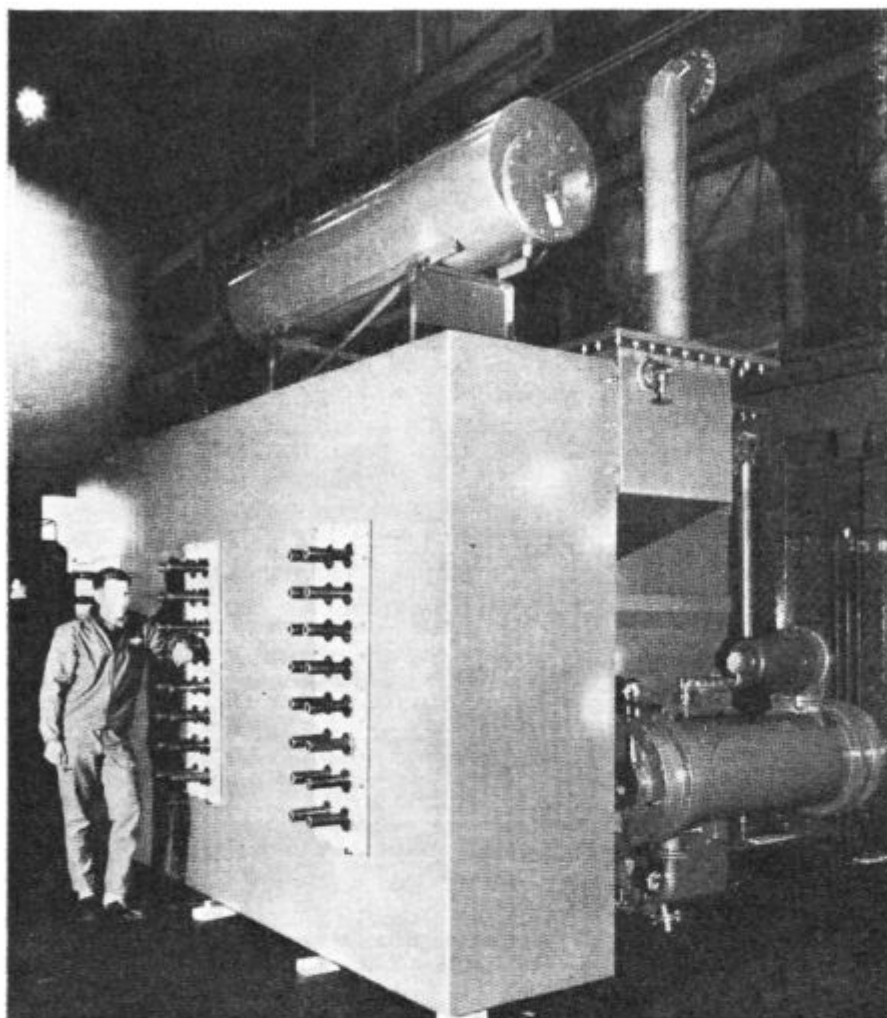
В статье даны итоги исследования устойчивости пластинок из твёрдого сплава Sandvik Coromat и способность к обработке домашнего материала который употребляется для выработке шариководшипников.

Известные до сих пор методы определения условий способности к обработке базировал на выводах которые не были всегда самые себе подходящие. Описанный метод не со-

держит новых результатов в области способности к обработке но лишь только дополняет известные данные устойчивости прибора и даёт оценку всех расходов обработки. Часто нет возможности непосредственно передать итоги исследования к применению в промышленности, так как на выносливость прибора для обработки влияет также неравномерность обрабатываемого изделия. Не без влияния на обрабатываемость также введёная практика сменять прибор и определённые промежутки времени.

Цель статьи также предложить метод для быстрого определения расходов обработки при помощи счётчика. Известно и взято

в учёт, что все расчёты и определение цены изделия основано на данных которые даёт технология производства. Для лучшего пояснения рассмотрен уже проверенный пример как метод который употребляется в промышленности. Из описанного примера ясно, что ручной способ подсчёта очень медленный и поэтому непригодный; необходимо применение счётчика и соответствующих программ. Из сравнительно простого процесса обтачивания кольца подшипника установлено, что переход на обработку данных технических показателей при помощи счётчика не так простой, так как все данные и информации должны быть поданы в соответствующей форме или в виде коэффициентов.



FURNACE TRANSFORMERS

Three-phase furnace transformer with on-load tap changer, rating 16,5 MVA, voltage ratio 10 000/190 — 150 — 80 V for Yugoslavia 1971.

Yugoslavian customers

Demag Elektrometallurgie GmbH/Rüse

Elkem — Spigerverket A.S./Jugohrom

Elkem — Spigerverket A.S./Elektrobosna

Latest orders

No	Phase	Rating KVA	Country
1	three	60000/72000	Great Britain
7	single	15000	Norway
4	single	11000	Sweden
1	three	6000/7200	Ghana
1	three	7500/9000	Philippines



NATIONAL INDUSTRI

DRAMMEN — SARPSBORG — STEINKJER

P.O.BOX 469, 3001 DRAMMEN, NORWAY, TELEPHONE (02) 83 78 70

FROM ABROAD 472 83 78 70

TELEX 16623, DELTA-N, TELEGRAM «KOBBER»

Faktorski poskusi in ortogonalni polinomi

V članku je opisan primer, kjer smo z metodo ortogonalnih polinomov obdelali podatke, ki smo jih dobili pri faktorskem poskusu $3 \times 3 \times 3$. Z analizo variance smo ugotovili, kateri faktor je statistično pomemben. S pomočjo ortogonalnih polinomov smo zapisali tudi regresijsko enačbo (polinom), v kateri so bili vsi členi statistično pomembni.

UVOD

Faktorski poskus lahko zelo uspešno uporabimo, če želimo raziskati, kakšna je povezava med neko odvisno spremenljivko in več neodvisnimi vplivi (faktorji), ki jih lahko poljubno spreminjamo. Ni nujno, da so ti vplivi vedno kvantitativni, t. j. da se posamezni faktorji dajo izraziti s številkami. Lahko imamo opraviti s kvalitativnimi vplivi, kjer različnih vrednosti faktorja ne moremo izraziti s številkami. Poseben primer take faktor-ske analize je tudi latinski kvadrat, ki je bil že opisan v Železarskem zborniku.¹

Omejili se bomo na opis faktor-skega poskusa s kvantitativnimi faktorji. Preden se lotimo poskusa, t. j. merjenja opazovane spremenljivke, določimo nekaj diskretnih vrednosti posameznih faktorjev, pri katerih nameravamo meriti vrednosti odvisne spremenljivke Y. Tem vrednostim faktorjev pravimo nivoji. Zaželeno je, da si nivoji enega faktorja sledijo po aritmetičnem zaporedju, t. j. da so razlike med posameznimi vrednostmi nivojev enega faktorja konstantne. Potrebujemo toliko meritev odvisne spremenljivke, kolikor je možnih različnih kombinacij nivojev vseh faktorjev.

V splošnem tako dobimo neko končno število različnih vrednosti opazovane spremenljivke Y, ki so porazdeljene z večjo ali manjšo varianco okrog neke srednje vrednosti \bar{Y} .

Efekt posameznih faktorjev imenujemo spremembo vrednosti odvisne spremenljivke, ki nastane zaradi spremembe vrednosti nekega faktorja. Če ta efekt določimo tako, da računamo spremembo povprečja vrednosti \bar{Y} po nivojih vseh ostalih faktorjev, rečemo takemu efektu glavni efekt. V primeru, ko je efekt enega faktorja odvisen od nivojev nekega drugega faktorja, pravimo, da imamo opraviti z interakcijo.

Vse te efekte lahko najbolj zanesljivo ugotovimo z analizo variance, ki je tudi že bila opisana v Železarskem zborniku.² Vsoto kvadratov odstopanj posameznih vrednosti odvisne spremenljivke Y od povprečja \bar{Y} lahko namreč razstavimo na prispevke posameznih efektov.

ANALIZE VARIANCE PRI FAKTORSKEM POSKUSU $3 \times 3 \times 3$

Omejimo se na primer faktor-skega poskusa s tremi faktorji: A, B in C. Pri tem bomo odvisno spremenljivko Y na primer opazovali pri a nivojih faktorja A, b nivojih faktorja B in c nivojih faktorja C. Potrebovali bomo $a \times b \times c$ poskusov, če bomo pri vsaki kombinaciji naredili le po eno meritev.

Označimo neko določeno vrednost odvisne spremenljivke z $Y_{i,j,k}$, kjer indeks i, j, k pomeni, da pripada i-temu nivoju faktorja A, j-temu nivoju faktorja B in k-temu nivoju faktorja C.

Povprečno vrednost \bar{Y} izračunamo:

$$\bar{Y} = \frac{1}{abc} \sum_{i,j,k} Y_{i,j,k}$$

Vsoto kvadratov Q odstopanj posameznih vrednosti $Y_{i,j,k}$ od \bar{Y} izračunamo po znani formuli:

$$Q = \sum_{i,j,k}^{a,b,c} (Y_{i,j,k} - \bar{Y})^2 = \sum_{i,j,k}^{a,b,c} Y_{i,j,k}^2 - \frac{\left(\sum_{i,j,k}^{a,b,c} Y_{i,j,k} \right)^2}{a \cdot b \cdot c}$$

Vrednost Q razstavimo na vsoto prispevkov posameznih efektov:

$$Q = A_Y + B_Y + C_Y + (AB)_Y + (AC)_Y + (BC)_Y + O_Y$$

Pri tem so prispevki glavnih efektov definirani s sledečimi izrazi:

Faktor A:

$$A_Y = \sum_{i=1}^a \frac{\left(\sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c Y_{i,j,k} \right)^2}{b \cdot c} - \frac{\left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c Y_{i,j,k} \right)^2}{a \cdot b \cdot c}$$

Faktor B:

$$B_Y = \sum_{j=1}^b \frac{\left(\sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c Y_{i,j,k} \right)^2}{a \cdot c} - \frac{\left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c Y_{i,j,k} \right)^2}{a \cdot b \cdot c}$$

Faktor C:

$$C_Y = \sum_{k=1}^c \frac{\left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{i,j,k} \right)^2}{a \cdot b} - \frac{\left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c Y_{i,j,k} \right)^2}{a \cdot b \cdot c}$$

Prispevek interakcij:

$$\text{Faktorja A in B: } (AB)_Y = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \left(\sum_{k=1}^c Y_{i,j,k} \right)^2}{c} - A_Y - B_Y$$

$$\text{Faktorja A in C: } (AC)_Y = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \left(\sum_{j=1}^b Y_{i,j,k} \right)^2}{b} - A_Y - C_Y$$

$$\text{Faktorja B in C: } (BC)_Y = \frac{\sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \left(\sum_{i=1}^a Y_{i,j,k} \right)^2}{a} - B_Y - C_Y$$

$$\text{Ostanek O: } O_Y = Q - A_Y - B_Y - C_Y - (AB)_Y - (AC)_Y - (BC)_Y$$

Te izraze navadno prikažemo s primerno tabelo (Tabela I).

Vrednosti F izračunamo tako, da delimo posamezne povprečne kvadrate s s_o^2 in jih primerjamo s tabeliranimi vrednostmi pri izbrani vrednosti za napake prve vrste (α). Te namreč potrebujemo pri testiranju ničelne hipoteze, t. j. pri ugotavljanju, če ne gre morda pri določeni variaciji le za slučajnostne vplive. Trdimo, da je efekt statistično pomemben, če je izračunana F-vrednost večja od tabelirane vrednosti² in je pri tem $\alpha\%$ verjetno, da smo naredili napako prve vrste.³

Tabela I.

Vir variacij	Vsota kvadratov	Stopnje prostosti	Povprečni kvadr.	F-vrednost
Glavni efekti				
A	A_Y	$a - 1$	s_A^2	s_A^2/s_o^2
B	B_Y	$b - 1$	s_B^2	s_B^2/s_o^2
C	C_Y	$c - 1$	s_C^2	s_C^2/s_o^2
Interakcije				
AB	$(AB)_Y$	$(a - 1)(b - 1)$	s_{AB}^2	s_{AB}^2/s_o^2
AC	$(AC)_Y$	$(a - 1)(c - 1)$	s_{AC}^2	s_{AC}^2/s_o^2
BC	$(BC)_Y$	$(b - 1)(c - 1)$	s_{BC}^2	s_{BC}^2/s_o^2
Ostanek				
O	O_Y	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	s_o^2	
Vsota	Q	$(abc - 1)$		

V primeru, ko imamo opraviti s kvantitativni faktorji, ki so definirani v več nivojih, pa lahko z metodo ortogonalnih polinomov pridemo še do dodatnih informacij. Ne ugotovimo le tega, če je na primer glavni efekt faktorja A statistično pomemben, ampak tudi za kakšno odvisnost pri tem gre. Če zapišemo glavni efekt v obliki polinoma nivojev faktorja A, lahko s to metodo ugotovimo, katera stopnja polinoma je statistično pomembna in katera ne. Pri tem pa je najvišja stopnja polinoma $(a - 1)$.

To je namreč zelo pomembno, če želimo iskati regresijsko odvisnost Y od vseh kvantitativnih faktorjev. Če je več faktorjev z večjim številom nivojev, je možnih členov v polinomnem razvoju lahko zelo veliko.

ORTOGONALNI POLINOMI V FAKTORSKEM POSKUSU $3 \times 3 \times 3$

Oglejmo si, kako bi si s to metodo lahko pomagali v primeru, če imamo opraviti z analizo podatkov, kjer smo variirali 3 faktorje v treh nivojih in smo meritev izvršili samo enkrat. Tako smo dobili 27 podatkov.

Faktor A ... nivoji X_i ($i = 1, 2, 3$)

Faktor B ... nivoji X_j ($j = 1, 2, 3$)

Faktor C ... nivoji X_k ($k = 1, 2, 3$)

V takem primeru bi bila regresijska enačba:

$$\hat{Y}_{i,j,k} = b_0 + b_1 X_i + b_2 X_j + b_3 X_k + b_4 X_i^2 + b_5 X_j^2 + b_6 X_k^2 + b_7 X_i X_j + b_8 X_i X_k + b_9 X_j X_k + b_{10} X_i^2 X_j + b_{11} X_i^2 X_k + b_{12} X_i X_j^2 + b_{13} X_j^2 X_k + b_{14} X_i X_k^2 + b_{15} X_j X_k^2 + b_{16} X_i^2 X_j^2 + b_{17} X_i^2 X_k^2 + b_{18} X_j^2 X_k^2$$

pri čemer bi bile X_i posamezne vrednosti nivojev faktorja A, X_j bi bile vrednosti nivojev faktorja B in X_k vrednosti nivojev faktorja C. Prvih 7 členov predstavlja glavne efekte, ostali pa interakcije.

Kateri pa so statistično pomembni?

Na to vprašanje nam odgovori metoda ortogonalnih polinomov. Da se dokazati, da se zgornja regresijska enačba da zapisati v obliki:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{i,j,k} = & A_0 + A_1 \xi_{1i} + A_2 \xi_{1j} + A_3 \xi_{1k} + A_4 \xi_{2i} + \\ & + A_5 \xi_{2j} + A_6 \xi_{2k} + A_7 \xi_{1i} \xi_{1j} + A_8 \xi_{1i} \xi_{1k} + \\ & + A_9 \xi_{1j} \xi_{1k} + A_{10} \xi_{2i} \xi_{1j} + A_{11} \xi_{2i} \xi_{1k} + A_{12} \xi_{1i} \xi_{2j} + \\ & + A_{13} \xi_{2j} \xi_{1k} + A_{14} \xi_{1i} \xi_{2k} + A_{15} \xi_{1j} \xi_{2k} + A_{16} \xi_{2i} \xi_{2j} + \\ & + A_{17} \xi_{2i} \xi_{2k} + A_{18} \xi_{2j} \xi_{2k}, \end{aligned}$$

pri čemer so $\xi_1, \xi_{1j}, \xi_{1k}$ ortogonalni polinomi⁴ prve stopnje, $\xi_{2i}, \xi_{2j}, \xi_{2k}$ pa ortogonalni polinomi druge stopnje. Če si nivoji posameznega faktorja sledijo po aritmetičnem zaporedju z razliko, ki je enaka enoti, so ti polinomi enaki:

$$\begin{aligned} \xi_1: & -1, 0, +1 \\ \xi_2: & +1, -2, +1 \end{aligned}$$

Zaradi lastnosti

$$\begin{aligned} \sum_j \xi_{1i} \xi_{2i} &= 0 \\ \text{in } \sum_i \xi_{1i} &= \sum_i \xi_{2i} = 0 \end{aligned}$$

lahko izračunamo koeficiente A_0 do A_{18} po formulah:

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{i,j,k}}{27} \\ A_1 &= \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{i,j,k} \cdot \xi_{1i}}{3 \cdot 3 \cdot \sum_{i=1}^3 (\xi_{1i})^2} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{i,j,k} \xi_{2j} \xi_{2k}}{3 \cdot \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 (\xi_{2j}^2 \xi_{2k}^2)} \end{aligned} \quad (1) \quad (18)$$

Podobno lahko izračunamo za tak primer tudi prispevke posameznih členov k vsoti kvadratov:

$$\begin{aligned} \sum_{ijk} Y_{ijk}^2 - \frac{\left(\sum_{ijk} Y_{ijk}\right)^2}{27} &= \sum_{ijk} Y_{ijk}^2 - 27 A_0^2 = \\ &= 27 A_0^2 + 9 A_1^2 \sum_{i=1}^3 \xi_{1i}^2 + 9 A_2^2 \sum_{i=1}^3 \xi_{2i}^2 + \\ &+ \dots - 27 A_0^2 \end{aligned}$$

Prispevek prvega člena, oziroma prvega glavnega efekta (linearnega) faktorja A:

$$\begin{aligned} Q_{A1} &= A_1^2 \cdot 9 \cdot \sum_{i=1}^3 \xi_{1i}^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{ijk} \cdot \xi_{1i}\right)^2}{9 \cdot \sum_{i=1}^3 (\xi_{1i})^2} \\ &\cdot 9 \cdot \sum_{i=1}^3 \xi_{1i}^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{ijk} \xi_{1i}\right)^2}{9 \cdot \sum_{i=1}^3 (\xi_{1i})^2} \end{aligned}$$

ANALIZA VARIANCE — RAČUNSKI PRIMER

Oglejmo si praktični primer obdelave podatkov faktorjskega poskusa $3 \times 3 \times 3$.⁽⁵⁾

Merili* smo čas (Y), ki je bil potreben za popolno redukcijo rude v odvisnosti od temperature (T), debeline plasti (P) in pretoka vodika (L). Vsak faktor je bil podan v treh nivojih. Nivoje smo označili z $-1, 0, +1$, da smo tako ustregli zahtevam nadaljnje obdelave z ortogonalnimi polinomi.

Nivoji posameznih faktorjev:

Faktor T (temperatura)	$T_0 = 700^\circ \text{C}$	-1
	$T_1 = 600^\circ \text{C}$	0
	$T_2 = 500^\circ \text{C}$	+1
Faktor P (debeline plasti)	$P_0 = 1,0 \text{ cm}$	-1
	$P_1 = 1,5 \text{ cm}$	0
	$P_2 = 2,0 \text{ cm}$	+1
Faktor L (pretok plina)	$L_0 = 45,4 \text{ l/h}$	-1
	$L_1 = 37,8 \text{ l/h}$	0
	$L_2 = 30,3 \text{ l/h}$	+1

V tabeli II so podane opazovane vrednosti v minutah, ki pripadajo različnim nivojem posameznih faktorjev. Meritev je bila narejena le enkrat.

Tabela II.

	P ₀			P ₁			P ₂		
	L ₀	L ₁	L ₂	L ₀	L ₁	L ₂	L ₀	L ₁	L ₂
T ₀	35	44	58	48	60	77	63	78	98
T ₁	50	63	82	68	86	110	90	112	147
T ₂	78	95	115	104	126	161	143	166	210

Najprej izračunamo vsoto vseh vrednosti $Y_{i,j,k}$ in pripadajočo vsoto kvadratov Q:

* Meritve je opravil J. Zaveljcina, dipl. ing. met. pri svojem diplomskem delu. Avtor članka Brudar Božidar — strokovni sodelavec raziskovalnega oddelka — se mu za posredovane podatke in sodelovanje najlepše zahvaljuje.

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{i,j,k} = 2567$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{i,j,k}^2 = 290633$$

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{i,j,k} \right)^2}{27} = 244055$$

$$Q = \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 Y_{ijk}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{ijk} \right)^2}{27} = 46578$$

Nato prepisemo tabelo II v primernejšo obliko za računanje glavnih efektov in interakcij. V naslednjih tabelah so podane vrednosti, ki pripadajo posameznim nivojem tretjega faktorja:

T × L				
	L ₀	L ₁	L ₂	Vsota
T ₀	146	182	233	561
T ₁	208	261	339	808
T ₂	325	387	486	1198
Vsota	679	830	1058	2567

T × P				
	P ₀	P ₁	P ₂	Vsota
T ₀	137	185	239	561
T ₁	195	264	349	808
T ₂	288	391	519	1198
Vsota	620	840	1107	2567

L × P				
	P ₀	P ₁	P ₂	Vsota
L ₀	163	220	296	679
L ₁	202	272	356	830
L ₂	255	348	455	1058
Vsota	620	840	1107	2567

V vsaki tabeli izračunamo vsoto kvadratov posameznih vrednosti (groba vsota kvadratov) in jo delimo s 3, ker smo pri vsaki vrednosti v teh tabelah morali sešteti po tri podatke. Nato odštejemo

vrednost izraza $\frac{\left(\sum_{ijk} Y_{i,j,k} \right)^2}{27}$ in imenujemo razliko totalna vsota kvadratov.

Iz tabele T × L dobimo:

Groba vsota kvadratov:	275541,66	
Korektura za povprečje:	244055,14	
Totalna vsota kvadratov:	31486,52	(19)

Iz tabele T × P dobimo:

Groba vsota kvadratov:	281607,66	
Korektura za povprečje:	244055,14	
Totalna vsota kvadratov:	37552,52	(20)

Iz tabele L × P dobimo:

Groba vsota kvadratov:	265754,33	
Korektura za povprečje:	244055,14	
Totalna vsota kvadratov:	21699,19	(21)

Grobo vsoto nekega glavnega efekta dobimo tako, da seštejemo kvadrate vsot vrednosti, ki pripadajo posameznim nivojem ostalih faktorjev. Rezultat delimo z 9, saj je vrednost pri vsakem nivoju nekega faktorja sestavljena iz 9 vrednosti Y, ki pripadajo ostalim faktorjskim nivojem.

Tako dobimo na primer grobo vsoto kvadratov za glavni efekt faktorja T takole:

$$(561^2 + 808^2 + 1198^2) : 9 = 2669765$$

Od te vrednosti je treba odšteti korekturo za

povprečje $\frac{\left(\sum_{ijk} Y_{i,j,k} \right)^2}{27}$ in tako dobimo vsoto kvadratov za glavne efekte:

$$\text{Vsota kvadratov za T : } 266976,5 - 244055,1 = 22921,4$$

$$\text{Vsota kvadratov za L : } 252145,0 - 244055,1 = 8089,9$$

$$\text{Vsota kvadratov za P : } 257272,1 - 244055,1 = 13217,0$$

Prispevke k vsoti kvadratov Q od interakcij med pari faktorjev izračunamo tako, da od totalne vsote kvadratov (19, 20, 21) odštejemo oba glavna efekta.

Tako dobimo za interakcijo T × L:

$$31486,5 - 22921,4 - 8089,9 = 475,2$$

$$\text{Vsota kvadratov, ki pripada interakciji T × P: } 37552,5 - 22921,4 - 13217,0 = 1414,1$$

$$\text{Vsota kvadratov, ki pripada interakciji L × P: } 21699,2 - 8089,9 - 13217,0 = 392,3$$

Končno lahko zapišemo že znano tabelo za analizo variance v obliki (Tabela III)

Vsoto kvadratov, ki pripada ostanku, smo določili tako, da smo od skupne vsote Q odšteli prispevke glavnih efektov in interakcijskih efektov.

Ako želimo vedeti, če ni morda prispevek nekega faktorja statistično nepomemben, primerjamo izračunano F-vrednost z ustrezno vrednostjo iz tabel.⁽²⁾ Pri $\alpha = 0,05$ so vsi efekti pomembni.

Tabela III.

Vir variacij	Vsota kvadratov	Prost stopnje	Povprečni kv.	F - vredno.
Glavni efekti				
T	22921,4	2	11460,7	1348
L	8089,9	2	4045,0	476
P	13217,0	2	6608,5	777
Interakcije:				
T × L	475,2	4	118,8	14
T × P	1414,1	4	353,5	42
L × P	392,3	4	98,1	12
Ostanek:	68,1	8	8,5	
Vsota	46578,0	26		

RACUNSKI PRIMER Z ORTOGONALNIMI POLINOMI

S pomočjo ortogonalnih polinomov lahko še nadalje razcepimo prispevke k vsoti kvadratov. Ker imamo le po tri nivoje posameznih faktorjev, bo najvišja druga stopnja polinoma pri glavnih efekti, oziroma četrta stopnja pri interakcijah.

Tabela IV.

Faktor	Linearna komponenta	Divizor	Kvadr. komp.	Divizor	Vsota kvadratov		Totalna vsota
					Lin. komp.	Kvadr. komp.	
T	637	18	143	54	22542,7	378,7	22921,4
L	379	18	77	54	7980,1	109,8	8089,9
P	487	18	47	54	13176,1	40,9	13217,0

Tabela V.

Interakcija AB	$L_A L_B$	D	$Q_A L_B$	D	$L_A Q_B$	D	$Q_A Q_B$	D
TL	74	12	-14	36	22	36	2	108
TP	129	12	25	36	19	36	-1	108
LP	67	12	25	36	-5	36	5	108

S črko L je označena linearna komponenta in-terakcije, s Q kvadratna, D pa predstavlja divizor.

Prispevki k vsoti kvadratov:

Interakcija AB	$L_A L_B$	$Q_A L_B$	$L_A Q_B$	$Q_A Q_B$	Skupaj
TL	456,3	5,4	13,4	0,0	475,1
TP	1386,8	17,4	10,0	0,0	1414,2
LP	374,1	17,4	0,7	0,0	392,2

Za praktično računanje je ugodno, če si izdelamo sledečo tabelo (Tabela IV):

V stolpcu z naslovom Linearna komponenta so navedene vrednosti števecov, izračunane po formulah za linearne regresijske koeficiente glavnih efektov. V stolpcu z naslovom Kvadratna komponenta pa so navedene vrednosti števecov, ki so izračunane po formulah za kvadratne regresijske koeficiente glavnih efektov (formule od 1 do 6). Divizor, ki pripada vsakemu stolpcu, je imenovalec iz pripadajočih formul. Vsoto kvadratov določimo tako, da vsako komponento kvadriramo in delimo s pripadajočim divizorjem. Skupna vsota kvadratov se mora ujemati z vrednostjo iz tabele III.

Podobno naredimo tudi pri interakcijskih členih. V tabeli V so navedene vrednosti števecov in imenovalcev, ki so izračunane iz formul za regresijske koeficiente (formule od 7 do 18). Na povsem enak način kot za glavne efekte lahko izračunamo tudi prispevke k vsoti kvadratov za interakcijske efekte.

Končno pridemo do izboljšane forme za analizo variance (Tabela VI.), iz katere je razvidno tudi, kolikšen je prispevek posameznih komponent efektov. Ker pripada vsaka komponenta efekta eni prostostni stopnji, primerjamo izračunane vrednosti F le s tabelirano vrednostjo $F_{1,8}$, ki znaša pri $\alpha = 0,05$ 5,317, pri $\alpha = 0,01$ pa 11,259. Statistično pomembni efekti so označeni z zvezdico.

Tabela VI.

Vir variacij	Vsota kvadratov efekta	Vsota kvadratov komponent	Prost. stop.	Povpreč. kvadrat	F-vredn.
Glavni efekti					
T { linearni	22542,7	} 22921,4	1		2648,2*
kvadratni	378,7		1		444,9*
L { linearni	7980,1	} 8089,9	1		937,5*
kvadratni	109,8		1		12,9*
P { linearni	13176,1	} 13217,0	1		1547,9*
kvadratni	40,9		1		4,8
Dvofaktorske interakcije					
L _L L _T	456,3	} 475,1	1		53,6*
L _L Q _T	5,4		1		0,6
Q _L L _T	13,4		1		1,6
Q _L Q _T	0,0		1		0,0
L _L L _P	374,1	} 392,2	1		43,9*
L _L Q _P	0,7		1		0,1
Q _L L _P	17,4		1		2,0
Q _L Q _P	0,0		1		0,0
L _P L _T	1386,8	} 1414,2	1		162,9*
L _P Q _T	17,4		1		2,0
Q _P L _T	10,0		1		1,2
Q _P Q _T	0,0		1		0,0
Ostanek	68,1		8	8,5	
Skupaj	46577,9		26		

REGRESIJSKA ENACBA

Koeficiente dobimo tako, da posamezne komponente v tabelah IV in V delimo s pripadajočimi divizorji. Seveda upoštevamo le tiste komponente, ki so se izkazale pomembne pri razčlenitvi vsote kvadratov. Regresijsko enačbo torej zapišemo v obliki:

$$\hat{Y}_{i,j,k} = 95,07 + 35,39 \xi_{1i} + 2,65 \xi_{2i} + 6,17 \xi_{1i} \xi_{1j} + 27,06 \xi_{1k} + 21,06 \xi_{1j} + 1,43 \xi_{2j} + 5,58 \xi_{1j} \xi_{1k} + 10,75 \xi_{1i} \xi_{1k}$$

Pri tem zavzamejo linearne komponente ξ_i vrednosti $-1,0, +1$, kvadratne pa $1, -2, 1$. Indeksi i označujejo nivoje faktorja T, j nivoje faktorja L in k nivoje faktorja P.

Zelo ugodno je, če prikažemo to regresijsko enačbo z nomogramom (Slika 1).

Če si na primer izberemo temperaturo 600°C , debelino plasti $1,5\text{ cm}$ in pretok plina $37,8\text{ l/h}$, lahko pričakujemo, da bo čas, potreben za totalno redukcijo, približno 87 minut.

Če pa potrebujemo enačbo zapisano tako, da v njej nastopajo prave vrednosti (temperatura T v $^\circ\text{C}$, pretok L v l/h in debelina P v cm) in ne le ortogonalni polinomi, moramo v zgornji enačbi nadomestiti ξ_1 in ξ_2 s sledečimi izrazi:

$$\xi_{1i} = \frac{600^\circ\text{C} - T}{100^\circ\text{C}} \quad \xi_{2i} = 3 \cdot \xi_{1i}^2 - 2$$

$$\xi_{1j} = \frac{37,8\text{ l/h} - L}{7,5\text{ l/h}} \quad \xi_{2j} = 3 \cdot \xi_{1j}^2 - 2$$

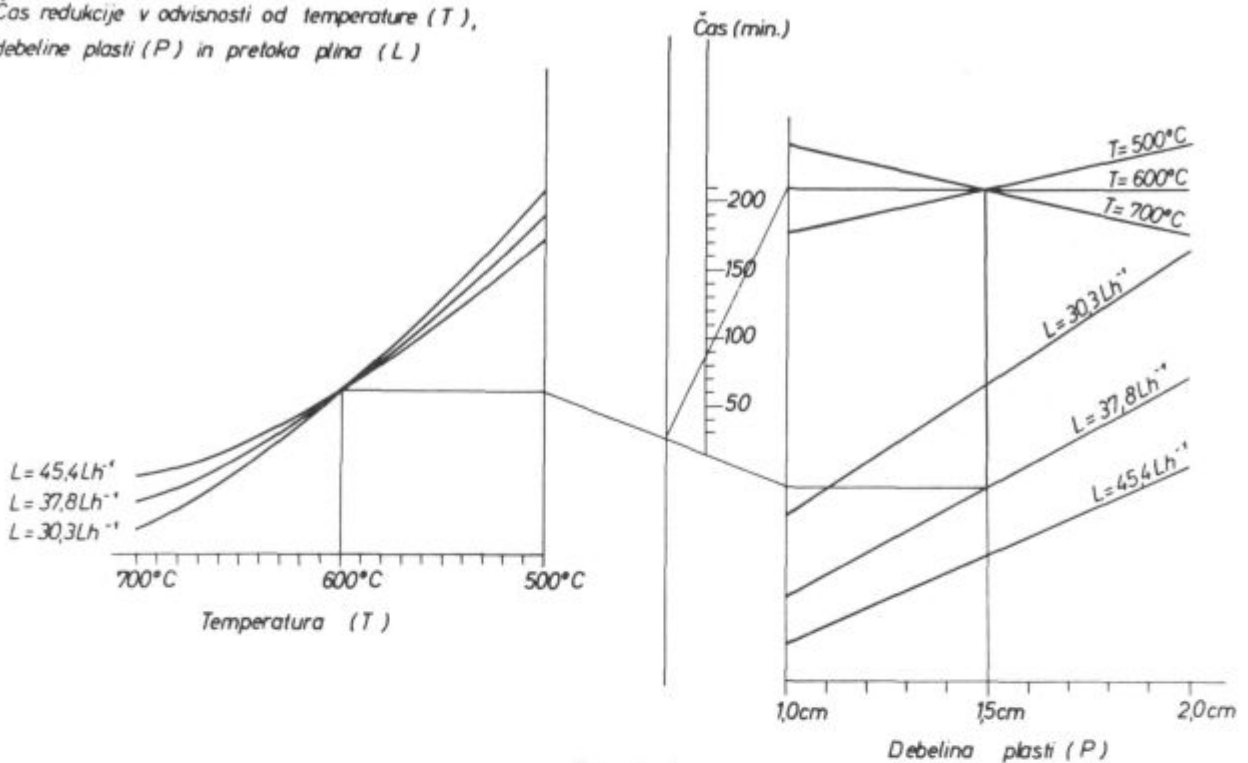
$$\xi_{1k} = \frac{P - 1,5\text{ cm}}{0,5\text{ cm}} \quad \xi_{2k} = 3 \cdot \xi_{1k}^2 - 2$$

ZAKLJUČEK

Pri raziskovalnem delu zelo pogosto iščemo odvisnost med eno odvisno in več neodvisnimi spremenljivkami. Če prav planiramo poskus, lahko na zelo učinkovit način z manjšim številom poskusov pridemo do odgovora na vprašanje, kateri faktor je statistično pomemben. Metoda ortogonalnih polinomov pa nam da še bolj koristno informacijo: pove nam, katera potenca polinoma je statistično pomembna. Regresijska enačba, ki je zapisana z ortogonalnimi polinomi, je primernejša za risanje nomograma.

V opisanem primeru smo zahtevali, da je med nivoji posameznih faktorjev konstantna razlika. To namreč olajšuje delo. Če nivoji niso enako odda-

Čas redukcije v odvisnosti od temperature (T),
debeline plasti (P) in pretoka plina (L)



Slika št. 1

Ijenci med seboj, je potrebna primerna transformacija, kar pa delo močno zakomplicira. Za obdelavo podatkov factorskega poskusa $3 \times 3 \times 3$ smo na raziskovalnem oddelku jeseniške železarne izdelali tudi program za naš računalnik IBM/360.

Računski primer, ki je opisan v tem članku, naj bi koristil tudi tistim raziskovalcem, ki nimajo na razpolago modernega elektronskega računalnika, saj takšna obdelava ne traja tako dolgo.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Aufgabe zahlreicher Untersuchungen ist die Abhängigkeit zwischen der abhängigen Veränderliche und einer grösseren oder kleineren Zahl unabhängiger Veränderlichen zu finden. Üblicherweise helfen wir uns so, dass die Werte der unabhängigen Veränderlichen geändert und die Werte der abhängigen Veränderliche, die sich da herausstellen, gemessen werden.

Wie gross der Einfluss der einzelnen unabhängigen Veränderlichen ist zeigt uns schon die übliche Varianzanalyse.

Die Methode der orthogonalen Polynome ermöglicht uns auch zu erfahren, um was für eine Abhängigkeit sich bei den einzelnen Faktoren handelt. Es kann festgestellt werden, ob die Abhängigkeit linear oder quadratisch ist bzw. wenn irgendeine höhere Potenz des Polynomen statistisch gesichert ist. Es ist günstig diese Faktoren so zu

Literatura

1. Rode Boštjan: Latinski kvadrat, Zelezarski zbornik št. 2, leto 1969, stran 141.
2. Rode B., J. Rodič: Statistično planiranje in vrednotenje metalurških raziskav, Zelezarski zbornik št. 2, leto 1968, str. 99.
3. Brudar Božidar: Preverjanje statističnih hipotez s pomočjo operacijskih karakteristik, Zelezarski zbornik št. 3, leto 1972, stran 175.
4. Brudar Božidar: Interpretacija diagramov, Zelezarski zbornik št. 1, leto 1973, stran 53.
5. Janez Zaveljcina: Diplomsko delo, FNT oddelek za montanistiko leto 1972.

wählen, dass die Unterschiede zwischen einzelnen Werten (Stufen) der unabhängigen Veränderlichen konstant gehalten werden.

Die nötige Versuchszahl soll der möglichen Zahl der einzelnen Faktorstufen gleich sein.

Im Artikel ist ein Beispiel für eine Analyse $3 \times 3 \times 3$ angegeben, wo drei unabhängige Veränderliche in drei Stufen geändert worden sind. Wir erhielten dadurch 27 Daten. Danach war eine Regressionsgleichung zu finden, welche die Abhängigkeit zwischen der abhängigen und unabhängigen Veränderliche deuten sollte und in welcher alle Glieder statistisch gesichert sein sollten.

Die Anleitung für eine solche Bearbeitung ist beschrieben, wenn uns keine moderne Elektronenrechenmaschinen zur Verfügung stehen.

SUMMARY

In many fields of research the relationship between some dependent variable and some number of independent variables (factors) is to be found. The values of the independent variables are usually varied and the values of the dependent variable are measured. The importance of

some specified independent variable can be found by the analysis of variance.

Using the method of orthogonal polynomials the type of this dependence can be found out. It can be namely decided which term in the polynomial expansion is sta-

tistically important. It is convenient to choose such values of the factor that the difference between two sequent values of the factor is constant. These values are called levels. The number of the necessary experimental values is equal to the number of the possible combinations with the levels of different factors.

In the article the example of an analysis $3 \times 3 \times 3$ is given where there are three independent variables varied

in three levels. So we got 27 experimental data. Then we wished to find the regression equation describing the relation between the dependent variable and the independent variables so that only the statistically important terms would be taken into account.

Is it also described how such an analysis could be done in the case where modern computer is not available.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разных областях исследований желаем определить зависимость между зависимой переменной и большим или малым числом независимых переменных (факторов). При этом пользуемся способом изменения величин независимых переменных и измеряем величину принятую зависимой переменной. Какое влияние имеют отдельные независимые переменные нам указывает обыкновенный вариационный анализ.

Метод ортогональных многочленов нам позволяет узнать также о какой зависимости суть, что касается отдельных факторов. Возможно также определить и дифференцировать линейную зависимость от квадратной зависимости; также случай если какая нибудь высшая степень полинома имеет статистическое значение. При этом нам содействует случай, если выбор факторов таков, что

разницы между отдельными величинами (что касается уровня) независимых переменных представляют постоянную величину. Необходимо выполнить такое количество опытов, чтобы оно отвечало числу возможных комбинаций отдельных факторов уровня.

Рассмотрен пример для анализа $3 \times 3 \times 3$, т. е. случай при котором изменяли три независимые переменные в трёх уровнях. В результате получено 27 данных. Последовало определение уравнения регрессии, которое объясняет зависимость между зависимой и независимыми переменными. Это уравнение должно содержать также все члены полинома, которые имеют статистическое значение.

Данно указание, каким образом выполнить такую обработку данных в случае, если не имеем в распоряжении современный электронный счётчик.

STRUČNA IZDANJA

○

»KLJUČ ZA ČELIK«

Kemijski sastav, oznake i usporedbe za više od 5.000 vrsta domaćih i inozemnih čelika.

Cijena 500.— din

○

»ALATNI ČELICI«

Detaljno razradjena problematika alatnih čelika domaće proizvodnje.

Cijena 500.— din

○

»KLJUČ ZA ALUMINIJ«

Tehnički priručnik za potrošače i preradivače aluminijskih materijala.

Cijena 500.— din

○

»OBOJENA METALURGIJA«

Opći tehnički priručnik za potrošače materiala od obojenih metala i termička obrada tih metala.

Cijena 600.— din

●
Za informacije obratiti se na

»METALBIRO«

Specializirano izdavačko i instruktajno poduzeće metalne struke

ZAGREB, Petrinjska br. 7

Telefon: 423-572

»CRNA METALURGIJA«

Opći tehnički priručnik za potrošače čelika.

Cijena 400.— din

○

»KOMPLET PROSPEKATA TIPIZIRANIH VRSTA ČELIKA U SFRJ«

Pregled tipiziranih kvaliteta i dimenzija čelika u SFRJ.

Cijena 600.— din

○

»TERMIČKA OBRADA ČELIKA«

Problematika termičke obrade čelika sa praktičnim primjerima iz prakse.

Cijena za jedan komplet 1.000.— din

○

»ATLAS LJEVAČKIH GREŠAKA« Knjiga I (Sivi liv)

Klasifikacija grešaka, opis i slika greške, uzroci nastajanja i mogućnost popravka.

Cijena 250.— din

○

INFORMATIVNI BILTENI

o stanju zaliha i kretanju cijena na tržištu za materijalne grane 114, 115 i kotrljajuće ležaje

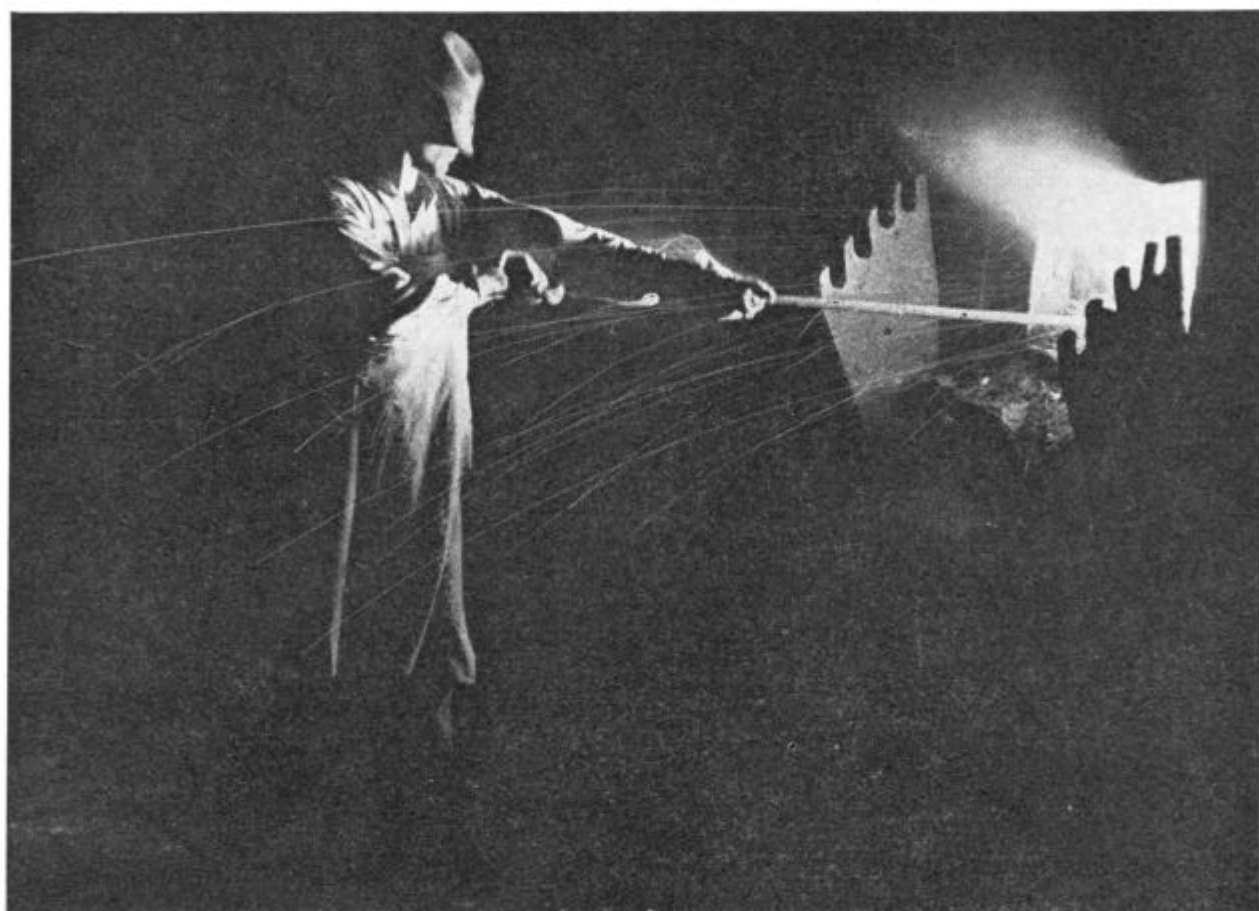
(Izlaze iz štampe svakog mjeseca)

950.— din

○

**Svinčeva jekla nova možnost
za povečano produktivnost obdelovalnih strojev**

**Svinčeva jekla, nov proizvod
ZPSŽ - ŽELEZARNE JESENICE**



**Svinčeva avtomatska jekla
ATJ 100 Pb**

Svinčeva konstrukcijska jekla
– ogljikova
– nizko legirana

Vsako jeklo lahko legiramo s svincem!

Odgovorni urednik: Jože Arh, dipl. inž. — Člani Jože Rodič, dipl. inž., Janez Barborič, dipl. inž., Aleksander Kveder, dipl. inž., Edo Žagar, tehnični urednik.

Oproščeno plačila prometnega davka na podlagi mnenja Izvršnega sveta SRS
— sekretariat za informacije št. 421-1/72 od 20. marca 1973

Naslov uredništva: ZPSŽ — Železarna Jesenice, 64270 Jesenice, tel. št. 81-231
int. 385 — Tisk: ČP »Gorenjski tisk«, Kranj