

DK 621.791.834.3

Nekaj iz razvoja avtomatičnih varilnih postopkov s posebnim ozirom na varjenje v zaščitni atmosferi CO₂*

VIKTOR PROSENC

V uvodu je podan obris o razvoju varilne tehnike v zadnjih desetletjih, predvsem primerjava produktivnosti in gospodarnosti ročnega varjenja in modernih avtomatičnih varilnih postopkov. V nadaljevanju so na kratko obdelane nekatere posebnosti varjenja v zaščitni atmosferi CO₂. To je najnovejši način, ki prihaja v poštev kot množinski postopek pri varjenju jekel. Ima določene značilnosti glede fizike električnega obloka, prehoda materiala v obloku, varilske kemije in metalurgije. V članku so obdelane nekatere ugotovitve s tega področja.

Ker je za uvedbo v domačo prakso potrebno neko razvojno delo tudi pri postopkih, ki so v svetu že znani, je v sestavku na kratko obravnavano stanje tega načina varjenja pri nas.

1. SPLOŠNO

1.1. Pregled razvoja varilnih načinov

Razvoj varilne tehnike se je v zadnjih desetletjih razmahnil v nesluteno širino. Razvili so veliko število popolnoma novih in hkrati izpopolnili veliko število že znanih načinov varjenja.

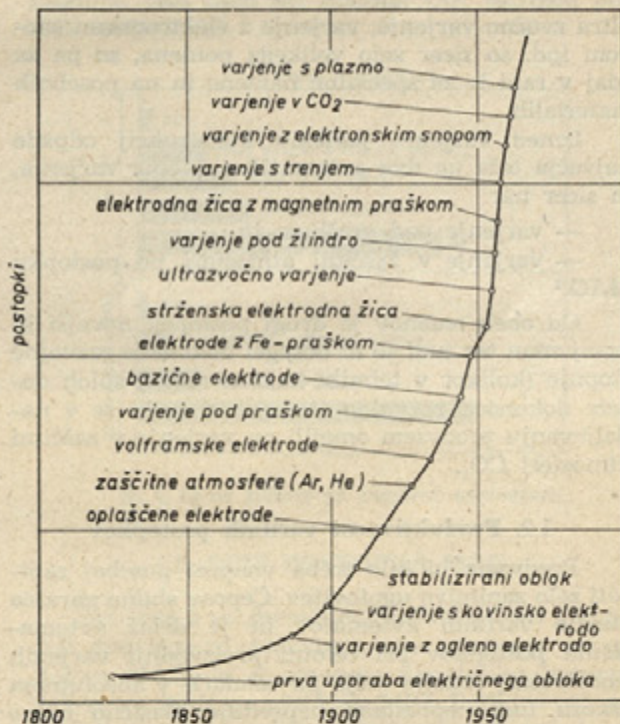
Na sliki 1 je podan časovni pregled o razvoju varilne tehnike od prvih začetkov oziroma raziskav o varjenju z električno energijo pa do odkritja modernih in najbolj dovršenih načinov (gledanih z ameriških vidikov) [1]. Iz diagrama so razvidni glavni mejniki na 150 let dolgi razvojni poti varilne tehnike.

Označeni so tudi nekateri dosežki, ki sami po sebi niso pomenili novih načinov varjenja, ampak so v že znanih, dobro vpeljanih omogočili večje kvalitativne ali kvantitativne skoke. Kot enega izmed takšnih bi lahko omenili vpeljavo bazičnih elektrod, ki je ročno obločno varjenje kvalitativno znatno izboljšalo, ali varjenje v atmosferi CO₂, ki je avtomatično varjenje v zaščitnih atmosferah ekonomsko utemeljeno razširilo na široko domeno jekel, ter slednjič še uvedbo varjenja s kratkim oblokom in tankimi žicami, ki je isti postopek usposobilo za uporabo tudi na osnovnih materialih zelo majhnih debelin.

Povrh v diagramu omenjenih novosti je bilo v zadnjih desetletjih vpeljanih še mnogo variacij k že navedenim postopkom, s katerimi je bilo možno razširiti uporabnost in povečati produktivnost. (V diagram niso vneseni načini uporavnega varjenja.)

Razvoj samih varilnih postopkov, pri katerih je električni oblok nosilec potrebne energije (gledano z evropskega vidika), je podan v grafikonu sl. 2 [2].

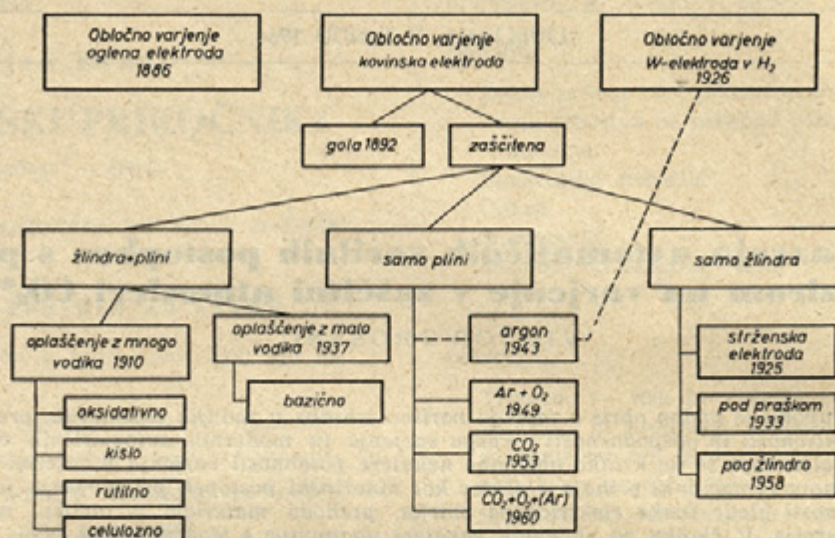
* Članek je prirejen po avtorjevem nastopnem predavanju na Fakulteti za strojništvo univerze v Ljubljani.



Sl. 1. Kronološki pregled razvoja varilnih postopkov

Pri tem so opazni nekateri odstopki od sl. 1. Podatki v diagramu veljajo predvsem za že pred prvo in drugo svetovno vojno industrijsko močno razvite evropske države. Če bi diagram prenesli na naše domače razmere, bi ga bilo treba še nekoliko korigirati, predvsem za dobo med obema svetovnima vojnama. V najnovejšem času pa varilna tehnika čedalje hitreje napreduje tudi v naši industriji.

Od vseh, v najnovejšem času razvitih postopkov, so prešli v najširšo uporabo v industriji samo nekateri, in to predvsem obločni. Drugi načini npr.



Sl. 2. Obločni postopki varjenja, razdelitev in razvoj

ultra zvočno varjenje, varjenje z elektronskim snopom ipd. so sicer zelo velikega pomena, so pa za zdaj v rabi le za specialne namene in na posebnih materialih.

Izmed varjenih jeklenih konstrukcij odpade največja teža na dva avtomatična načina varjenja, in sicer na:

- varjenje pod praškom in
- varjenje v zaščitni atmosferi po postopku MAG.¹

Od obeh načinov je drugi postopek novejši in manj znan ter tudi še ni dosegel dokončne razvojne stopnje (kolikor v tehniki kakšen razvoj sploh doseže dokončno razvojno stopnjo), zato bi se v nadaljevanju predvsem omejili na varjenje v zaščitni atmosferi CO₂.

1.2. Produktivnost varilnih postopkov

Predvsem bi bilo treba vnaprej posebej zapisati zelo zanimivo ugotovitev. Čeprav stalno narašča število varilnih avtomatov in je delež avtomatičnih postopkov pri celotni proizvodnji varjenih konstrukcij čedalje večji, pa vendarle v absolutnem iznosu tudi neprestano napreduje klasično ročno obločno varjenje. Da je res tako, se da sklepati iz stalno naraščajoče proizvodnje oplaščenih elektrod, tako pri nas kakor tudi po ostalem svetu.

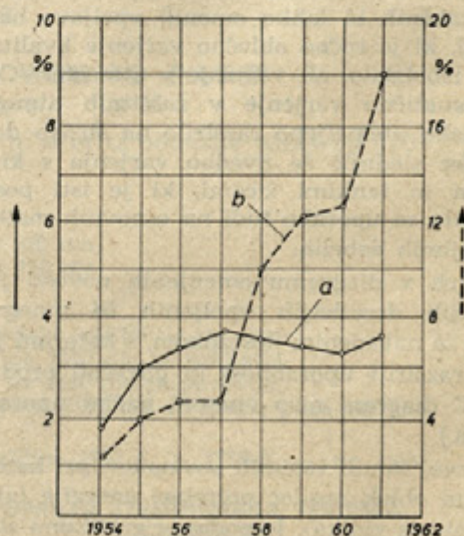
Izmed vseh evropskih držav je Nemška demokratična republika verjetno država, v kateri je za zdaj najbolj poudarjena avtomatizacija varjenja. Zato naj bi naslednji diagrami, posneti iz literature [3], nekoliko zgovorneje pokazali razvoj in dosedanje stanje v tej državi. Zelo podobne so razmere v ostalih industrijsko razvitih državah Evrope, Amerike in Daljnega vzhoda.

¹ MAG je mednarodna kratica za polavtomatično in avtomatično varjenje v zaščitni atmosferi aktivnih plinov (Metal active gas) v nasprotju z MIG, ki označuje isto v zaščitni inertnih plinov.

Iz diagrama sl. 3 je razvidno, da je bil odstotek varilcev v NDR, ki so delali l. 1954 na avtomatih, v primerjavi z ročnimi varilci sorazmerno majhen, a se je do l. 1961 povzpел za skoraj desetkrat.

Iz istega vira so tudi podatki v tabeli 1 za leto 1962. Tabela kaže, da velik odstotek varilcev še vedno vari ročno, vendar je delež pretaljenega dodatnega materiala pri strojnem varjenju vseeno že presegel količino pretaljenih oplaščenih elektrod in varilne žice za plamensko varjenje.

Razlago za to je treba iskati v veliki produktivnosti avtomatičnih postopkov v primerjavi z ročnim varjenjem. Storilnost se stopnjuje že s tem, da pri prvih ni več izgube neproduktivnega časa, ki je potreben za menjavo elektrod in čiščenje zvarov. Nadalje je možna pri avtomatičnih varjenjih mnogo večja obremenitev elektrod oz. varilne žice z varil-



Sl. 3. Razmerje med ročnimi varilci in varilci na avtomatih v NDR

Tabela 1

	Delež pretaljenega materiala %	Delež varilcev %
Ročno varjenje:	40	77
plamensko	3,5	34
obločno	36,5	43
Avtomatično varjenje:	60	23
MAG	18,6	9
EPP ²	41,4	14

nim tokom (do 4-kratna). V tabeli 2 so za primerjavo zbrani razni podatki za ročno obločno varjenje in avtomatične postopke (EPP in MAG) [4].

Tabela 2

Način varjenja	Premer elek- trič- ne žice mm	Ja- kost toka	Storilnost kg/uro v labo- rator- iju	v de- lavnici
Ročno varjenje:				
standardne rutilne elektrode	7,0	180	1,69	0,90
hitrejše rutilne elektrode	4,0	200	2,32	1,39
zelo produktivne rutilne elektrode	5,0	400	8,15	2,72
Polavtomatična varjenja:				
MIG-varjenje gola žica	2,4	450	6,80	2,72
MAG-varjenje + magnet- ni prašek	2,4	125	5,89	2,37
MAG-varjenje, žica (Arcos)	2,4	425	5,25...9,10	2,49...3,62
MAG-varjenje, gola žica	1,2	280	4,0	3,0
Avtomatično varjenje:				
MIG-varjenje, gola žica	2,4	450	6,8	3,4
EPP-varjenje z dvema žicama	2×4,8	2×900	22,20	11,32
oplašena varilna žica (Fusarc)	8,2	1000	10,46	5,21
oplašena varilna žica v CO ₂	7,0	1200	15,86	8,32

Iz tabele je razvidna mnogo večja storilnost avtomatičnih postopkov, in sicer celo ob uporabi mnogo tanjših varilnih žic. Najbolj produktiven način varjenja tj. varjenje pod žilindro pa v tabeli niti ni obsežen.

1.3. Ekonomski vidiki

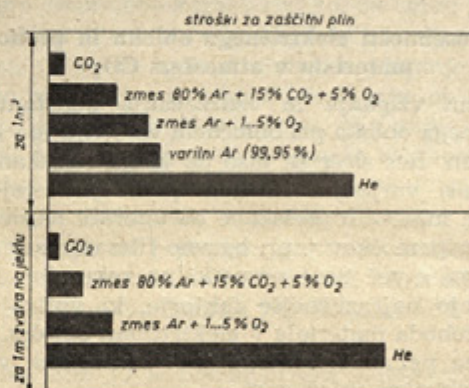
Do uporabe CO₂ kot zaščitnega plina pri avtomatičnem varjenju konstrukcijskih jekel je prišlo predvsem iz ekonomskih razlogov. Uporaba argona ali drugih inertnih plinov oziroma vpeljava avtomatičnega varjenja po postopku MIG je bila zaradi velike produktivnosti že od vsega začetka zanimiva tudi za varjenje nelegiranih ali malo legiranih konstrukcijskih jekel. Največja ovira je bila pač ob-

² EPP je domača kratica za električno obločno varjenje pod praškom.

čutno previsoka cena zaščitnega plina (argona ali helija). Poraba znaša pri varjenju jekla najmanj 8 l/min, kar bi narastlo v večjih tovarnah do zelo velikih količin. Zato je praksa težila za drugimi možnimi plinskimi zaščitami. Od vseh cenениh plinov je najprej pritegnil pozornost CO₂. Njegova cena je v primerjavi s ceno argona ali helija minimalna.

V grafikonu na sl. 4 je vidna primerjava med cenami raznih plinov po zahodnonemških virih [5]. Podobni odnosi veljajo tudi za naše domače razmere. Iz grafikona se vidi, da znaša cena za CO₂ približno 10 % cene argona, računana absolutno na 1 m³ plina ali relativno na 1 m zvara na varjenih jeklenih konstrukcijah.

Cena plinskih mešanic je nekoliko nižja od argona in tako je uporaba takih zaščitnih atmosfer v posameznih primerih tehnično in ekonomsko upravičena. Na ekonomičnost vplivajo povrh stroškov za material tudi stroški za izdelavne ure, le-ti pa so iz različnih vzrokov (o katerih bi še govorili pozneje) tudi nižji pri uporabi CO₂ oziroma plinskih mešanic.

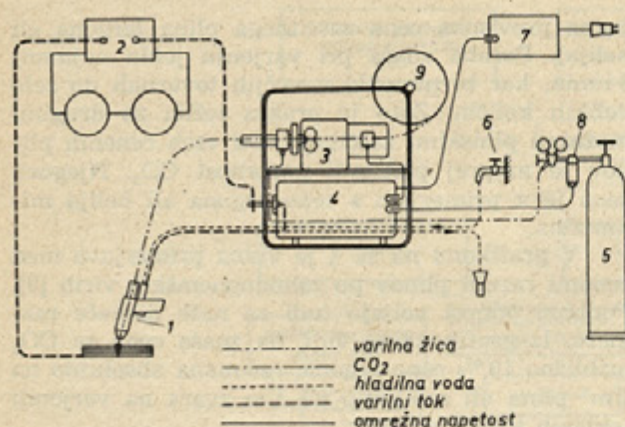


Sl. 4. Cene plinov za zaščitne atmosfere

2. OPIS POSTOPKA MAG

Na sliki 5 so shematično prikazani vsi sestavni deli naprave za polavtomatično varjenje po postopku MAG, ki v glavnem popolnoma ustrezajo tudi za varjenje po postopku MIG. Tudi pri avtomatizaciji postopka ostanejo sestavni deli isti, le dodatno je potreben še voziček, ki omogoča translatorsko gibanje varilne pištole, ali naprava za rotacijsko gibanje varjenca (tj. predmeta, ki ga je treba variti). Za popolno avtomatizacijo je treba dodati še naprave za avtomatično odpiranje in zapiranje zaščitnega plina ter hladilne vode, vključevanje in izključevanje varilnega toka in drugo. Razumljivo je, da je takšna popolna avtomatizacija draga in opravičljiva samo v velikoserijski proizvodnji. Povsod drugod pa je umestnejše stopnjo avtomatiziranja prilagoditi dejanskim potrebam v vsakem posameznem primeru.

Na sliki 6 je sorazmerno preprosta naprava za varjenje v zaščiti CO₂.



Sl. 5. Shema naprave za varjenje v zaščitni atmosferi CO_2 (MAG)

1 — pištola za varjenje, 2 — izvor varilnega toka, 3 — naprava za dovajanje varilne žice, 4 — krmilna omara, 5 — jeklenka za CO_2 s priborom, 6 — priključek hladilne vode, 7 — zaščitni transformator, 8 — ogrevalnik za CO_2 , 9 — kolut za varilno žico

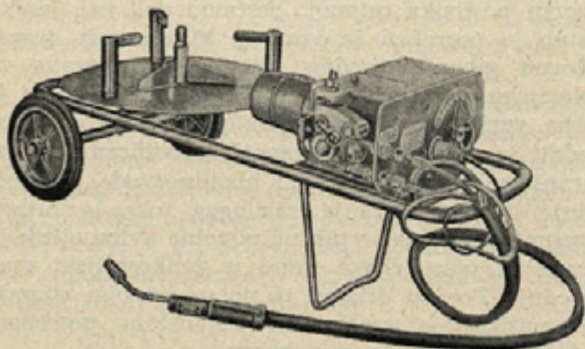
3. POSEBNOSTI POSTOPKA MAG

3.1. Posebnosti električnega obloka in prehoda materiala v atmosferi CO_2

Način vžiganja in vzdrževanja konstantnega električnega obloka pri obločnem varjenju je v glavnem znan. Res sicer še niso do kraja raziskani vsi pojavi pri varjenju. Na tem področju tečejo po različnih inštitutih preiskave ob uporabi najmodernejših pripomočkov (npr. barvno filmanje s hitrimi kamerami z več tisoč posnetki na sekundo). Dalje proučujejo najrazličnejše faktorje, ki vplivajo na način prehoda materiala v električnem obloku. Med temi ima pomembno vlogo tudi atmosfera, v kakršni električni oblok gori.

Nasplošno pa lahko razlikujemo dva osnovna načina prehoda materiala v obloku, in sicer preko kratkih stikov (debele kaplje) — ali s pršenjem (drobne kapljice v obliki dežja).

Pri ročnem obločnem varjenju z oplaščenimi elektrodami prehaja material po navadi na oba načina mešano, od vrste oplaščenja pa je odvisno, kateri izmed obeh prevladuje. Na splošno velja, da je ugodnejši prehod v čim drobnejših kapljicah in



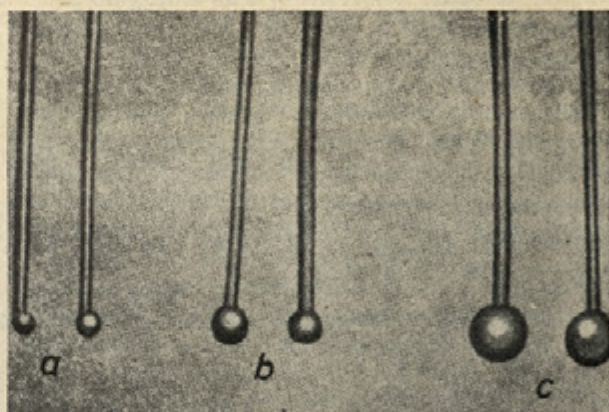
Sl. 6. Naprava za polavtomatično varjenje po postopku MAG

zato je treba izbirati takšne varilne parametre, ki pospešujejo preči prehod materiala.

Pri varjenju v zaščitni atmosferi CO_2 je možno vplivati na način prehoda materiala samo z varilnimi parametri. Pomembna je jakost oz. gostota varilnega toka. Z naraščajočo gostoto se volumen kapljic zmanjšuje. Pri določeni kritični gostoti se prehod z grobimi kapljicami spreminja v pršičega. Pri enakem premeru in enaki kvaliteti varilne žice je vrednost za kritično gostoto toka odvisna od vrste zaščitne atmosfere.

Na prehod vpliva tudi priključek na pozitivni ali negativni pol. Na splošno je prehod boljši ob priključku na + pol. Pri varjenju v zaščitni atmosferi CO_2 je možno doseči prehod materiala v drobnih kapljicah, če prekoračuje gostota varilnega toka 150 do 200 A/mm², ali pa, če dodamo v zaščitno atmosfero dodatne pline npr. O_2 ali Ar.

Na velikost kapljic ima pri varjenju v CO_2 in majhnih jakostih varilnega toka vpliv tudi obločna napetost. Z naraščajočo napetostjo narašča velikost



Sl. 7. Odvisnost velikosti kapljice od napetosti obloka
a — 17 V, b — 20 V, c — 24 V.

kapljic. Na sliki 7 je prikazana velikost kapljic na žici iz nerjavnega jekla (po literaturi [6]: $\varnothing$ žice 0,5 mm, varilni tok 70 A, napetosti obloka 17 V, 20 V in 24 V).

Pri avtomatičnem varjenju izrabljamo prednost prehoda materiala v drobnih kapljicah. Karakteristično za takšno varjenje je veliko število kratkih stikov, toda stabilni potek procesa ni karakteriziran z vedno enako dolžino obloka in s tem s konstantnimi varilnimi parametri, ampak s čim enakomernejšim, periodičnim spreminjanjem vseh vrednosti.

Na sliki 8 so narisani idealizirani oscilogrami varilnega toka in obločne napetosti v periodi enega kratkega stika ter dodane skice filmskih posnetkov v posameznih trenutkih. Po sliki je možno razlagati dogajanje v obloku.

Po vžigu obloka nastala toplota raztali varilno žico in se naredi kapljica. Zaradi čedalje večje toplotne kapacitete kapljice postaja taljenje počasnejše. Hitrost pomikanja žice je konstantna, dol-

žina obloka se krajša, tako da pride do kratkega stika. Tok naraste, obločna napetost se zniža, oblok ugasne in kaplja preide v osnovni material. Pri tem se zaradi raznih efektov eksplozijsko odtrga od varilne žice, hkrati pa napetost skokoma naraste do varilne napetosti in vžge oblok. Ciklus se nato ponavlja z določeno frekvenco.

Največjega pomena za tehnologijo varjenja je čas t_1 , tj. čas, ko je kapljica v coni obloka. V tem času lahko tečejo vse metalurške reakcije med kovino in okolico ali med sestavnimi elementi v dodajnem materialu. To je čas, v katerem pride do odgorevanja (oksidacije) elementov v jeklu. Čas t_1 je eden izmed poglavitnih faktorjev, ki vplivajo na kemično analizo vara. Vrednosti t_2 , t_3 in I_{max} pa predvsem vrednotijo sposobnost izvora varilnega toka za vzdrževanje stabilnosti električnega obloka.

Povečanje obločne napetosti pri varjenju v zaščitni atmosferi CO_2 podaljšuje čas t_1 z vsemi škodljivimi posledicami. Potemtakem je freba vselej izbirati varilne parametre s čimmanjšo obločno napetostjo.

V tabelah 3 in 4 so podane nekatere karakteristike prehoda materiala v odvisnosti od varilnih parametrov. Pogoji pri posnemanju podatkov so bili: varjenje v CO_2 , + pol, jeklena varilna žica $\varnothing 0,8$ mm, dolžina prostega konca varilne žice 10 mm, pretok zaščitnega plina 7 l/min.

Tabela 3

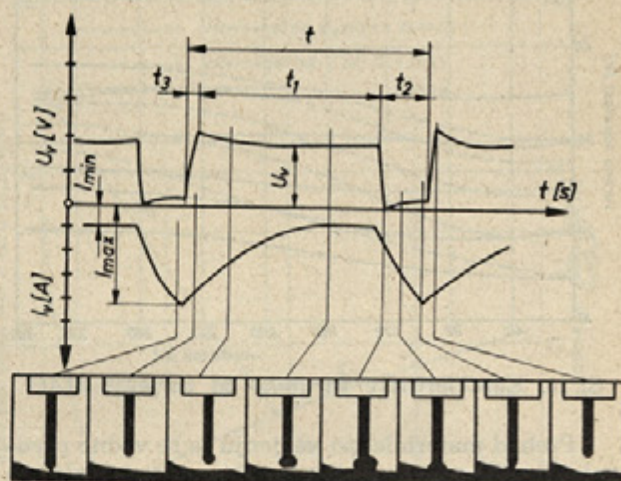
Varilni parametri	Varilna napetost [V]		
	17	20	24
Število kratkih stikov	150	100	28
Čas enega cikla [s]	0,0067	0,01	0,0357
Jakost toka (srednja) A	100	95	90
Premjer kapljic [mm]	0,8	0,9	1,34

Tabela 4

Varilni parametri	Hitrost žice [m/min]			
	1,67	4,2	5,58	7,62
Število kratkih stikov	70	100	105	110
Čas enega cikla [s]	0,0143	0,0100	0,0095	0,0091
Jakost toka (srednja) [A]	60	95	120	140
Varilna napetost [V]	20	20	20	20

Naraščajoča hitrost dodajanja varilne žice povečuje število kratkih stikov — vpliva torej ugodno na varjenje v CO_2 . Sprememba polaritete ne vpliva bistveno na potek varjenja, vendar se hitrost odtaljevanja povečuje pri varjenju na negativnem polu. Razmere ponazarja diagram na sliki 9.

Iz povedanega je razvidno, da mora varilnik, ki ga uporabljamo za varjenje po postopku MAG, imeti primerne karakteristike. V varilnem ciklu si sledijo v časovnem razdobju 10^{-2} do 10^{-3} sekunde prosti tek, kratki stik z maksimalno obremenitvijo in normalna obremenitev. Uravnavanje teh količin

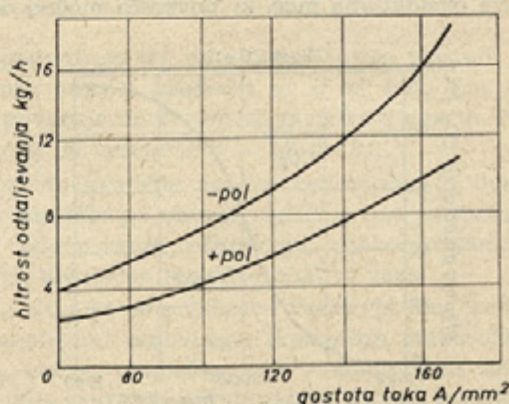


Sl. 8. Spreminjanje varilne napetosti in toka v periodi enega kratkega stika

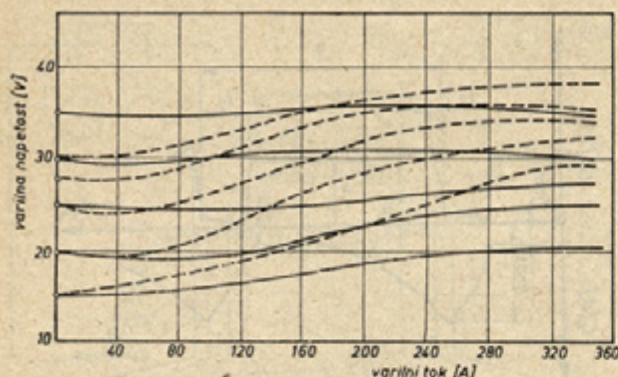
z zunanjo regulacijo ne bi bilo možno zaradi izredno kratkih časov. Varilnik mora torej imeti ugodno dinamično karakteristiko, da lahko po kratkem stiku hitro naraste napetost do vžigalne napetosti in se omogoči čimhitrejše vžiganje obloka; enako mora hitro naraščati jakost toka ob kratkem stiku. Hitrost naraščanja toka je v redu velikosti 70 000 do 150 000 A/s, da se doseže kratkostični tok 350 do 550 A (pri varjenju v CO_2 na tanki pločevini).

Kratkostični tok mora biti zadosti jak, ker prihaja sicer do prilepljanja varilne žice ob dotiku z osnovnim materialom. Takšnim zahtevam ustrezajo specialni varilniki s horizontalnimi karakteristikami.

Na sliki 10 je podan primer karakteristike pri izvoru varilnega toka (rotacijskem pretvorniku) za avtomatična varjenja v zaščitnih atmosferah (predvsem CO_2) ruskega izvora [7]. Pri tem varilniku je možno s preklapljanjem vzbujevalnih navitij spreminjati skoraj horizontalno karakteristiko (polne črte) v močnejše se dvigajočo (črtkano).



Sl. 9. Hitrost odtaljevanja v odvisnosti od priključitve na + ali - pol



Sl. 10. Karakteristike varilnika za varjenje MAG

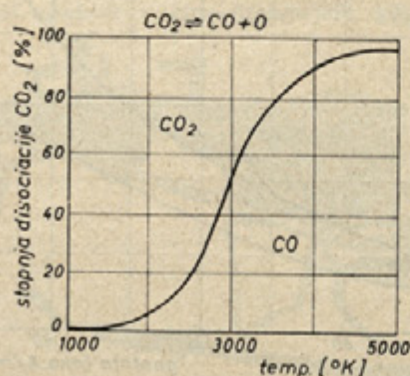
Prehod materiala pri varjenju je še vedno predmet mnogih raziskav. Ugotovili so, da je taljenje pri varjenju vedno združeno z močnejšo tvorbo plinov, ki se nabirajo v sredini kapljice in nato povzročajo pogostne eksplozije v majhnem merilu. Tudi za varjenje v CO_2 bi veljalo (iz teorije po Lapidusu), da so kapljice pred ločitvijo od varilne žice votle, napolnjene s plinom in se ob prehodu skozi oblok ali že prej pogostoma razpočijo, od koder izvira močno brizganje. Prehod materiala pri vodoravnem varjenju je lahko razumljiv. Varjenje vertikalno ali nad glavo v zaščitni atmosferi CO_2 pa je možno predvsem po prenašanju materiala s kratkimi stiki.

3.2. Metalurški pojavi pri varjenju v CO_2

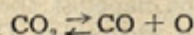
3.2.1. Medsebojno učinkovanje CO_2 in raztaljene kovine

Pri varjenju brez zaščitne atmosfere prihaja do občutne oksidacije elementov v dodatnem materialu. Pri neželeznih kovinah in zlitinah ter pri močno legiranih jeklih se uporabljajo kot zaščitna atmosfera inertni plini. Že l. 1950 je prvi avtor [8] predlagal varjenje ogljikovih jekel v atmosferi CO_2 , vendar ni bilo uspeha — zvari so bili porozni. Šele po obsežnih preiskavah medsebojnega učinkovanja CO_2 in raztaljene kovine so prišli do prvih ugodnih rezultatov.

Posebnost plina CO_2 kot zaščitnega sredstva je njegova oksidativna moč, ki povzroča močno odgo-

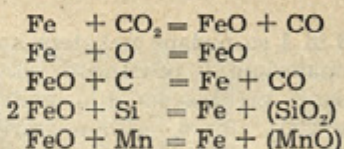
Sl. 11. Stopnja disociacije CO_2 v odvisnosti od temperature

revanje legirnih elementov. Oksidativnost CO_2 izvira od atomarnega kisika, ki nastaja pri disociaciji CO_2 pri visoki temperaturi električnega obloka. Disociacija poteka po enačbi:



Stopnja disociacije je odvisna od temperature in prikazana z diagramom na sliki 11.

Ceprav je za reakcije na razpolago le minimalen čas, potekajo zaradi visokih temperatur in velike stične površine med kovino in plinom zelo intenzivno. Oksidacija elementov je med drugim odvisna tudi od koncentracije v dodatnem materialu in afinitete do kisika, ki pa je naposled zopet odvisna od temperature. Največjo afiniteto do kisika pri temperaturi tališča jekla ima Si, nato pa se vrstijo V, Cr, C, Mn idr. Pri višjih temperaturah pa so Al, Ti, C in Mn boljši dezoksidanti. V talilni kopeli pri varjenju in še bolj med prehodom dodatnega materiala v obloku (oziroma pri taljenju na elektrodi) potekajo te reakcije:



Vse te reakcije in še druge lahko zasledujemo pri vseh varilnih procesih na jeklu, in to tudi pri obločnem varjenju z oplaščenimi elektrodami in celo pri plamenskem. Zaradi odgorevanja je v zvaru vedno manj dezoksidantov, kakor bi ustrezalo srednji kemični analizi med osnovnim in dodatnim materialom. Največji vpliv ima pri tem dodatni material, v katerem morajo biti elementi v večjem odstotku, kakor je predvideno za zvar.

Če bi hoteli vnaprej določiti kemično analizo dodatnega materiala glede na predvideno sestavo vara, je neogibno potrebno poznati prehodne koeficiente za posamezne elemente tj. vrednosti za odgore in njihovo odvisnost od varilnih parametrov. Upoštevati je treba nadalje, da so temperature v posameznih conah obloka zelo različne, vendar tako visoke, da je disociacija CO_2 občutna. CO_2 disociira v obloku od 15 do 60 %, kar dodatno z visokimi temperaturami povzroča največji odgor v dodatnem materialu.

Za določitev kemične analize dodatnega materiala po znani analizi osnovnega materiala in predpostavljeni analizi čistega zvara bi veljala enačba:

$$C_v = \mu_d \cdot m \cdot C_d + \mu_o \cdot n \cdot C_o$$

Pri tem pomenijo:

C_v = koncentracijo določenega elementa v varu,
 μ_o, μ_d = prehodna koeficienta elementov iz osnovnega oz. dodatnega materiala,
 m, n = deleža dodatnega in osnovnega materiala v varu (odvisno od geometrije zvara),
 C_d, C_o = koncentraciji elementov v dodatnem in osnovnem materialu.

3.2.2. Vpliv varilnih parametrov na kemično sestavo

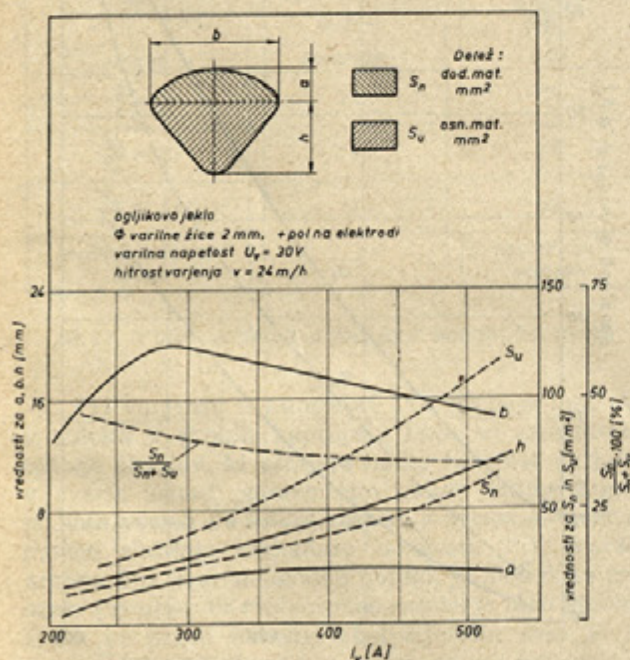
Predhodno bi bilo treba torej določiti prehodne koeficiente za posamezne elemente v določenih pogojih in deleže osnovnega in dodajnega materiala v varu. Prehodni koeficienti pa se zelo spreminjajo z varilnimi pogoji ter sestavi osnovnega in dodajnega materiala, tako da veljajo eksperimentalno ugotovljene vrednosti le kot smernice za približno izračunavanje sestave dodajnega materiala.

Pri konstrukcijskem jeklu je prehodni koeficient za mangan iz dodajnega materiala v mejah med 0,6 do 0,7, za silicij 0,6 do 0,73, za ogljik med 0,52 do 0,92. Vsi dodatni legirni elementi pa vplivajo v širokem obsegu na našete vrednosti.

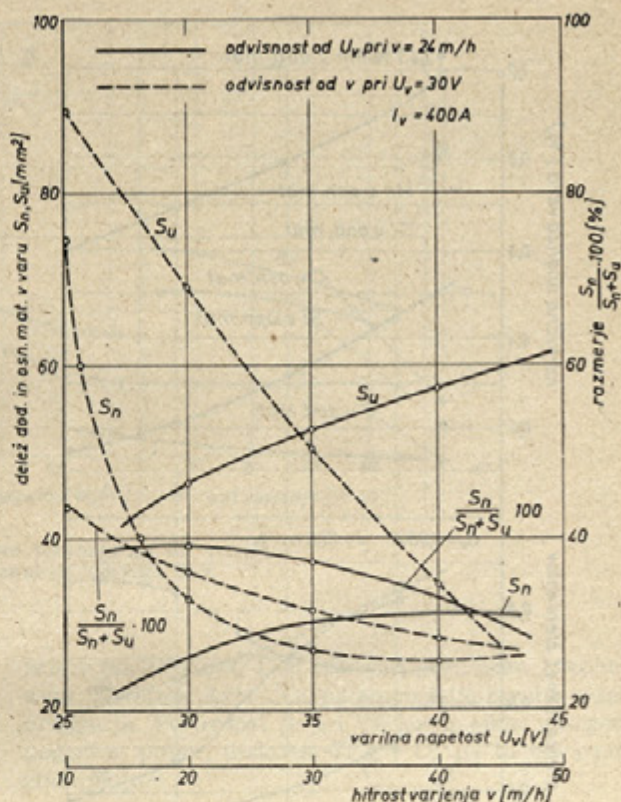
Povišana napetost obloka povečuje odgor vseh leg. nih elementov. Sprememba hitrosti varjenja nima izrazitega vpliva na prehodne koeficiente, mnogo večji pa je vpliv premera varilne žice in debeline osnovnega materiala. Pri uporabi tanjših žic in varjenju drobnejšega materiala so odgori elementov večji. Zanimivo je, da prekomerno povečana količina zaščitnega CO_2 povečuje odgor Si in Mn, medtem ko ostane pri ogljiku nespremenjen.

3.2.3. Oblika zvara in vpliv na kemično analizo

Na delež osnovnega in dodajnega materiala v varu vplivajo varilni parametri (varilni tok ali gostota toka, varilna napetost in hitrost varjenja) med drugim tudi zato, ker je od njih odvisna geometrična oblika zvara in s tem mešanje osnovnega



Sl. 12. Karakteristike vara v odvisnosti od jakosti varilnega toka



Sl. 13. Karakteristike vara v odvisnosti od napetosti in hitrosti varjenja

in dodajnega materiala. Na sliki 12 je podana oblika zvara s pglavitnimi karakteristikami kakor tudi njihova odvisnost od jakosti varilnega toka, a na sliki 13 so razvidne iste vrednosti v odvisnosti od hitrosti varjenja in varilne napetosti.

Obliko zvara bi lahko karakterizirali z zunanjo in notranjo obliko, tj. razmerjema:

$$K = \frac{b}{a}$$

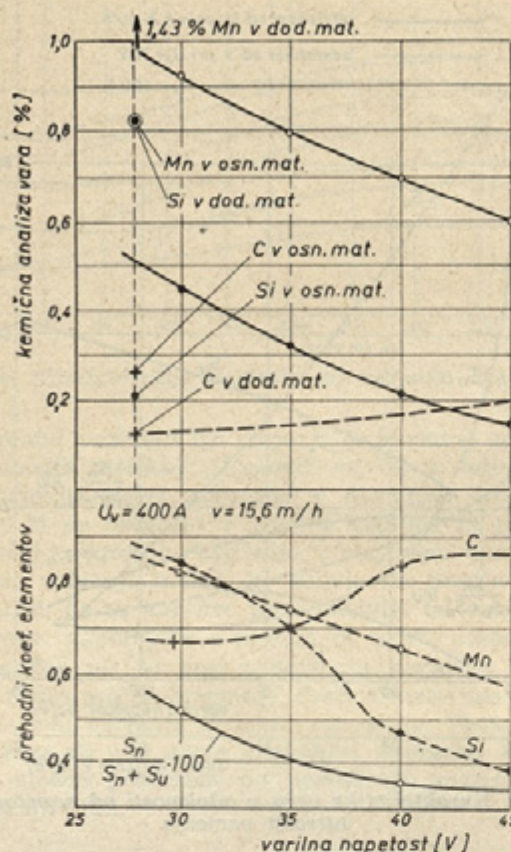
$$\psi = \frac{b}{h}$$

Ugotovili so [6], da z naraščanjem varilnih parametrov pojema vrednost za ψ od 4 do 1, s tem pa se povečuje nevarnost za razpoke v zvarih. Najugodnejše je razmerje $\psi = 1,3$ do 2,0.

Ker so kemične analize osnovnega in dodajnega materiala po navadi različne, ima razmešanje povrh odgorevanja elementov enako pomemben vpliv na dokončno kemično analizo vara.

Na sliki 14 so prikazana razmerja med kemičnimi analizami osnovnega, dodajnega materiala in čistega navara z upoštevanim razredčenjem zaradi geometrije zvara ob spreminjanju varilne napetosti.

Podobne so razmere ob spreminjanju hitrosti varjenja.



Sl. 14. Kemične analize osnovnega materiala, varilne žice in vara

3.3. Vpliv varilnih parametrov na storilnost

Storilnost je numerično zajeta s talilno konstanto, ki podaja pretaljeno količino dodajnega materiala, preračunano na enoto toka in časa [mg/A s] ali [g/A h].

Povrh talilne konstante je pogosto podana tudi konstanta navarjanja, ki upošteva količino navarjenega materiala, preračunanega na enake enote.

Po pričakovanju je manjša od talilne konstante, ker so vmes še izgube: brizganje, izparevanje, izgorevanje. Na sliki 15 so dane vrednosti obeh konstant za varjenje v CO₂ in varjenje pod praškom v odvisnosti od jakosti varilnega toka.

Iz diagrama je razvidno, da je talilna konstanta pri varjenju po postopku MAG (krivulja 1) precej višja kakor pri varjenju pod praškom (krivulja 3). Razliko sestavlja toplota, porabljena za taljenje praška pri varjenju pod praškom, zmanjšana za izgube zaradi sevanja obloka (pri varjenju MAG).

Krivulja 2 je konstanta navarjanja pri varjenju MAG, razlika med 1 in 2 so pa izgube.

Določene odvisnosti so dalje med talilno konstanto in varilnimi parametri ter debelino varilne žice.

Iz diagramov na sliki 16 je vidno, da se z naraščajočim premerom varilne žice zmanjšuje konstanta navarjanja, z jakostjo toka pa se povečuje (čeprav je preračunana na 1 A).

Naraščanje varilne napetosti in hitrosti varjenja obe konstanti zmanjšuje. Vse omenjene odvisnosti je možno koristno izrabljati pri zasnovanju raznih varilnih avtomatov za izbor najugodnejših varilnih parametrov.

4. NADALJNI RAZVOJ VARJENJA V ATMOSFERI CO₂

Varjenje v zaščitni atmosferi čistega CO₂ izkazuje nekatere pomanjkljivosti, ki so jih skušali odpraviti s primeševanjem raznih plinov npr. O₂, kisika in argona ali s kombiniranjem plinske zaščite z raznimi talili.

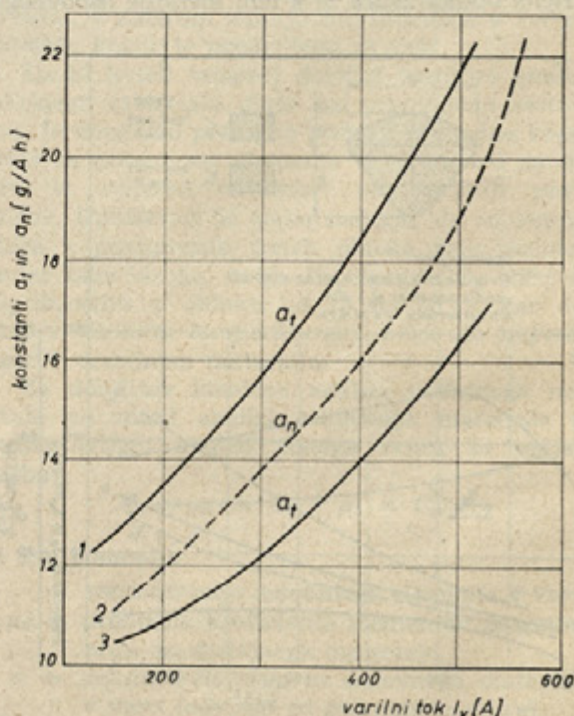
4.1. Varjenje s plinskimi mešanici

Vzporedno z varjenjem s čistim CO₂ kot zaščitnim plinom so se v tej zvezi razvijali podobni postopki, pri katerih so uporabljali kot zaščitni plin razne plinske mešanice, sestavljene iz CO₂, argona in kisika. Najbolj znane kombinacije so:

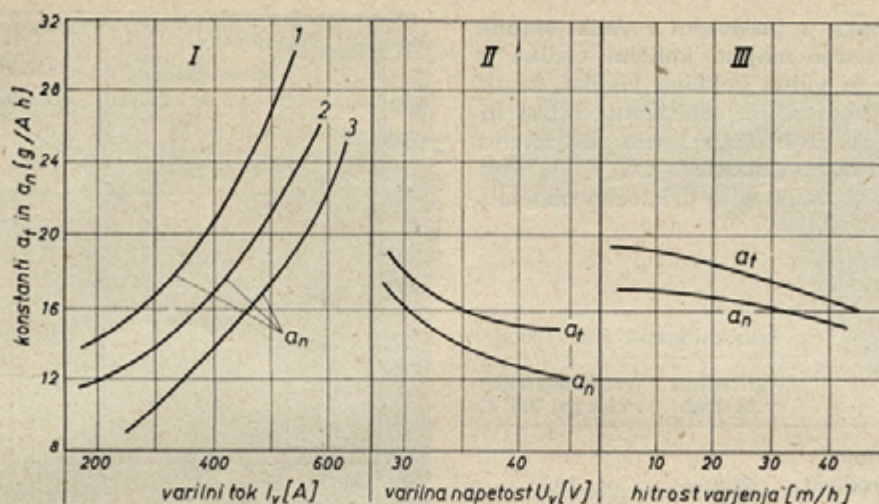
Ar + CO₂ + O₂ (= 80 + 15 + 5 %) (Ital —

Francija, koksogen — Zah. Nemčija),

CO₂ + O₂ (Japonska).



Sl. 15. Konstanta navarjanja in talilna konstanta v odvisnosti od varilnega toka



Sl. 16. Odvisnost konstante navarjanja od varilnih parametrov in dimenzije varilne žice

Vsaka tako sestavljena zaščitna atmosfera ima določene vplive na varilne parametre in potek varjenja.

Zbrali so v glavnem takšno sestavo zmesi, da so se kvaliteta zvarov in tudi pogoji varjenja izboljšali. Vpliv zaščitne plinske zmesi je le deloma podoben sumarnemu vplivu posameznih komponent. Pogostoma so opazni občutni odstopki.

brimi posledicami. CO_2 razširja predvsem korenski uvar. Dodatek Ar v CO_2 pa zmanjšuje izgube zaradi brizganja. Poroznost je pri varjenju jekla v argonu pogosten pojav, dodatek $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ pa to nevarnost zmanjšuje.

V koksogenu so združene dobre lastnosti obeh sestavnih delov CO_2 in Ar.

4.2. Varjenje z mešanico $\text{CO}_2 + \text{O}_2$

Na Japonskem so temeljito raziskali varjenje v tej vrsti plinske zaščite [10].

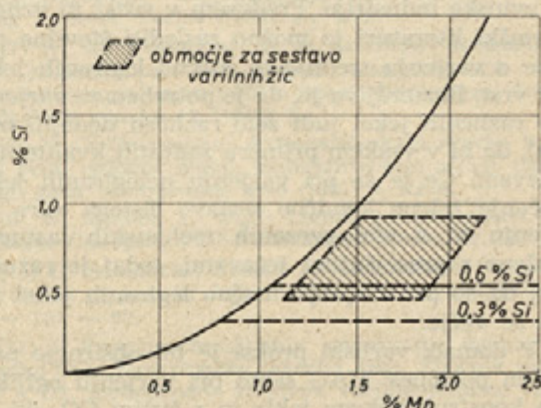
V zmesi je površ CO_2 tudi 25 % O_2 . Varilne žice morajo imeti takšno sestavo, da se produkti oksidacije dobro izločajo iz taline jekla. Najvažnejša elementa sta pri tem Si in Mn. Spodnja meja za Si je 0,3 % za varjenje pomirjenih ali polpomirjenih jekel ter nad 0,5 % za varjenje nepomirjenih jekel.

Razmerje med Mn in Si je podano v diagramu sl. 18, a biti mora nad 2,0.

argon	koksogen	CO_2
$\frac{b}{h} \approx 3,2$	3,0	1,7
$\frac{S_n}{S_u} \approx 1,0$	0,94	0,94
$\frac{S_n}{S_u} \approx 0,98$	1,1	1,3
nevarnost slabega uvara	—	nevarno za razpoke

Sl. 17. Vpliv zaščitne atmosfere na obliko uvara

Pri varjenju v atmosferi CO_2 prehaja material v obloku v grobih kapljicah. Dela se sorazmerno mnogo oksidov, ki ostajajo lahko tudi kot vključki v zvaru. Zaradi sorazmerno obilne talilne kopeli prihaja včasih do mikro razpok v zvaru, s čimer se močno slabšajo mehanske lastnosti. Pri uporabi argona ima zvar neugodno obliko, je globok in zelo ozek. Pri uporabi mešanice se razmerje med globino zvara in širino temena izboljšuje. Na sliki 17 so prikazane približne oblike varov za vse tri primere [9]. Dobro je viden vpliv dodatkov kisika in argona v CO_2 na širino temena vara in globino zvara z do-



Sl. 18. Razmerje med Si in Mn v varilni žici za $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ varjenje

Prednost postopka je predvsem v veliki stabilnosti obloka in izredno majhni količini vodika v zvarih. V tabeli 5 je vidna količina vodika, ki se izloča po 24 urah v glicerinu (difuzivni vodik) in še preostali vodik, ki se izloča z vročo ekstrakcijo [6]. Varjenje v zaščitni atmosferi $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ima mnogo posebnosti, ki bi jih bilo primerno obdelati posebej.

Tabela 5

Varilni postopek	Izločeni vodik [cm ³ /100 g]	
	v glicerinu v 24 urah	vroča ekstrakcija pri 800° C
ročno obločno varjenje:		
z rutilnimi elektrodami	21,9	10,0
z bazičnimi elektrodami	3,15	1,1
obločno varjenje pod praškom	2,71	—
varjenje po postopku MIG	0,67	1,9
varjenje po postopku MAG:		
v zaščitni atmosferi CO_2	0,03	0,5
v zaščitni atmosferi $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ (sušen)	0	0

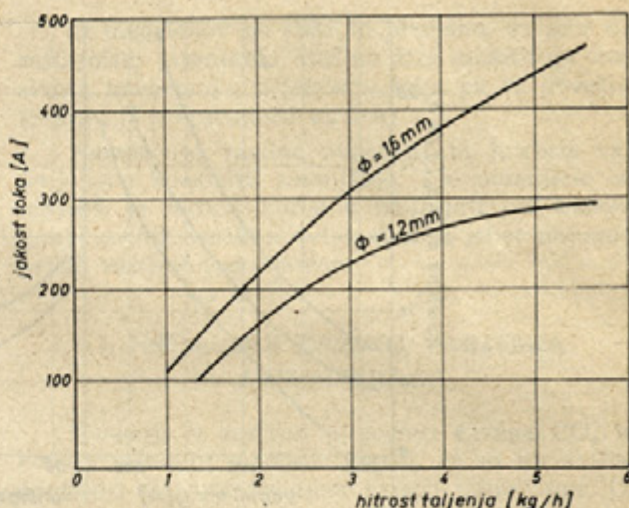
Tabela 6

Vrednosti	Žica	
	VAC 60	TRIGLAV
trdnost kp/mm ²	55,0	49,0
meja plastičnosti kp/mm ²	42,0	34,8
raztezek %	28	20,0
kontrakcija %	64	—
žilavost kpm/cm ²	10...11	13...15
talilna konstanta g/A h	14,5...22,7	12,9...17,7
produkcija kg/h	2,1...5,4	1,8...5,8

5. UPORABNOST VARJENJA MAG — DOMAČI DOSEŽKI

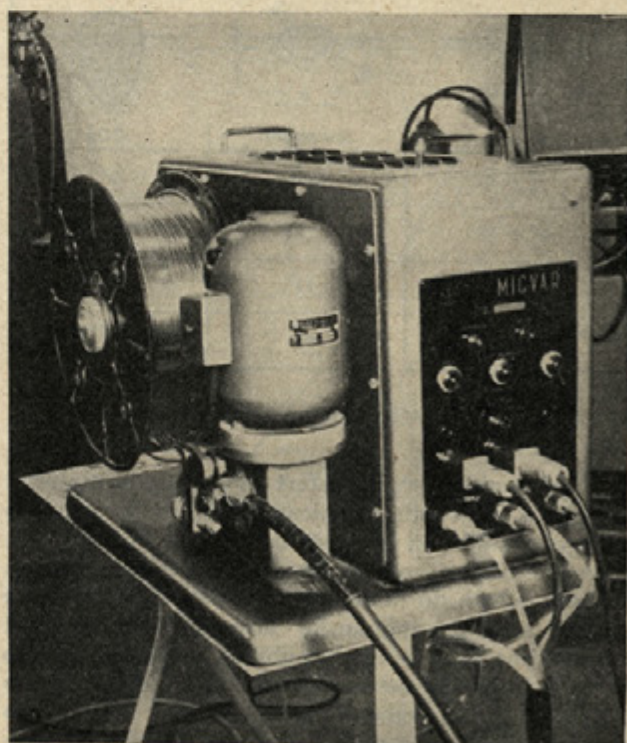
Varjenje po postopku MAG se uporablja predvsem za varjenje ogljikovih in malo legiranih konstrukcijskih jekel v najrazličnejših panogah strojne in kovinske industrije. Predvsem v ruski in vzhodnonemški literaturi je možno zaslediti številne podatke o varjenju srednje in močno legiranih jekel vseh vrst. Razumljivo je, da je potreben za varjenje tako različnih jekel tudi zelo različen dodajni material, da bi v vsakem primeru zadostili kvalitnim zahtevam. Če je že pri varjenju nelegiranih jekel določanje želene kemične sestave čistega vara po varjenju in s tem zvezanih mehanskih lastnosti združeno s precejšnjimi težavami, tedaj je razumljivo, da so pri varjenju močno legiranih jekel težave še večje.

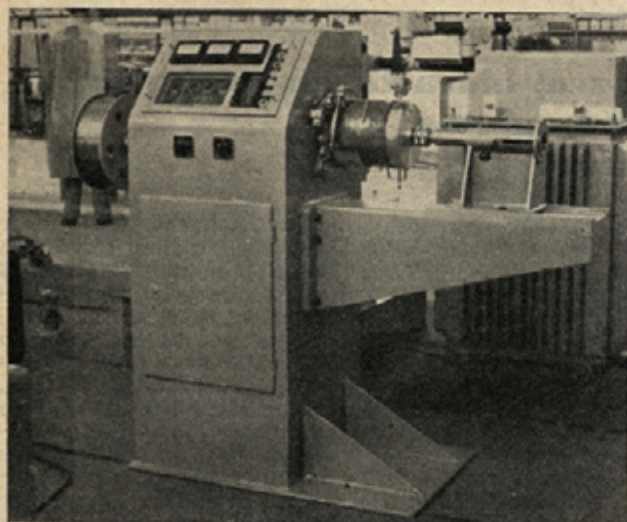
V domači varilski praksi je bil obširneje preizkušen postopek MAG samo pri varjenju ogljikovega konstrukcijskega jekla in s čistim CO_2 , ki ga ravno ta čas skušajo posamezna podjetja uvesti v svoje delavnice. Od dodatnih materialov je bil



Sl. 19. Hitrost oddaljevanja varilne žice v odvisnosti od jakosti varilnega toka

preizkušen zaščitni plin in osvojena izdelava ene kvalitete varilne žice. Doseženi rezultati pri preizkusnih varjenjih so bili ugodni. Izkušnje in podatki iz produkcije pa za zdaj še ni. Z domačim dodatnim materialom so bile dosežene v tabeli 6 in diagramu sl. 19 zbrane mehanske vrednosti oziroma storilnost [11]. Podane so vrednosti za dve varilni žici, od katerih je samo VAC 60 namenjena za varjenje MAG, medtem ko je žica »Triglav« za oplasčene elektrode. Plin CO_2 ni bil izdelan specialno za

Sl. 20. Avtomat Migvar, Iskra, Ljubljana, uporaben tudi za varjenje v CO_2



Sl. 21. Automat TAS za varjenje po postopku MIG ali TIG

varilne namene, ampak vzeti iz redne industrijske proizvodnje. Po kvaliteti je ustrezal tudi inozemskim normam.

Razen dodatnega materiala in zaščitnega plina je na voljo tudi že prva domača oprema. Tovarna »Iskra« v Ljubljani je izdelala prve serije naprav za polavtomatično varjenje v zaščitni atmosferi argona, ki pa tudi precej ustrezajo pogojem za varjenje v atmosferi CO_2 .

Na slikah 20 do 22 so prikazane polavtomatične naprave, ki so zdaj že v uporabi po raznih podjetjih. Nadalje so bili izdelani ali pa so v izdelavi tudi že prvi popolni avtomati za varjenje v zaščitnih atmosferah, od kakršnih je eden na sliki 21.

6. Zaključek

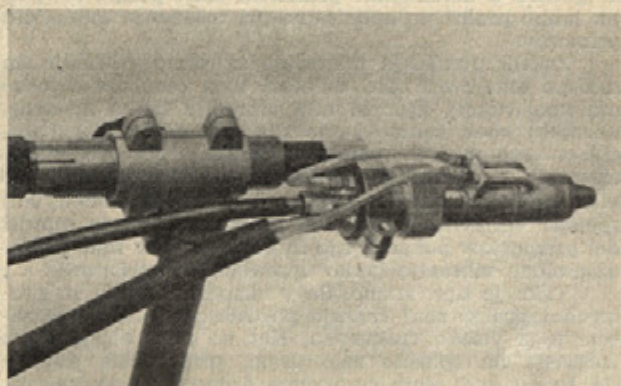
V članku so samo na kratko načeti nekateri problemi v zvezi s tehnologijo obločnega varjenja v zaščitni atmosferi CO_2 . Razvoj tega postopka je dosegel v mednarodnem merilu zelo visoko stopnjo, toda tudi v domačih laboratorijih je bilo opravljeno že upoštevanja vredno razvojno delo, predvsem pri izdelavi domačega materiala in opreme. Začetni uspehi na tem področju so omogočili, da so posamezna podjetja pričela uvajati varjenje po postopku MAG v redno proizvodnjo.

Literatura

- [1] K. L. Zeyen: Neue Entwicklungen und Erkenntnisse auf dem Gebiete der Schweißzusatzwerkstoffe. *Schweißtechnik* (Wien) 17 (1962) 10, str. 141/147.
- [2] P. C. van der Willigen: Einige moderne Verfahren des Lichtbogenschweißens von Stahl. *Philips techn. Rundschau* 24 (1962/63), 1, str. 14/28.
- [3] W. Gilde: Stand und Entwicklung der Schweißtechnik in DDR. *Schweißtechnik* (Berlin) 13 (1963) 1, str. 1/3.



Sl. 22 a. Pištola za polavtomatično varjenje po postopku MIG (MAG)



b. »Gorilnik« za strojno varjenje po postopku MIG

- [4] K. L. Zeyen: Stand der Schweißtechnik und artverwandter Verfahren im Jahre 1961, *Stahl u. Eisen* 82 (1962) 9/10, str. 560/570.

- [5] A. H. Henning: Schutzgasschweißungen mit abschmelzender Elektrode unter Berücksichtigung des Einflusses der Gase, Gasgemische und Zusatzwerkstoffe auf die Naht und die metallurgische Qualität. *Fachbuchreihe »Schweißtechnik«*, zv. 23, str. 32/38.

- [6] Kasatkin: CO_2 -Schutzgas-Schweißen (VEB, Verlag Technik, Berlin (1962), str. 8/72.

- [7] W. M. Timofeev, L. S. Surikow: Erzeugung einer horizontalen Volt-Amper Charakteristik bei Schweißstromquellen mit Hilfe Spannungsreglers. *Automatizatskaja svarka* 12 (1959) 3.

- [8] N. G. Ostapenko: Avtomatizatskaja svarka bortovih švov uglonoi dugoi, stabilizirovani strueli uglekislogo gaza. *Avtogennoe delo* (1951) 5, str. 6.

- [9] W. Mantel, L. Wolf: Lichtbogenschweißen im Schutzgas Coxogen, *VDI-Nachrichten* (1960), zv. 22.

- [10] H. Sekiguchi: Recent advancement of CO_2 - O_2 arc welding process in Japan (1962). Dokument IIW/IIS, XII — 127 — 62.

- [11] V. Prosenec: Ispitivanje zavarivanja čelika po postopku CO_2 . *Zavarivačka tehnika*, 1961, Zbornik referatov s III. mednarodne razstave varilne tehnike 1961 v Zagrebu.

Avtorjev naslov: ing. Viktor Prosenec, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani