

VARJENJE DEBELOSTENSKIH NERJAVNIH ODKOVKOV V OZKI REŽI PO POSTOPKU ELEKTROOBLOČNEGA VARJENJA POD PRAŠKOM

Matej Pleterski, Janez Vajdič, Damjan Klobčar

Izvleček:

Elektroobločno varjenje pod praškom je eden izmed najbolj produktivnih postopkov obločnega varjenja. V kombinaciji z ozkim zvarnim žlebom nam poleg visokega talilnega učinka, dobre kakovosti vara in izkoriščanja energije nudi tudi zmanjšan volumen spoja ter manj priprave zvarnega roba, nižji vnos toplote, manj taljenja osnovnega materiala, manjšo toplotno vplivano področje in manjše deformacije. Prispevek povzema predvsem izvedbo varjenja oz. izdelavo replik zvarov na uparjalnikih ruskih nuklearnih elektrarn z namenom usposabljanja in kvalifikacij osebja za avtomatizirane postopke neporušnih preiskav. Predstavljeni so postopek določitve varilnih parametrov, izbira primerljivih dodatnih in pomožnih materialov, odobritev postopka varjenja ter sama izvedba varjenja segmentov odkovkov cilindričnih oblik. Pristop k zahtevam ter sama uspešnost izvedbe sta bila potrjena z mehanskimi preiskavami in volumetričnimi neporušnimi preiskavami, ki niso pokazale nobenih indikacij.

Ključne besede:

Elektroobločno varjenje pod praškom, nerjavno jeklo, ozka reža, neporušne preiskave

1 Uvod

Sestavine (komponente) pogonsko-krmilne hidravlike (Varjenje pod praškom ali kratko EPP – »elektro pod praškom« – je bilo za praktično uporabo razvito v tridesetih letih dvajsetega stoletja, približno istočasno in neodvisno v ZDA in v takratni Sovjetski zvezi. Postopek spada v skupino najzmogljivejših obločnih varjenj. Visoka gostota varilnega toka v prostem koncu žice in obloku ter dober izkoristek toplote energije in dodatnega materiala zagotavljajo visok talilni učinek. Zanesljivi metalurški procesi v talini vara, gospodarnost in dobra kvaliteta vara omogočajo široko uporabo [1].

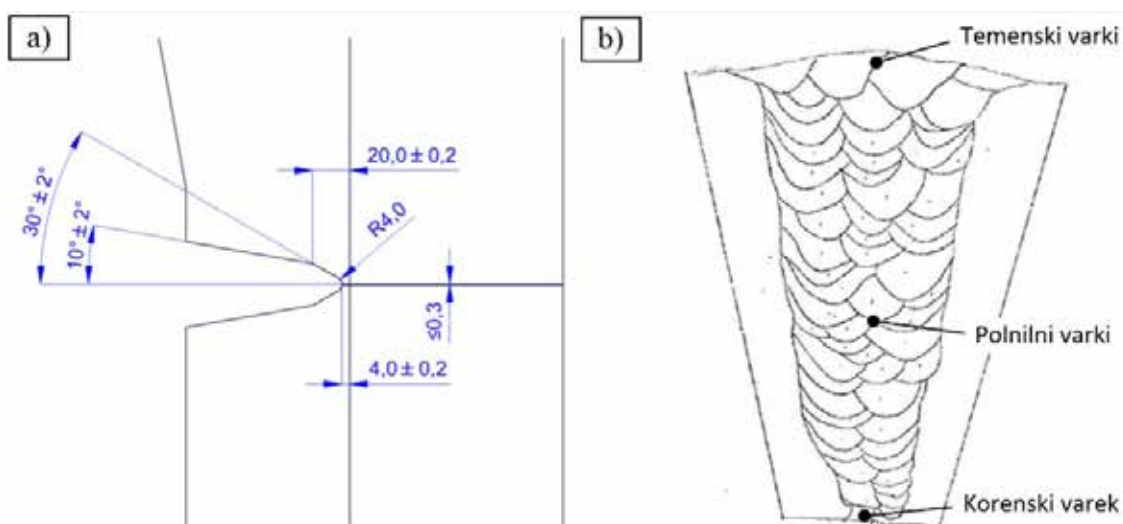
Varilni oblok gori med dodatnim materialom, ki je v obliki žice ali traku, ter osnovnim materialom in je zakrit z žlindro ter praškom. Toplota, ki nastaja v obloku, tali dodatni in osnovni material ter del praška. Rastaljeni dodatni material potuje od elektrode do taline vara najpogosteje v dveh oblikah.

Pri varjenju z manjšimi gostotami tokov je varilna kaverna manjša in rastaljeni dodatni material prehaja v talino vara v večjih kapljicah ob steni žlindre. Pri varjenju z višjimi gostotami tokov material prehaja skozi oblok v manjših kapljicah s prostim preletom. Med varjenjem se v varilni kaverni dogajajo zapleteni metalurško-kemični procesi, ki vključujejo osnovni in dodatni material ter varilni prašek oziroma žlindro [1, 2].

Varjenje v ozki reži se uporablja pri varjenju debelejših materialov, navadno nad 50 mm. To pomeni, da je zvarni rob pripravljen pod manjšim kotom ($2-20^\circ$), kar pomeni, da se čas varjenja ter poraba dodatnega materiala bistveno zmanjšata. S tem je dosežen manjši vnos toplote v osnovni material, toplotno vplivana cona je ožja in kakovost zvarnega spoja boljša. Za dosego kakovostnih zvarov moramo poleg ustreznih varilnih parametrov za določen osnovni material izbrati primeren dodatni material in primeren varilni prašek ter upoštevati navodila proizvajalca dodatnih materialov in praškov [3, 4].

V nadaljevanju je predstavljena tehnologija varjenja izdelave maket oz. replik zvarov z namenom usposabljanja in kvalifikacije osebja za avtomatizirane neporušne preiskave.

Dr. Matej Pleterski, univ. dipl. inž., **Janez Vajdič**, univ. dipl. inž., oba Numip, d. o. o., Ljubljana;
izr. prof. dr. Damjan Klobčar, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 1 : Detajli priprave zvarnega žleba (a) in shematski prikaz gradnje varkov (b)

Preglednica 1 : Primerjava kem. sestave osnovnih in dodatnih materialov

Material	Kem. sestava [%]								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti
08X18H10T	≤ 0,08	≤ 0,8	1,0–2,0	≤ 0,02	≤ 0,035	17–19	9–11	/	(5–6) x %C
AISI 321	0,046	0,37	1,84	0,001	0,039	17,69	9,27	/	0,286
Cb-04X19H11M3	≤ 0,1	≤ 0,6	0,8–2,0	≤ 0,018	≤ 0,025	15–20	10–14	2–3	/
LNS 316L	0,02	0,40	1,70	0,01	0,01	18,6	12,2	2,6	/

2 Tehnologija varjenja

2.1 Zahteve

Za izdelavo čim boljših replik zvarov na šobah uparjalnikov ruskih nuklearnih elektrarn tipa VVER 400 je naročnik definiral tudi jasne zahteve glede izbire dodatnega materiala in praška, priprave zvarnega žleba (slika 1a), gradnje varkov (slika 1b) in vsebnosti ferita, in sicer:

- osnovni material: 08X18H10T (po standardu GOST 22790-89) – debelina na mestu zvara 70 in 90 mm,
- dodatni material: Cb-04X19H11M3 (GOST 2246-70),
- prašek: 48-OF-10 (taljeni aluminatno-fluoridni prašek po GOST 9087-81),
- volumski delež ferita: 2–8 %.

2.2 Izbira primerljivega praška in dodatnega materiala

Dobava zgoraj omenjenega dodatnega materiala in praška je bila v času projekta praktično neizvedljiva. Oboje bi bilo namreč lahko dobavljivo zgolj po naročilu v večjih količinah. Tako je bilo potrebno najti adekvatna nadomestka, ki lahko ugodita zahtevam in sta

obenem na razpolago na domačem ali bližnjih trgih. Za izvedbo preliminarnih testov ter odobritev varilnega postopka je bil izbran material AISI 321 (EN: X6CrNiTi 18-10; 1.4541). Kot dodatni material je bila izbrana varilna žica proizvajalca Lincoln Electric LNS 316L (SIST EN ISO 14343:2017: S 19 12 3L) premera Φ 2,4 mm. Primerjava kemične sestave zahtevanih in izbranih materialov je prikazana v preglednici 1, primerjava mehanskih lastnosti pa v preglednici 2 (vrednosti izbranih materialov so dejanske šaržne vrednosti).

Zahtevanemu prašku 48-OF-10 je najbolje ustrezal novo razviti prašek Elektrode Jesenice AF 385 (preglednica 3). Gre za aglomerirani aluminatno-fluoridni prašek, ki daje gladko, homogeno, kovinsko sijajno površino brez korozijskih oksidov in zagotavlja dobro odstopanje žilindre.

Preglednica 2 : Primerjava meh. lastnosti osnovnih in dodatnih materialov pri $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Material	Mehanske lastnosti		
	Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]
08X18H10T	> 490	> 196	38
AISI 321	557	230	60
Cb-04X19H11M3	> 440	> 275	35
LNS 316L	580	420	35

Preglednica 3 : Primerjava kem. sestave praškov

Material	Kem. sestava [%]								
	SiO ₂	CaF ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	MnO	P	S
48-OF-10	9-12	35-46	28-34	11-14	< 8	< 1	< 0,3	< 0,025	< 0,025
AF 385	15	35	33	< 5	6	< 1	< 0,5	< 0,025	0,286

Varjenje je bilo izvedeno z virom toka Iskra 600C in manipulatorjem, krmiljem ter varilno glavo s pogonom za žico podjetja ESM (Elektro storitve Metelko Robert, s. p.). Meritve FN so bile opravljene s feritometrom Fischer MP 30.

2.3 Določitev parametrov varjenja

Po pregledu literature [5-7] in glede na zahteve po deležu ferita oz. feritnemu številu (FN) in gradnji varkov so bile definirane ciljne vrednosti vnosa energije v zvarni spoj (E) med 10 in 25 kJ/cm in hitrost ohlajanja med 800 in 500 °C nad 30 °C/s oz. čas ohlajanja (t_{8/5}) pod 10 s.

Dejanski vnos toplotne energije med varjenjem izračunamo [1] po formuli (1):

$$E = \frac{\mu \cdot I \cdot U}{v} \quad (1)$$

kjer je μ izkoristek varjenja in je za EPP med 0,9 in 1, U oblačna napetost (V), I jakost toka (A) in v hitrost varjenja (m/s).

Za izračun hitrosti ohlajanja je potrebno prej preveriti ali gre za ploskovni ali volumski način odvajanja toplote. Debelino varjenca primerjamo s kritično debelino d_k, ki jo izračunamo po formuli (2):

$$d_k = \sqrt{\frac{\eta \cdot U \cdot I}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot v} \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right) + \left(\frac{1}{800 - T_0} \right) \right]} \quad (2)$$

kjer je c specifična toplota (60 J/kgK), ρ gostota jekla (7900 kg/m³), T₀ začetna temperatura varjenca (20 °C). Če je debelina varjenca večja kot d_k, velja, da gre za volumski odvod toplote. V tem primeru uporabimo formulo (3) in izračunamo t_{8/5}:

$$t_{8/5} = \frac{\eta}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot F_3 \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \quad (3)$$

kjer je λ toplotna prevodnost (21 W/mK), F3 faktor zvarnega spoja pri volumskem odvodu toplote in znaša 1 za korenski varek ter 0,9 za polnilne in temenske varke. Za želene vnose toplote (10-25 kJ/cm) tako izračunamo dk med 15 in 24 mm. Na podlagi tega smo za preliminarne teste izbrali pločevino debeline 30 mm ter tako zagotovili volumski odvod toplote. Robovi pločevin so bili mehansko obdelani v skladu z zahtevami. Preizkušanje različnih parametrov se je najprej izvajalo z navarjanjem (slika 2a), s čimer se je preverjala predvsem oblika temena (ugodno razmerje višina : širina) in FN in se nato nadaljevalo s polnjenjem zvarnega žleba (slika 2b), kjer so se preverjali prevaritev korena, gradnja varkov (da smo se izognili obrobnim zajedam ali ozkim kanalom), odstopanje žlindre in eventualni medvarkovni vpliv na FN. Opravljenih je bilo 28 testov pri različnih kombinacijah parametrov (I, U in v), na podlagi katerih so bile izbrane optimalne kombinacije, in sicer za:

- ▶ korenski varek: I = 380-400 A, U = 27-28 V, v = 31-33 cm/min,
- ▶ polnilne varke: I = 350-420 A, U = 29-32 V, v = 38-48 cm/min,
- ▶ temenske varke: I = 400-430 A, U = 31-33 V, v = 48-52 cm/min.



Slika 2 : Preliminarni testi z navarjanjem (levo) in v zv. žlebu na 30-milimetrski pločevini (desno)

2.4 Odobritev varilnega postopka

Odobritev varilnega postopka oz. WPQR (Welding Procedure Qualification Record) je bila izvedena v skladu s standardom SIST EN ISO 15614-1:2004/A1:2008 & A2:2012 na pločevini debeline 70 mm. Pri varjenju korenškega varka je bila uporabljena keramična podložka. Zvar je bil izdelan iz 49 varkov ob parametrih, opisanih v *preglednici 4*.

Prosti konec žice se je nastavljal na dolžino med 30 in 35 mm, za kar je bilo potrebno modificirati varilno glavo naprave, predvsem šobo za prašek. Zaradi velikih prečnih napetosti, ki se pojavljajo med varjenjem, je bilo potrebno varjenca močno vpeti (*slika 3a*). Dobljene mehanske lastnosti zvara so povzete v *preglednici 5*, makro obrus z razvidno gradnjo varkov pa na *sliki 3b*.

3 Varjenje odkovkov

Replike štirih zvarov je bilo potrebno izdelati na štirih surovcih (*slika 4a*). To so bili 45-stopinjski segmenti odkovka z notranjim premerom 770 mm, zunanji premerom 1010 mm in višino 430 mm. Segmenti so bili prerežani na pol z abrazivnim vodnim curkom ter nato mehansko obdelani na predvideno konturo, vključno z zvarnim žlebom (*slika 4b*). Tako sta bila izdelana dvakrat (dve različni konturi) po dva para obdelanih surovcev z debelino na mestu zvara 70 oz. 90 mm in enako geometrijo priprave zvarnih robov.

Varjenci so se nato vpeli v posebno namensko izdelano konstrukcijo, katere os je bila podprta z valjčki in povezana z obračalno napravo. Varjenci so bili pozicionirani na ustrezen radij (*slika 4c*). Za zapol-



Slika 3 : Varjenje vzorca med izvedbo WPQR (a) in makro obrus zvara (b)

Preglednica 4 : Parametri varjenja

Varek	Tok [A]	U [V]	Hitrost varjenja [cm/min]	Hitrost dodajanja žice [m/min]	Vnos energije [kJ/cm]	Temperatura [°C]
1 (korenški)	387	27	33,5	3,12	18,7	22
2-44 (polnilni)	333-420	27-31	36-44,3	3,3	14,6-18,0	22-80
45-49 (temenski)	410-433	31-33	48-51	3,3	13,8-15,8	35-80

Preglednica 5 : Izmerjene meh. lastnosti (povprečne vrednosti) na vzorcu za odobritev varilnega postopka

Re [MPa]	Rm [MPa]	KV (VWT) [J]	KV (VHT) [J]	FN
252	554	105	179	7



Slika 4 : a) Odkovek, b) odkovek s pripravljnim zvarnim robom, c) EPP-varjenje odkovkov in d) končni videz izdelanih zvarov

nitev zvarnih žlebov je bilo potrebnih 47 (debelina 70 mm) oz. 71 varkov (90 mm) pri parametrih: $I = 354-433$ A; $U = 29-33$ V; $v = 33,3-51,5$ mm/min. Končni videz varjencev obeh oblik je prikazan na sliki 4 d.

3.1 Neporušne preiskave (NDE) zvarov

Po varjenju je sledila NDE-kontrola varjencev. Uporabili smo naslednje metode:

- ▶ RT - radiografska preiskava vzorcev skladno s SIST EN ISO 17636-1 (2013) razred B, kriteriji sprejemljivosti po SIST EN ISO 10675-1 (2013) / AL1. Izvor sevanja je bil izotop Ir 192 z aktivnostjo 42Ci, pri katerem sta znašala ekspozicijska časa 75 min (70 mm) in 240 min (90 mm).
- ▶ UT - ultrazvočna preiskava vzorcev skladno s SIST EN ISO 17640 (2011), razred B, kriteriji sprejemljivosti po SIST EN ISO 11666 (2011) / AL2. Pri preiskavi so bile uporabljene 45-stopinjske in 60-stopinjske ultrazvočne sonde skupaj z GE USM Go+ inštrumentom.

- ▶ VT - vizualna preiskava vzorcev skladno s SIST EN ISO 17637 (2011), kriteriji sprejemljivosti po SIST EN ISO 5817 (2014), razred B. Vizualna kontrola izvedena z merilcem varov ter pomičnim merilom ob predpisani minimalni osvetljenosti vzorcev.

Vse tri uporabljene neporušne metode so potrdile, da vsi štiri vzorci ustrezajo zahtevanim kriterijem sprejemljivosti, saj pri nobeni od metod ni bilo znanih indikacij.

4 Zaključek

Opisana je tehnologija varjenja materiala, ekvivalentnega AISI 321, po EPP-postopku v zvarnem žlebu z naklonom 10° . Parametri varjenja, izračunani na podlagi določenega vnosa toplote in hitrosti ohlajanja med 500 in 800 °C so se izkazali za primerne, kar je bilo potrjeno z mehanskimi preiskavami v sklopu izvedbe WPQR ter z brezhibnimi rezultati NDE na varjenih odkovkih.

Viri

- [1] J. Tušek, Praktične in računske vaje iz tehnike spajanja, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2004.
- [2] ESAB, Submerged Arc Welding, 02-10-08/KW.
- [3] P. T. Houldcroft, Submerged arc welding, Woodhead Publishing Ltd., 1989.
- [4] J. Tušek, »Narrow gap submerged arc welding with a multiple wire electrode«, Metalurgija 41, 2002, 2, 83–88.
- [5] I. Gowrisankar et al., »Effect of the Number of Passes on the Structure and Properties of Submerged Arc Welds of AISI Type 316L Stainless Steel«, Welding Journal, 05, 1987, 147–154.
- [6] N. A. McPherson et al., »High dilution submerged arc welding of Cr-Ni-Mo austenitic stainless steel«, Science and Technology of Welding and Joining, 5: 1, 2000, 35–39.

Narrow gap submerged arc welding of heavy wall stainless steel forgings**Abstract:**

Submerged arc welding is one of most productive arc welding processes. In combination of narrow gap weld groove besides high melting rate, superior weld quality and arc energy efficiency it offers also minor weld volume, less bevelling, lower cumulative heat input, less parent material melting, narrower heat effected zone and lower welding deformations. Present paper resumes execution of welding or weld replicas manufacturing, which are typical for Russian pressurized water reactor design nuclear power plants with the aim of education, training and qualification of non-destructive examination personnel. Development of welding parameters, selection of welding materials and consumables, welding procedure qualification as well as cylindrical forging welding is presented and analysed. The approach towards demands and execution itself was confirmed by mechanical testing and volumetric non-destructive examinations which revealed zero non-conformances or indications.

Keywords:

SAW, stainless steel, narrow gap, non-destructive examination (NDE)

Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo prof. dr. Rajku Kejžarju za pomoč in koristne nasvete pri izvedbi projekta ter podjetjema TKC, d. o. o., in Qtechna, d. o. o., za organizacijo in ažurno izvedbo porušnih testiranj ter medfaznih in končnih NDE.

**INŽENIRING****MONTAŽA****VZDRŽEVANJE**

Jedraska, farmacevtska, energetska & procesna industrija

Numip d. o. o.

Cvetkova ulica 27, 1000 Ljubljana, Slovenija

Podružnica Krško: CKŽ 135 e, 8270 Krško

www.numip.si

info@numip.si

Jedraska: +386 (0)7 49 12 433

Farmacevtska: +386 (0)7 49 12 451

Energetska in procesna: +386 (0)7 49 12 420