



Mića Đorđević^{1,a}, Dragan Đorđević¹, Vladimir Đorđević¹

SANACIJA RADNOG KOLA CENTRIFUGALNE PUMPE OD CIRKONIJUMA

REPAIR OF CENTRIFUGAL PUMP WORKING WHEEL MADE OF ZIRCONIUM

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Juli 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Januar 2023.

Ključne reči: navarivanje, legure Zr, radno kolo

Rezime

Cirkonijum i legure cirkonijuma imaju svoju glavnu primenu u hemijskoj industriji kao konstrukcioni materijal otporan na koroziju, obzirom da pokazuje odličnu otpornost u većini agresivnih sredina, kao što su organske i neorganske kiseline, rastvori soli, jake alkalije i neki rastopi soli. Neki od važnijih delova opreme u hemijskoj procesnoj industriji u kojima se cirkonijum i njegove legure koriste obuhvataju isparivače, rezervoare, reaktorske posude, pumpe, ventile i cevi. Imajući uvidu značaj i visoku cenu takvih delova, reparaturno zavarivanje zauzima značajno mesto u održavanju takve opreme.

U ovom radu je prikazana tehnologija reparaturnog navarivanja radnog kola centrifugalne pumpe u pogonu za proizvodnju sirćetne kiseline, koje je izrađeno od livene legure zirconiuma Zr 702. U okviru istraživanja izvršena je analiza osnovnog i dodatnog materijala za proces reparaturnog navarivanja, definisani su oprema, parametri i uslovi navarivanja. Radi provere predložene tehnologije izvršena su probna navarivanja i na osnovu dobijenih dobrih rezultata izvršeno je i reparaturno navarivanje radnog kola centrifugalne pumpe. Kvalitet obavljene reparaure proveren je vizuelnom kontrolom i kontrolom penetrantima i konstatovano je da navar zadovoljava nivo kvaliteta prema standardu SPRS EN ISO 5817 "B". Kao potvrda dobro definisane tehnologije i uspešno izvedene reparaure, je činjenica da je reparirano radno kolo u procesu proizvodnje već 8 godina.

Adresa autora / Author's address:

¹Tehweld d.o.o. Loznica
Italijanskih dobrovoljaca 7
15300 Loznica, Srbija

Email: ^a tehweld@yahoo.com

Keywords: surfacing, Zr alloys, working wheel.

Abstract

Zirconium and zirconium alloys have their main application in the chemical industry as a corrosion-resistant construction material, since it shows excellent resistance in most aggressive environments such as organic and inorganic acids, salt solutions, strong alkalis and some molten salts. Some of the more important pieces of equipment in the chemical process industry where zirconium and its alloys are used include evaporators, tanks, reactor vessels, pumps, valves and piping. Considering the importance and high cost of such parts, repair welding occupies a significant place in maintaining such equipment.

This paper presents the technology of repair welding of the centrifugal pump working wheel in the plant for the production of acetic acid. It is made of cast zirconium alloy Zr 702. Within the framework of the research, an analysis of the basic and filler material for the repair welding process was performed, and welding parameters and conditions were defined. In order to verify the proposed technology, trial welding was performed and based on the good results obtained, repair welding of the working wheel of the centrifugal pump was performed. The quality of the performed repair was checked by visual control and penetrant control, and it was found that the surfaced layer meets the quality level according to the SPRS EN ISO 5817 "B" standard. The fact that the repaired working wheel has been in the production process for 8 years, is a proof of well-defined technology and successfully performed repairs.



1. Uvod

Radno kolo centrifugalne pumpe u pogonu za proizvodnju sirćetne kiseline izrađeno je od livenog materijala, legure zirkonijuma Zr 702, koja je definisan standardom ASTM B752 Gr.702 [1]. Zbog radnih uslova dolazi do erozije glavčine radnog kola. Da bi se ista sačuvala, na glavčinu se navlači habajući prsten izrađen od legure zirkonijuma 705. Pošto je u toku višegodišnje eksploatacije došlo do značajnih oštećenja usled korozije na glavčini, nije više mogao da se i dalje navlači habajući prsten. Usled toga, moralo se pribeći navarivanju pohabane površine glavčine i mašinskoj obradi na zadatu meru. Osnovne karakteristike i radni uslovi radnog kola su:

Materijal radnog kola: Zirconium 702

Dimenzije radnog kola: Ø 394 x 115

Dimenzije rukavca za obradu: Ø 168,5 x 22

Broj obrtaja: $n = 3600^\circ/\text{min}$

Radna temperatura: $t = 128^\circ\text{C}$

Radna sredina: voda 18%, sirćetna kiselina 79%, jod 2,67%, metil-jodid 0,37%, čvrste čestice radijuma 331 ppm-a.

1.1. Osobine legura Zr 702 i Zr 705

U prirodi je cirkonijum rasprostranjen i često ide u kombinaciji sa hafnijumom. Legura Zr 702 je legura cirkonijuma (Zr) i hafnijuma (Hf), pri čemu je težinski odnos Zr 95,5% - 99,2%, a sadržaj hafnijuma (Hf) je do 4,5%, dok je legura Zr 705 dodatno legirana niobijumom, čime se povećava čvrstoća i plastičnost. Prisustvo hafnijuma u leguri ne utiče bitno na fizičke, mehaničke i korozione osobine. On je nepoželjan u nuklearnim postrojenjima jer ima veliki poprečni presek za apsorpciju termičkih neutrona obzirom da je oko 570 puta veći od zirkonijuma. Čist cirkonijum je znatno skuplji od legura Zr 702 i Zr 705, jer je teško izdvojiti hafnijum, zbog sličnih hemijskih osobina. Cirkonijum se najčešće legira sa kalajem (Sn) i niobijumom (Nb), radi povećanja korozivnih i mehaničkih svojstava i takve legure imaju primenu u nuklearnim elektranama. [2, 3]

Legura Zr 702 je ekonomski isplativa, pa se upotrebljava za izradu delova gde je potrebna dobra otpornost na koroziju u agresivnim sredinama i dobre mehaničke osobine. Tipičan hemijski sastav legura Zr 702 i Zr 705 prikazan je u Tabeli 1, a mehaničke osobine prikazane su u Tabeli 2 [4].

Tabela 1. Tipičan hemijski sastav legura Zr 702 i Zr 705

Table 1. Typical chemical compositions of Zr 702 i Zr 705 alloys

Legura	Zr+Hf min.	Hf max.	Fe+Cr max.	Sn	H ₂ max	N ₂ max.	C max.	Nb (Cb)	O ₂ max.
Zr 702	99,2%	4,5%	0,20%	-	0,005%	0,025%	0,05%	-	0,16%
Zr 705	95,5%	4,5%	0,20%	-	0,005%	0,025%	0,05%	2-3%	0,18%

Tabela 2. Tipične mehaničke osobine Zr702 i Zr705 legura na sobnoj i na povišenim temperaturama

Table 2. Typical mechanical properties of Zr702 i Zr705 alloys on room and elevated temperatures

	Sobna temp.	Povišena temp. 93°C	Povišena temp. 149°C	Povišena temp. 204°C	Povišena temp. 260°C	Povišena temp. 316°C	Povišena temp. 371°C
Zr 702							
Zatezna čvrstoća, MPa	468.1	364.0	303.7	229.6	200.6	197.9	156.5
Granica tečenja, MPa	321.1	267.5	195.8	139.3	128.9	97.2	82.0
Izduženje, %	28.9	31.5	42.5	49.0	49.0	40.1	44.1
Zr 705							
Zatezna čvrstoća, MPa	615.0	494.7	388.9	369.3	326.1	299.7	281.0
Granica tečenja, MPa	506.1	390.7	272.3	261.8	195.8	190.2	173.0
Izduženje, %	18.8	30.5	31.7	33.0	28.9	29.0	27.8



Legura Zr 702 je kao i čist Zr reaktivna (hemijski jaka aktivnost) i poseduje veliki afinitet prema gasovima: O_2 , N_2 , CO_x i H_2 . Zavisnost apsorpcije gasova od temperature prikazana je u Tabeli 3 [3]. Zr se lako vezuje sa kiseonikom. Pri sobnoj temperaturi i kontrolisanom procesu zagrevanja stvara se zaštitni pasivizirani sloj ZrO_2 koji ga štiti od dalje korozije. Pasivizirani sloj stvoren na sobnoj

temperaturi štiti cirkonijum od uticaja svih gasova iz vazduha sve do $200^\circ C$. Pri daljem zagrevanju dolazi do reakcije sa pojedinim gasovima. Ako se proces odvija kontrolisano, brzina oksidacije se povećava, kao i debljina zaštitnog sloja, a povećava se i otpornost na eroziju i koroziju u određenim agresivnim sredinama [4].

Tabela 3. Zavisnosti apsorpcije gasova kod Zr od temperature [5]

Table 3. Dependence of gas absorption in Zr on temperature [5]

metal	Temperatura reakcije gasa $^\circ C$					Temperatura pri oksidaciji $^\circ C$		
	H_2	O_2	N_2	Obrazovanje karbida, borida i silicida	H_2O	logaritamskoj	paraboličnoj	linearnoj
Zr	> 300	> 250	>600	>1000	>200-250	<200	200-900	>900

Logaritamska i parabolična oksidacija označava da se proces odvija sporo i da se zaštitni film obrazuje usporeno. Linearna oksidacija znači da proces protiče konstantnom brzinom što dovodi do zasićenja cirkonijuma kiseonikom. Posledica linearne oksidacije je krtost metala [5]. Cirkonijum na temperaturi $865^\circ C$ menja kristalnu strukturu iz heksagonalne, α – modifikacija, u β – modifikaciju sa kubnom kristalnom strukturom, stabilnom iznad $865^\circ C$.

Zbog navedenih osobina sasvim je opravdano što je radno kolo centrifugalne pumpe u pogonu za proizvodnju sirćetne kiseline izrađeno od legure Zr 702.

1.2. Zavarljivost Zr i Zr legura

Cirkonijum i cirkonijumove legure su dobro zavarljive, ali kao i kod svih reaktivnih materijala moraju se preduzeti odgovarajuće mere, kao što je zaštita od uticaja spoljne atmosfere na zavarivačku kupku i na zagrejani deo metala na temperaturama iznad $300^\circ C$. To se ostvaruje zavarivanjem u vakuumu ili u inertnoj atmosferi argona, helijuma ili njihove mešavine. Zaštita može da bude opšta, u komorama - u zvonu - Slika 2 ili lokalna uz primenu naprava - alata, „tragova“ za dodatnu zaštitu metala šava i ZUT-a, što je prikazano na Slici 3. Debljine ispod 12 mm zahtevaju i tercijalnu zaštitu, odnosno zaštitu korene strane, alatom koji je prikazan na Slici 4.



Slika 2. Komora za zavarivanje dimenzija 450 x 450 x 600mm

Figure 2. Welding chamber with dimensions 450 x 450 x 600mm



Slika 3. Alat – trag za sekundarnu zaštitu metala šava i ZUT-a

Figure 3. Tool - trace for secondary protection of weld metal and HAZ



Slika 4. Alat za zaštitu korena vara

Figure 4. Weld root protection tool

Pri zavarivanju je vrlo važna brzina hlađenja, od temperature fazne transformacije kristalne rešetke $\beta \rightarrow \alpha$ (865 °C) do neke temperature kada je kristalna struktura završila svoje formiranje. Ako je brzina hlađenja velika, pojaviće se β struktura koja je tvrda i krta i koja može da izazove pojavu hladnih prslina. Ako je vreme hlađenja predugo, stvoriće se krupnozrnasta struktura, widmanštetenova (widmanstälten) struktura. Ona ima povećanu tvrdoću i krtost, što takođe izaziva pojavu hladnih prslina. Optimalna brzina hlađenja je negde između minimalne i maksimalne vrednosti, a to se može izračunati preko relacija za vreme hlađenja, $t_{9/3}$ ili korišćenjem nomograma ili TTT dijagrama [6-9].

Čistoća je preduslov za kvalitetno izvedeno zavarivanje. Čistoća podrazumeva čistoću osnovnog metala, dodatnog materijala i okoline, kao i svih stvari koje dolaze u dodir i učestvuju u stvaranju šava.

Posebna pažnja se mora obratiti na moguću pojavu poroznosti i prslina nakon zavarivanja. Poroznost nastaje usled unosa vodonika u kupku iznad granice rastvorljivosti zajedno sa apsorbovanom vlagom sa ivica žleba koji se zavaruje ili na žici – dodatnom materijalu. Poroznost se smanjuje ili eliminiše primenom osnovnog metala i dodatnog materijala sa smanjenim sadržajem vodonika, a ako to nije moguće, što je najčešći slučaj, onda treba pažljivo pripremiti osnovni metal i mašinski formirati žleb bez zarez. Žleb i okolinu je potrebno pažljivo očistiti i odmastiti. Takođe i žica - dodatni materijal treba da bude brižljivo očišćen. Poroznost može da nastane i zadržavanjem mehurića inertnog gasa u kupki tokom kristalizacije, što se rešava smanjenjem brzine protoka zaštitnog gasa, tj. izborom optimalnog protoka. I apsorbovani ugljenik na površini koja se zavaruje može da izazove poroznost.

Moguća je pojava hladnih prslina, uglavnom izazvanih vodonikom koji je apsorbovan preko mere zasićenja cirkonijuma. Takođe, usled loše zaštite, moguće je prekomerno dejstvo gasova (O_2 , N_2 , CO_x) koje utiče na krtost, pad plastičnosti i lom. Zato je potrebno da se ostvari zaštita od uticaja spoljne atmosfere primenom odgovarajuće šobe, dodatka (alata „traga“) iza šobe i naprave za zaštitu korena. Šoba treba da je široka, profilisana, a poželjno je da ima ugrađeno sito koje će osigurati laminarni protok zaštitnog gasa - argona. Argon treba da je velike čistoće (Ar 5,5). Žleb i okolina potrebno je da se očiste alkoholom, kao i žica – dodatni materijal. Zavarivač treba da ima čiste, nove, bele rukavice. Pojava toplih prslina nije svojstvena cirkonijumu ni legurama cirkonijuma.

Usled neadekvatnog termičkog ciklusa u toku zavarivanja može doći do termofizičkih dejstava koja mogu izazvati pregrevanje, porast zrna, izdvajanje krtih faza, stvaranje widmanštetenove strukture, a sve to pogoduje stvaranju prslina. Termo-fizički procesi u toku zavarivanja su u funkciji brzine hlađenja, pa je potrebno izračunati vreme hlađenja $t_{9/3}$ ($t_{865/300}$). Da bi se odredilo vreme hlađenja $t_{9/3}$ potrebno je prvo da se izračuna granična debljina prema formuli za d_{gr} . Ukoliko je stvarna debljina manja od izračunate granične vrednosti, za izračunavanje unosa toplote koristi se dvodimenziona analitička jednačina, u suprotnom primenjuje se trodimenzioni model. Izračunavanje granične debljine materijala, d_{gr} , izvršeno je prema jednačini:

$$d_{gr} = \sqrt{\frac{Q}{2\rho \cdot c} \left(\frac{1}{300 - T_0} + \frac{1}{865 - T_0} \right)} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

gde je:

Q – unešena energija, $Q = U \cdot I \cdot \varepsilon$ [W], $\left[\frac{J}{s} \right]$

T_0 – početna temperatura OM, [K]



d – stvarna debljina za navarivanje, [mm], korišćeno je: $d = 3-6,5\text{mm}$

I – struja navarivanja [A], odabrano: $I_z = 100\text{A}$

U – napon zavarivanja [V], korišćeno je: $U_z = 14\text{V}^*$

*Napon se izračunava prema empirijskom obrascu na osnovu odabrane jačine struje I_z , za invertorski aparat: $U = 10 + 0,04 \times I_z = 10 + 0,04 \times 100 = 14\text{V}$

ε - koeficijent toplotne efikasnosti za TIG, $\varepsilon = 0,6-0,65$

v - brzina navarivanja/zavarivanja, [mm/s]**

**određeno eksperimentalno: $v = 175$ [mm/min] $\approx 2,9 - 3$ [mm/s]

$$\rho - \text{gustina} = 6,51\text{g/cm}^3 = 6,51 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$c - \text{specifična toplota} = 284 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

Rešavanjem gornjeg izraza dobija se da je $d_{gr} > d_s$, pa se primenjuje dvodimenzioni model za izračunavanje temperature hlađenja od temperature fazne transformacije, $t = 865^\circ\text{C}$, do završetka procesa, $t = 300^\circ\text{C}$, pa je primenjena jedna (2) za proračun vremena hlađenja:

$$t_{865/300} = \frac{Q^2}{4\pi\lambda\rho cd^2} \cdot \left(\frac{1}{(300-T_0)^2} - \frac{1}{(865-T_0)^2} \right) \quad (2)$$

U proračunu u jednačini (2) su korišćeni sledeći podaci:

$$Q = \frac{UI}{v} \varepsilon; T_0 = 60^\circ\text{C}; v = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}; U = 14,8\text{V}; I = 120\text{A}; d = 6,5\text{mm} = 6,5 \cdot 10^{-3}\text{m},$$

pa je:

$$Q = \frac{14,8 \cdot 120}{4 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,65 = 288,6 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{m}} \rightarrow Q^2 = 8,33 \cdot 10^{10} \frac{\text{J}^2}{\text{m}^2}$$

$$10^{10} \frac{\text{J}^2}{\text{m}^2}$$

$$t_{865/300} =$$

$$\frac{8,329 \cdot 10^{10} \frac{\text{J}^2}{\text{m}^2}}{4 \cdot 3,14 \cdot 22 \frac{\text{J}}{\text{ms} \cdot \text{K}} \cdot 6,51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10^3 \cdot 284,7 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (6,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \text{m}^2} \cdot \left(\frac{1}{(300-60)^2} - \frac{1}{(865-60)^2} \right)$$

Dobijeno je vreme hlađenja:

$$t_{865/300} = \frac{8,33 \cdot 10^9 \frac{\text{J}^2}{\text{m}^2}}{21,6 \cdot 10^3 \frac{\text{J}^2}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^2}} \cdot 1,58 \cdot 10^{-5} = \frac{131,6 \cdot 10^9 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-5}}{21,6 \cdot \frac{1}{\text{s}}} = 60,9\text{s}$$

1.3. Odabir dodatnog materijala

Legura Zr 702 se zavaruje uspešno identičnim dodatnim materijalom, a može da se upotrebi i legura Zr 705 koja ima 2-3% niobijuma i kompatibilna je sa legurom Zr 702. Za predviđena zavarivanja izabran je dodatni materijal Zr 705. Razlika pri upotrebi jednog ili drugog dodatnog materijala, je u tome što nanošenjem istorodne legure na osnovni materijal nije potrebna naknadna termička obrada radi relaksacije zaostalih napona, a pri upotrebi legure Zr 705 kao dodatnog materijala preporučuje se termička obrada na temperaturi 565°C u trajanju 30 – 60 minuta. Pored relaksacije zaostalih napona poboljšavaju se i antikorozijske osobine. Termička obrada se može raditi u vakuumskim pećima ili pećima ispunjenim inertnim gasom, a može da bude i blago oksidirajuća sredina i tada se postiže kontrolisana površinska oksidacija. Trajanje temperaturnog tretmana je 4 – 6h, pri čemu se postiže površinska tvrdoća oko 47 HRC, pri čemu se osim povećanja tvrdoće, povećava i otpornost na koroziju. U svakom slučaju, termička obrada omogućava oslobađanje od vodonika i na taj način se izbegava mogućnost pojave hladnih zaostalih prslina. Termička obrada treba da se obavi u roku do 14 dana po završetku zavarivanja [7].

2. Eksperimentalni deo

2.1. Probna navarivanja

Na ploči cirkonijuma Zr 702, dimenzija $110 \times 250 \times 6,5$ mm izvršeno je probno navarivanje u jednom sloju TIG-postupkom, žicom Zr 705 prečnika 2 mm. Debljina nanetog sloja je 2 mm, dimenzije navara su bile 60×200 mm. Parametri navarivanja prikazani su Tabeli 4. Nakon navarivanja izvršena je vizuelna kontrola i merenje tvrdoće.

Tabela 4. Parametri probnog navarivanja

Table 4. Parameters of trial surfacing

Jačina struje navarivanja I_z , [A]	Napon U, [V]	Udaljenost vrha W-igle h, [mm]	Protok Ar [l/min]			Netopiva elektroda	Vreme hlađenja, [s]	Dimenzija dod. mater. (žice) Zr 705 [mm]
			Primarna zaštita	Sekundarna zaštita	Tercijalna zaštita			
120	14,8	3	12	10	9	W La2 Ø 2,4	60	Ø 2



2.2. Izvođenje navarivanja radnog kola

Priprema osnovnog materijala obuhvatala je sledeće korake: pranje acetonom radi odstranjivanje masnoće, pranje alkoholom radi odstranjivanja vlage i četkanje četkom od prohroma radi odstranjivanja površinskog oksida.

Primarna zaštita procesa navarivanja, odnosno zaštita kupke vršena je keramičkom šobom prečnika 19mm. Pri zavarivanju cevi prečnika iznad 500 mm alat za sekundarnu zaštitu je ravan, a kada je prečnik manji od 500 mm, alat se prilagođava radijusu, lučnog je oblika. U našem slučaju navarivao se prečnik 168 mm. Alat je izrađen od nerđajućeg čelika sa umetnutom mrežicom koja je obezbeđivala laminaran tok argona. Posebna pažnja je posvećena vezi alata sa keramičkom šobom da ne bi došlo do turbulencije između primarne i sekundarne zaštite. Dimenzije alata su: dužina 80 mm, širina 25 mm i prethodno je prikazana na Slici 3. Zbog male debljine osnovnog materijala, morala je da se zaštititi i površina ispod navarivanja za šta je napravljen alat sa tercijalnom zaštitom za kružni otvor od Ø160 mm. Dužina tog

alata je 100 mm, a širina 30mm. Izgled alata dat je na Slici 4.

Masa zavarivačkog uređaja je bila priključena direktno na radno kolo. Temperatura tokom procesa je kontrolisana digitalnim IC termometrom i kontaktnim sondama postavljenim 10 mm od šava. Parametri zavarivanja - navarivanja prikazani su u Tabeli 5.

Dobra zaštita se može postići i u komori za zavarivanje sa argonom, ali postoje značajni nedostaci i to: skučenost prostora pri radu, nema dovoljno pothlađivanja, pa postoji opasnost od pregrevanja, zatim nemogućnost međufaznog ispitivanja i eventualne popravke. Izrada komore je znatno skuplja od izrade alata za lokalnu zaštitu.

Tokom procesa navarivanja korišćen je kvalitet argona Ar 99,999%. Međutim smatramo da zadovoljava i niži kvalitet, obzirom na iskustvo u NE Krško gde je zavarivana legura cirkonijuma sa kalajem – cirkolaj korištenjem Ar 99,95%.

Tabela 5. Parametri zavarivanja primenjeni pri izvođenju navarivanja radnog kola

Table 5. Welding parameters applied for surfacing the working wheel

Lokacija	Jačina struje zavarivanja I_z [A]	Napon [V]	Udaljenost h, vrha W igle, [mm]	Protok Ar [l/min]			Vreme hlađenja u zaštiti argona [s]
				Primarna zaštita	Sekundar. zaštita	Tercijalna zaštita	
Ugaoni navar	130	15,2	5	12	10	9	60
Navarivanje ivice (deblj.2mm)	75	13	3	12	10	9	
Navarena površina	120	14,8	3	12	10	9	

Napomena: - Netopiva elektroda W La 2 Ø2,4mm, dodatni materijal: žica Zr 705, Ø 2 mm

Navarivanje se izvodilo kružno sa preklapanjem navara u najpovoljnijem, vodoravnom položaju (PA). Zbog male deformabilnosti Zr 702 navarivanje nije trebalo da se izvodi polaganjem navara sa preskocima, dijametralno suprotno. Navarivalo se u kontinuitetu, uvek u istom smeru od ugaonog spoja prema kraju ivice cevi. Dužina jednog poteza (navara) bila je od 50 – 70 mm. Nakon hlađenja u argonu u trajanju od najmanje 60s, dalje hlađenje do 70°C – 50°C vršeno je na vazduhu. U

temperaturnom intervalu 300°C-50°C površina navara je od metalno-sjajne srebrne boje prelazila u svetlu, blago žutu boju zbog uticaja gasova iz atmosfere. Posle četkanja nerđajućom četkom vraćala se sjajna srebrna boja, što znači da su uklonjeni apsorbirani gasovi sa tople površine šava. Tek tada se prilazilo daljem navarivanju, što je prikazano na Slikama 5 i 6. Izvršeno je višeslojno navarivanje.



Slika 5. Prikaz procesa navarivanja

Figure 5. View of the surfacing process



Slika 6. Četkanje nakon hlađenja, radi uklanjanja blagog oksida

Figure 6. Brushing after cooling, to remove mild oxide

3. Rezultati i diskusija

3.1. Probna navarivanja

Nakon probnih navarivanja sa parametrima prikazanim u Tabeli 4. izvršena je vizuelna kontrola i nisu uočene nedozvoljene greške tipa pora ili

prslina. Izgled navarene površine i poprečnog preseka probnog uzorka prikazani su na Slici 6. Estetika navarenog sloja nije zadovoljavajuća (Slika 6a), dosta je izbrazdana površina. Taj nedostatak je ispravljen prilikom navarivanja radnog kola.



a)



b)



c)

Slika 6. Makro izgled navarenog probnog uzorka: a) gornja površina nakon navarivanja, b) gornja površina nakon ispitivanja penetrantima, c) poprečni presek navara ispitan penetrantima

Figure 6. Macro view of the welded test sample: a) upper surface after welding - surfacing, b) upper surface after penetrant testing, c) cross-section of welds tested with penetrants



Na slici su vidljive obrušene površine (ostrva). Razlog izbrusivanja je stvaranje ravne površine radi mogućnosti ispitivanja tvrdoće koja je obavljena u Zavodu za zavarivanje u Beogradu. Priprema površine u Zavodu za zavarivanje je vršena "suvim" brušenjem uz intenzivno varničenje što je dovelo do stvaranja površinskog upliva gasova, a rezultat je znatno povećana tvrdoća. Ispitivanja penetrantima na probnoj ploči, prikazani na Slikama 1b i 1c, pokazuju da je navar bez nalaza grešaka (BN), tj. zadovoljava nivo kvaliteta prema standard EN ISO 5817 za nivo kvaliteta "B".

Navarivanje je izvršeno sa unapred određenim parametrima i pokazalo se da su oni zadovoljili sve zahteve za kvalitetno nanošenje navara na radno kolo. Jedino je trebalo popraviti estetiku navara što je i učinjeno pri navarivanju radnog kola.

Izračunata temperatura hlađenja, $t_{9/3} = 60$ s, je potpuno zadovoljila potrebe navarivanja u praksi. U toku daljeg hlađenja na mirnom vazduhu, svetla srebrna boja je prelazila u sjajnu bledu žutu koja se četkanjem uklanjala. Po hlađenju do $70^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ pristupilo se nanošenju sledećeg sloja. Kompletno navarivanje je izvršeno sa lokalnom zaštitom.

Izvršeno je merenje tvrdoće i dobijeni rezultati merenja tvrdoće površina su: OM – 222 HV, ZUT – 235 HV, MŠ – 222 HV.



Slika 7. Kontrola penetrantima kvaliteta navara radnog kola
Figure 7. Penetrant control of the quality of the working wheel welds

Ultrazvučna kontrola se radi tamo gde je to moguće i gde je opravdano kao i kod svih drugih metala. Debljina ispitivanog osnovnog materijala je 5,75mm što je nepovoljno za ultrazvučno ispitivanje. Radiografska kontrola se ne radi na reaktivnim metalima, jer šav može da bude definisan kao škart, usled loše zaštite i apsorpcije gasova, a da na filmu nema nikakve detekcije.

3.2. Navarivanje radnog kola

Prva i osnovna kontrola kvaliteta navara radnog kola je vizuelna i obavlja se na osnovu posmatranja boje na površini šava i ZUT-a. Svetlo srebrna boja je znak da je zaštita bila korektna. Blagi uticaj vazduha dao bi slamnato-žutu do zlatno žutu boju, što bi uglavnom zadovoljavalo, a otklanja se četkanjem. Malo veći upliv vazduha stvorice plavu i ljubičastu svetlu boju, što bi moglo da bude diskutabilno i zavisi od medija kome je predmet izložen i zahteva za čvrstoćom. Neprolazni zavari su obojeni mat belom ili žutom bojom (boja krede koja se peruta). To je znak da je došlo do velikog zagađenja, tj. upliva gasova: bela boja – uticaj kiseonika; žuta boja potiče od azota. Takvi šavovi su tvrdi i krti, bez ikakve elastičnosti. Ne mogu se popraviti nikakvim tretmanom i predmet je neupotrebljiv.

Druga kontrola koja se radi je kontrola penetrantima i njome se otkrivaju pore i prslina. Kontrola penetrantima je urađeno 48h nakon navarivanja zbog mogućnosti pojave zakasnelih hladnih prslina, što je prikazano na Slici 7. Ispitivanjem penetrantskom tečnošću utvrđeno je da obrađeni navar zadovoljava nivo kvaliteta prema standard SPRS EN ISO 5817 "B".

Treća vrsta kontrole koja je izvršena je kontrola je merenje tvrdoće šava i ZUT-a i rezultati su prikazani u Tabeli 6. Tvrdoćom se procenjuje kakvog je sastava metal, kolika je prisutnost tvrdih i krtih faza.



Tabela 6. Izmerene tvrdoće navara radnog kola
Table 6. Measured hardness of the surfaced working wheel

Mesto merenja	Srednja vrednost tvrdoće, [HB]
OM	319
ZUT	345
MŠ	248

Pošto nije bilo moguće da se izmeri tvrdoća na statičnom aparatu, primenjen je prenosni uređaj TDM-2 ruske proizvodnje koji je baždaren na čeliku, pa izmerene vrednosti služe samo kao uporedne mere tvrdoća za OM, MŠ i ZUT.

4. Zaključak

Na osnovu prikazanih rezultata izvršenog reparaturnog navarivanja radnog kola centrifugalne pumpe iz pogona za proizvodnju sirćetne kiseline izrađenog od Zr legure, može se zaključiti da je u okviru rada:

- Izvršena analiza osnovnog i dodatnog materijala za proces reparaturnog navarivanja,
- Proračunati su i definisani su parametri i uslovi reparaturnog navarivanja,
- Izvršena su probna navarivanja i na osnovu dobijenih dobrih rezultata izvršeno je i reparaturno navarivanje radnog kola centrifugalne pumpe,
- Kvalitet obavljene reparature proveren je vizuelnom kontrolom i kontrolom penetrantima i konstatovano je da navar nema pore i prsline i da zadovoljava nivo kvaliteta prema standardu SPRS EN ISO 5817 "B"

Na kraju, može se konstatovati da je uspešno izvršeno je reparaturno navarivanje radnog kola od Zr legure i da su dobijeni odlični rezultati. Kao potvrda toga je i činjenica da je radno kolo uspešno ugrađeno i da je u procesu proizvodnje već 8 godina.

Literatura / References

- [1] ASTM B752-22 (2022): Standard Specification for Castings, Zirconium-Base, Corr. Resistant, for General Application, April 2022.
- [2] ATI Zircadyne 702 and 705 (2012) – Zirconium (page 1-6 version1) Pittsburgh USA.
- [3] Zavarivanje knjiga 2 IT priručnik (1980), Izdavač RAD, Beograd
- [4] <https://www.atimaterials.com/zirconium/alloy> (2022)

Nakon izvršenih kontrola i dokazanog kvaliteta, izvršena je mašinska obrada koja je obavljena na strugu uz obilato hlađenje, sa malom perifernom brzinom uz povećani posmak. Na taj način se dobio povoljan odnos zapremine i površine strugotine, a to je neophodno kako ne bi došlo do samozapaljenja.

4. Conclusion

Based on the presented results of the repair welding of the working wheel of the centrifugal pump from the plant for the production of acetic acid, which is made of Zr alloy, it can be concluded that within the scope of work was performed:

- Analysis of the basic and filler material for the process of reparative surfacing,
- The parameters and conditions of reparative surfacing have been calculated and defined,
- Trial welding was performed and based on the good results obtained, repair welding of the working wheel of the centrifugal pump was performed.
- The quality of the performed repair was checked by visual control and control with penetrants, and it was concluded that the surfaced layer has no pores and cracks and that it meets the quality level according to the SPRS EN ISO 5817 "B" standard.

In the end, it can be stated that the reparative welding of the working wheel made of Zr alloy was successfully carried out and that excellent results were obtained. The fact that the working wheel has been successfully installed and has been in the production process for 8 years is proof of that.

- [5] Zavarivanje knjiga 4 IT priručnik (1980), Izdavač RAD, Beograd
- [6] Richard Sutherland (2004): Zavarivanje cirkonijuma i legura cirkonijuma, Tube & pipe journal, oktobar/novembar.
- [7] D. Mesing, M.Gordić (1987): Zavarljivost Circalloy-a, međ. sav.– Zbornik referata, Zagreb.
- [8] I.Limper (1987) : Zavarljivost Circalloy-a, međunarodno savetovanje – Zbornik referata, Zagreb.
- [9] Zavod za zavarivanje – zavarivanje cirkonijuma i njegovih legura, br. dok. 2.24, str. 15-20