

## ISTRAŽIVANJE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE PLINSKI NAŠTRCANIH PREVLAKA

### Investigation of abrasive wear resistance of flame sprayed coatings

Sara Havrlišan<sup>1</sup>, Katica Šimunović, Tomislav Šarić, Goran Šimunović, Ilija Svalina, Roberto Lujčić

<sup>1</sup> Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu

**Ključne riječi:** *legure nikla, naštrcavanje pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem, abrazijsko trošenje.*

**Keywords:** *Ni-based self-fluxing alloy, flame spraying with fusion, abrasive wear*

#### Sažetak

Cilj ovog rada je istražiti otpornost na abrazijsko trošenje legura nikla nanesenih postupkom naštrcavanja pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem. Za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje korišten je test "suhi pijesak/gumeni kotač" prema normi ASTM G65-94. Uspoređivana je otpornost na trošenje dvije vrste prevlaka: NiBSi i NiCrBSi u ovisnosti o udaljenosti plamenika prilikom naštrcavanja s trošenjem materijala podloge: alatni čelik za rad u toplom stanju, X38CrMoV5-1 (u žarenom i poboljšanom stanju) i konstrukcijski niskougljični čelik, S235JRG2.

#### Abstract

The aim of this paper is to investigate abrasive wear resistance of the Ni-based self-fluxing alloy coatings deposited by flame spraying with fusion. The "dry sand / rubber wheel" test according to ASTM G65-94 norm is used. Wear resistance of two types of coatings were compared: NiBSi and NiCrBSi, deposited by flame spraying with fusion, depending on the spraying distance with wear resistance of substrate materials: hot working tool steel, X38CrMoV5-1, heat treated X38CrMoV5-1 and low carbon structural steel, S235JRG2.

#### 1. Uvod

Legure nikla primjenjuju se u uvjetima gdje se zahtijeva dobra otpornost na trošenje, toplinu i koroziju te su prikladne za sve postupke toplinskog naštrcavanja: pomoću plinskog plamena, pomoću plinskog plamena velikim brzinama čestica, detonacijskim pištoljem, pomoću električnog luka, plazmom, pomoću plazma naštrcavanja s prenesenim lukom i laserom.

Zbog primjenjivosti postupka naštrcavanja pomoću plinskog plamena i legura nikla, u gotovo svim granama industrije, činjenica je da su prevlake od ovih legura izložene različitim uvjetima u eksploataciji. Proučavanjem preglednih radova [1, 2] za razdoblje od 2000. do 2013. godine, u kojima su sustavno prikazana istraživanja i znanstvene spoznaje i preglednih radova iz područja toplinskog naštrcavanja iz ranijeg [3], ali i kasnijeg razdoblja [4] te novijih bibliografskih referenci vezanih uz postupak naštrcavanja pomoću plinskog plamena ovih legura, došlo se do zaključka da istraživanja idu u smjeru ispitivanja otpornosti na različite vrste trošenja, koroziju te vanjska mehanička opterećenja.

Istraživanja otpornosti na abrazijsko trošenje su uglavnom izvedena abrazijskom između dva tijela, prema testu „valjčić po disku“ (eng. pin-on-disk) [5-10], „valjčić po ploči“ (eng. pin-on-flat) [11-13] i „valjčić po prstenu“ (eng. pin-on-block) testu [14] te abrazijskom između tri tijela prema testu „suhi pijesak/gumeni kotač“ (eng. dry sand/rubber wheel) prema ASTM G65 normi [11, 15-20] i testu „mokri pijesak/gumeni kotač“ (eng. wet sand/rubber wheel) [21] mijenjajući pri tome različite parametre: postupak toplinskog naštrcavanja, vrstu naknadne toplinske obrade, vrstu legura nikla, dodatak tvrdih čestica i rijetkih oksida, vrstu ispitivanja te parametre ispitivanja.

Cilj ovog rada je osim istraživanja otpornosti na abrazijsko trošenje dvije vrste prevlaka u ovisnosti o udaljenosti plamenika od radnog predmeta pri postupku naštrcavanja pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem, usporediti trošenje prevlaka s trošenjem materijala podloge.

## 2. Eksperimentalni dio

Na materijal podloge alatni čelik za X38CrMoV5-1, čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 1, postupkom naštrcavanja pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem nanosene su dvije vrste prevlaka – NiCrBSi i NiBSi, čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 2. Osim navedenog kemijskog sastava alatnog čelika X38CrMoV5-1 u tablici 1 je prikazan i kemijski sastav materijala podloge S275JR+AR.

Tablica 1 Kemijski sastav materijala podloge

Kemijski element, % mase	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Fe
X38CrMoV5-1	0,36	0,93	0,35	0,018	<0,001	4,74	0,37	1,00	0,19	0,27	ostatak
S275JR+AR	0,10	0,20	0,57	0,016	0,012	0,14	0,27	0,06	0,46	-	ostatak

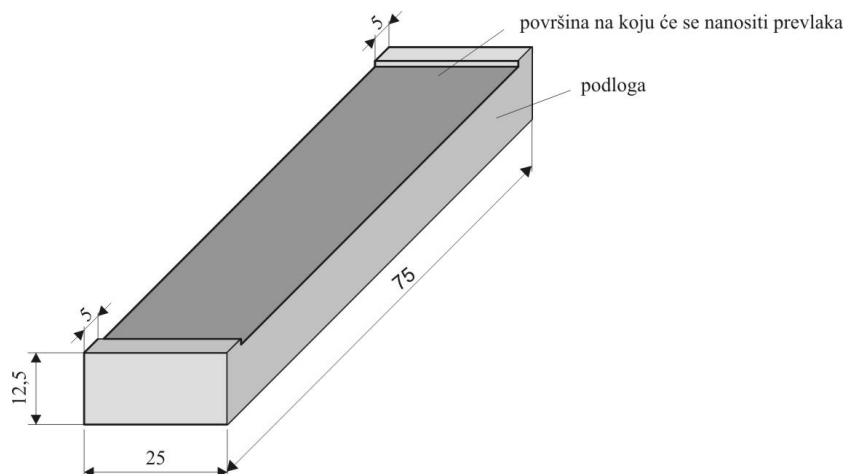
Tablica 2 Kemijski sastav praška za naštrcavanje

Kemijski element, % mase	C	Cr	Fe	B	Si	Ni
NiCrBSi (Eutalloy 10009, BoroTec)	0,7	15	3,5	3,2	4,4	ostatak
NiBSi (Eutalloy 10185, BronzoChrom)	0,1	0,5	0,5	2,5	3	ostatak

Na slici 1 prikazan je oblik i dimenzija uzorka prije postupka naštrcavanja. Na uzorku je izglođan utor, kako bi se nakon završne obrade brušenjem dobila konstantna debljina sloja 1mm.

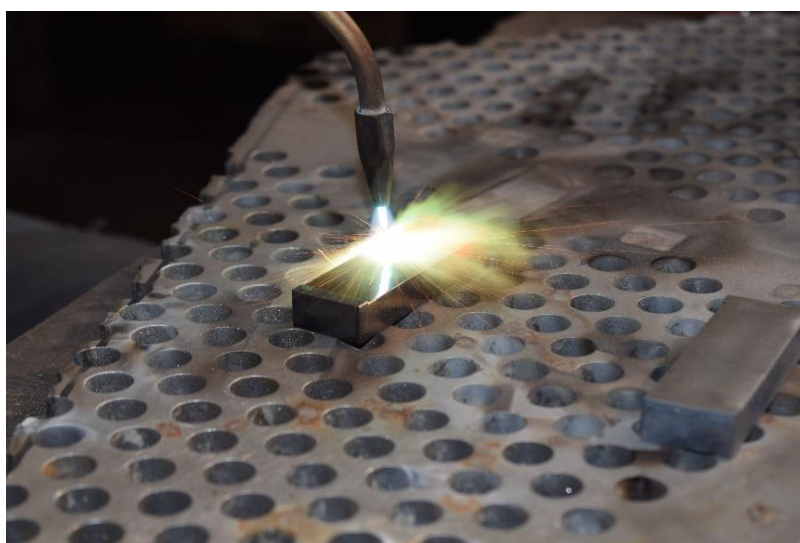
Prije postupka naštrcavanja potrebno je pripremiti podlogu kako bi se osiguralo što bolje prijanjanje nanosene prevlake. Postupak pripreme podloge sastoji se nekoliko koraka:

- odmašćivanje podloge etilnim alkoholom,
- ohrapvljivanje podloge brušenjem,
- predgrijavanje podloge na temperaturi oko 200 °C.



Slika 1 Oblik i dimenzije uzorka prije postupka naštrcavanja

Na slici 2 je prikazan postupak naštrcavanja pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem SuperJet-S-Euttaloy oksii-acetilenskim pištoljem, gdje se unutar pištolja miješa smjesa plinova (tlak acetilena 50 kPa i tlak kisika 200 kPa) i praška, te izlazi iz plamenika veličine B3 u obliku plamena koji se istovremeno staljuje s podlogom. Ovim postupkom stvara se metalurška veza između materijala prevlake i podloge zbog visoke temperature utaljivanja (1100 °C). Kako bi se postigla zahtijevana debljina prevlake od 1 mm, prevlaka je nanosena kroz osam prolaza. Uzorci su nakon naštrcavanja i hlađenja na zraku obrušeni kako bi se dobila glatka površina, debljine prevlake 1 mm, potrebna za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.

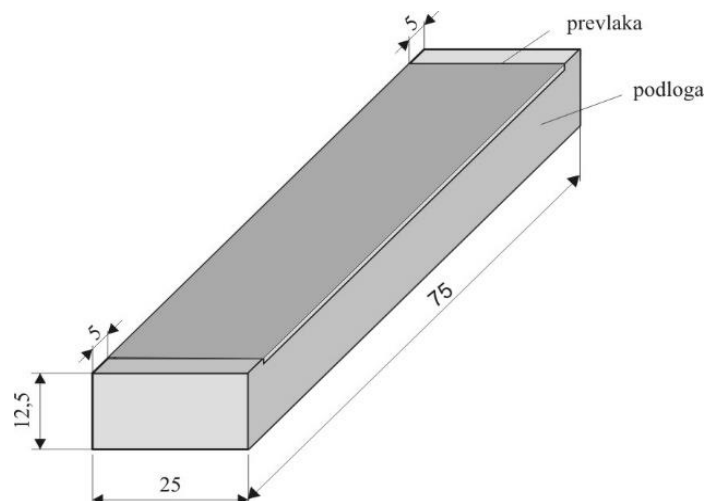


Slika 2 Postupak naštrcavanja pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem

## 2.1 Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je prema planu ispitivanja prikazanom u tablici 3.

Test „suhi pijesak/gumeni kotač“ se provodi prema ASTM G65-94 normi [22]. Ispitivanje se sastoji od abradiranja uzorka standardnih dimenzija 75×25×12,5 mm (slika 3) kvarcnim pijeskom Ottawa AFS 50/70, koji sadrži oko 99 % SiO<sub>2</sub>.



Slika 3 Oblik i dimenzije uzorka za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Tablica 3 Plan ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ prema ASTM G65-94 normi [22]

Vrsta materijala	Oznaka uzorka				Parametri ispitivanja
NiCrBSi prevlaka mala udaljenost plamenika	111	112	113		Varijanta postupka: B (sila 130 N i broj okretaja kotača 2000)
NiCrBSi prevlaka velika udaljenost plamenika	121	122	123		
NiBSi prevlaka mala udaljenost plamenika	131	132	133		
NiBSi prevlaka velika udaljenost plamenika	141	142	143		
Alatni čelik X238CrMoV5-1	1-1	1-2	1-3	1-4	Varijanta postupka: C (sila 130 N i broj okretaja kotača 100)
Alatni čelik X38CrMoV5-1 poboljšan	2-1	2-2	2-3	2-4	
Konstruktivski niskouglični čelik S275JR+AR	3-1	3-2	3-3	3-4	

Pijesak protječe kroz mlaznicu i dovodi se između uzorka i rotirajućeg kotača obloženog gumom tvrdoće 60 Shore A (slika 4). Uzorak je preko koljenaste poluge opterećen odgovarajućom silom, ovisno o varijanti postupka.



Slika 4 Detalj uređaja za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje – gumeni kotač – mlaznica – uzorak

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je prema B i C varijanti postupka (tablica 4). Postupci B i C su kratkotrajne varijante postupka A koji se primjenjuje za rangiranje materijala od srednje do jako visoke otpornosti, dok se varijanta D primjenjuje za materijale niske otpornosti na abrazijsko trošenje.

Tablica 4 Varijante postupaka prema ASTM G65-94 normi [22]

Varijanta postupka	A	B	C	D
Sila na uzorak, N	130	130	130	45
Broj okretaja kotača	6000	2000	100	6000
Relativni put, m	4309	1436	71,8	4309
Trajanje ispitivanja, min	30	10	0,5	30

### 3. Rezultati ispitivanja

Prije ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje, na obrušenim uzorcima izmjerene su tvrdoće na tvrdomjerima Electronic Brinell, tip HBE 3000 i Rockwell, tip KV-1, a rezultati su prikazani u tablici 5. U tablici je prikazana aritmetička sredina tvrdoća izračunata za tri ponovljena mjerenja na svakom uzorku.

Tablica 5 Rezultati mjerenja tvrdoće HRC (HV10) uzoraka

Vrsta materijala	Oznaka uzorka	Broj mjerenja			Aritmetička sredina
		1	2	3	
NiCrBSi prevlaka mala udaljenost plamenika	111	58,4	57	55,5	56,97
	112	55,8	57,1	58,5	57,13
	113	55,1	58,8	57,5	57,13

NiCrBSi prevlaka velika udaljenost plamenika	121	61,7	61,4	60,1	61,07
	122	61,2	56,9	60,3	59,47
	123	59,3	57,7	61,4	59,47
NiBSi prevlaka mala udaljenost plamenika	131	33,7	33,6	32,4	33,23
	132	32,7	33,4	32,2	32,77
	133	35,6	31,6	32,2	33,13
NiBSi prevlaka velika udaljenost plamenika	141	29,4	31,2	28,3	29,63
	142	30,5	30,6	29	30,03
	143	30,9	29,5	31	30,47
Alatni čelik X238CrMoV5-1	1-1	194,6	196,5	187,2	(192,77)
	1-2	189,2	190,7	190,7	(190,20)
	1-3	199,8	186,7	201,3	(195,93)
	1-4	196,4	187,3	192,9	(192,20)

Tablica 6 Rezultati mjerenja tvrdoće HRC (HV10) uzoraka - nastavak

Vrsta materijala	Oznaka uzorka	Broj mjerenja			Aritmetička sredina
		1	2	3	
Alatni čelik X238CrMoV5-1 poboljššan	2-1	51,6	54,3	53,2	53,03
	2-2	52,1	53,3	53,2	52,87
	2-3	51,8	52,7	53,3	52,60
	2-4	53	54,1	52,5	53,20
Konstrukcijski niskougljični čelik S275JR+AR	3-1	128,8	130,6	128,9	(129,43)
	3-2	146,6	130,9	152,1	(143,20)
	3-3	136,8	142,5	142,9	(140,73)
	3-4	146,4	139,5	132,8	(139,57)

Nakon brušenja gornje površine naštrcanih uzoraka i mjerenja tvrdoće, uzorci su ispitani testom „suhi pijesak/gumeni kotač“. Zatim su uzorci vagani na analitičkoj vagi METTLER B5C 1000, točnosti  $10^{-4}$  g (slika 5).

Vaganjem uzoraka prije i nakon ispitivanja određen je gubitak mase prema izrazu (1):

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (1)$$

gdje je:

$\Delta m$  – gubitak mase, g

$m_1$  – masa uzorka prije ispitivanja, g

$m_2$  – masa uzorka nakon ispitivanja, g.



Slika 5 Analitička vaga METLLER B5C 1000

Prema ASTM G65-94 normi, gubitak mase preračunava se u gubitak volumena, na osnovi izraza (2):

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \cdot 1000 \quad (2)$$

gdje je:

$\Delta V$  – gubitak volumena, mm<sup>3</sup>

$\Delta m$  – gubitak mase, g

$\rho$  – gustoća, g/cm<sup>3</sup>.

U tablici 6 su prikazani rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za C varijantu postupka (100 okretaja kotača), gdje je vrijednost gubitka mase izračunata prema izrazu (1) za svaki uzorak preračunata u gubitak volumena prema izrazu (2), pomoću podataka o gustoći prevlaka, uzetih iz kataloga proizvođača ovih legura [24].

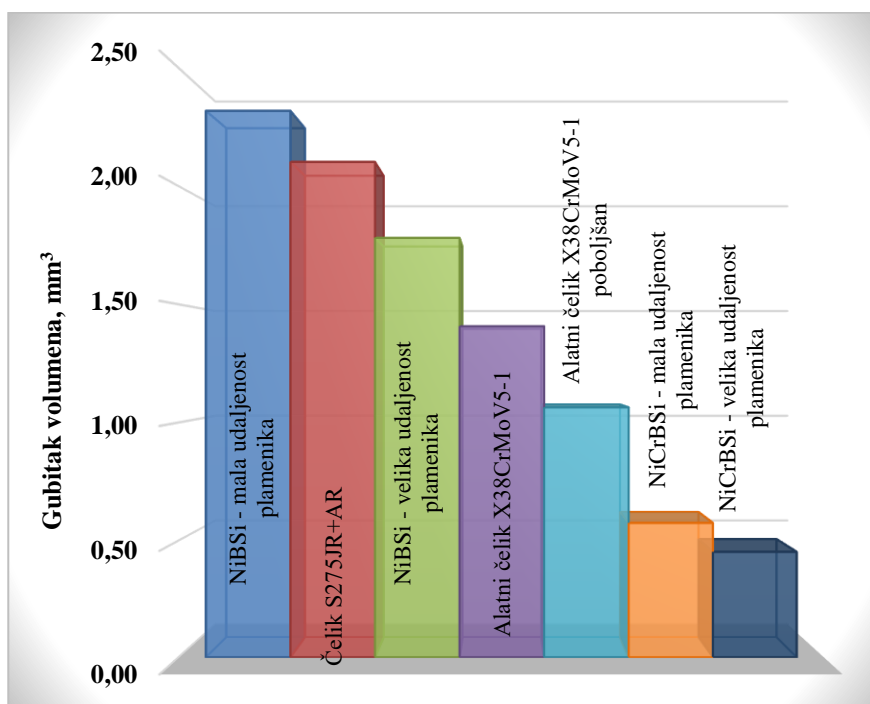
Na slici 6 je dan dijagramski prikaz rezultata ispitivanja gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja za C varijantu postupka (100 okretaja kotača), gdje su uspoređeni rezultati abrazijskog trošenja NiCrBSi i NiBSi prevlaka s rezultatima trošenja materijala podloge.

Tablica 7 Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za C varijantu postupka (100 okretaja kotača)

Oznaka uzorka	$m_1$ , g	$m_2$ , g	$\Delta m_{100}$ , g	$\Delta V_{100}$ , mm <sup>3</sup>	Aritmetička sredina, $\Delta V_{100}$ , mm <sup>3</sup>
111	180,3015	180,2965	0,0050	0,6394	0,5754
112	179,4515	179,4469	0,0046	0,5882	
113	179,5083	179,5044	0,0039	0,4987	
121	180,8265	180,8225	0,0040	0,5115	0,4518
122	179,6041	179,6005	0,0036	0,4604	
123	180,7429	180,7399	0,0030	0,3836	

131	180,3595	180,3425	0,0170	2,1574	2,3181
132	180,2445	180,2263	0,0182	2,3096	
133	180,2019	180,1823	0,0196	2,4873	
141	179,7213	179,7075	0,0138	1,7513	1,7809
142	180,1899	180,1762	0,0137	1,7386	
143	180,0339	180,0193	0,0146	1,8528	
1-1	170,5663	170,5545	0,0118	1,5128	1,4071
1-2	170,5258	170,5165	0,0093	1,1923	
1-3	182,0571	182,0459	0,0112	1,4359	
1-4	182,0925	182,0809	0,0116	1,4872	
2-1	171,7220	171,7125	0,0095	1,2179	1,0641
2-2	170,2692	170,2615	0,0077	0,9872	
2-3	181,9825	181,9755	0,007	0,8974	
2-4	181,8885	181,8795	0,009	1,1538	
3-1	183,3295	183,3130	0,0165	2,0990	2,1021
3-2	183,3215	183,3064	0,0151	1,9209	
3-3	183,3065	183,2905	0,016	2,0354	
3-4	183,3425	183,3240	0,0185	2,3534	

Iz dijagramskog prikaza vidljivo je da najveću otpornost na abrazijsko trošenje nakon 100 okretaja kotača, tj. najmanji gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja, pokazuje NiCrBSi prevlaka naštrcana uz veću udaljenost plamenika od uzorka, u odnosu na materijale podloge te NiBSi prevlaku. U tablici 7 su prikazani rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za B varijantu postupka (2000 okretaja kotača), gdje je vrijednost gubitka mase za svaki uzorak preračunata u gubitak volumena, primjenom izraza (2) i gustoće naštrcane prevlake ( $\rho_{\text{NiCrBSi}}=7,82 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\text{NiBSi}}=7,88 \text{ g/cm}^3$ ).



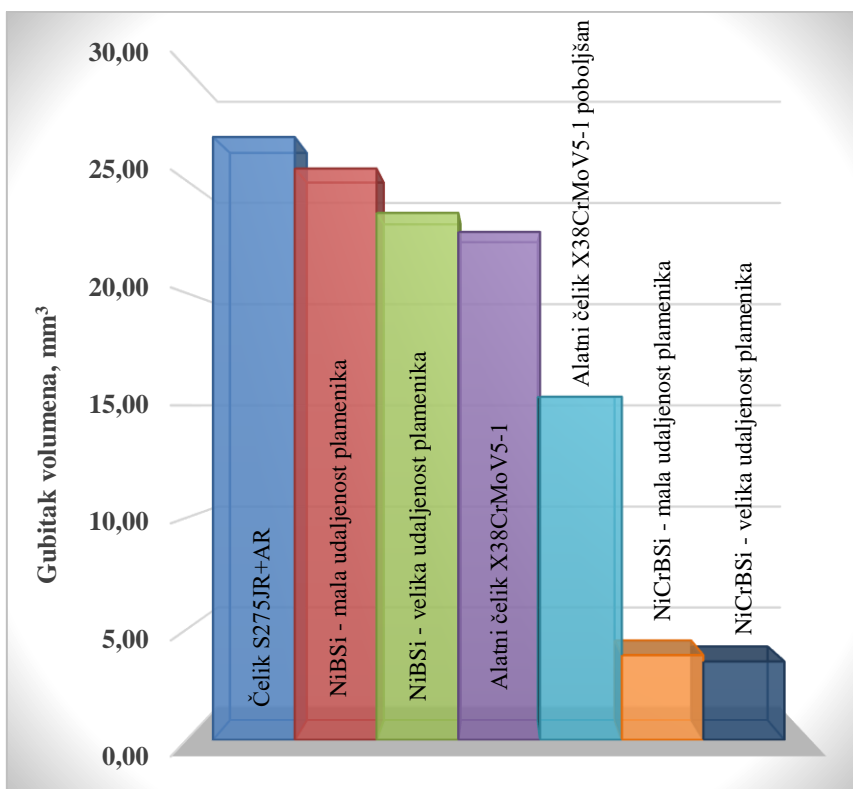
Slika 6 Dijagramski prikaz gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja za C varijantu postupka (100 okretaja kotača)



Tablica 8 Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za B varijantu postupka (2000 okretaja kotača)

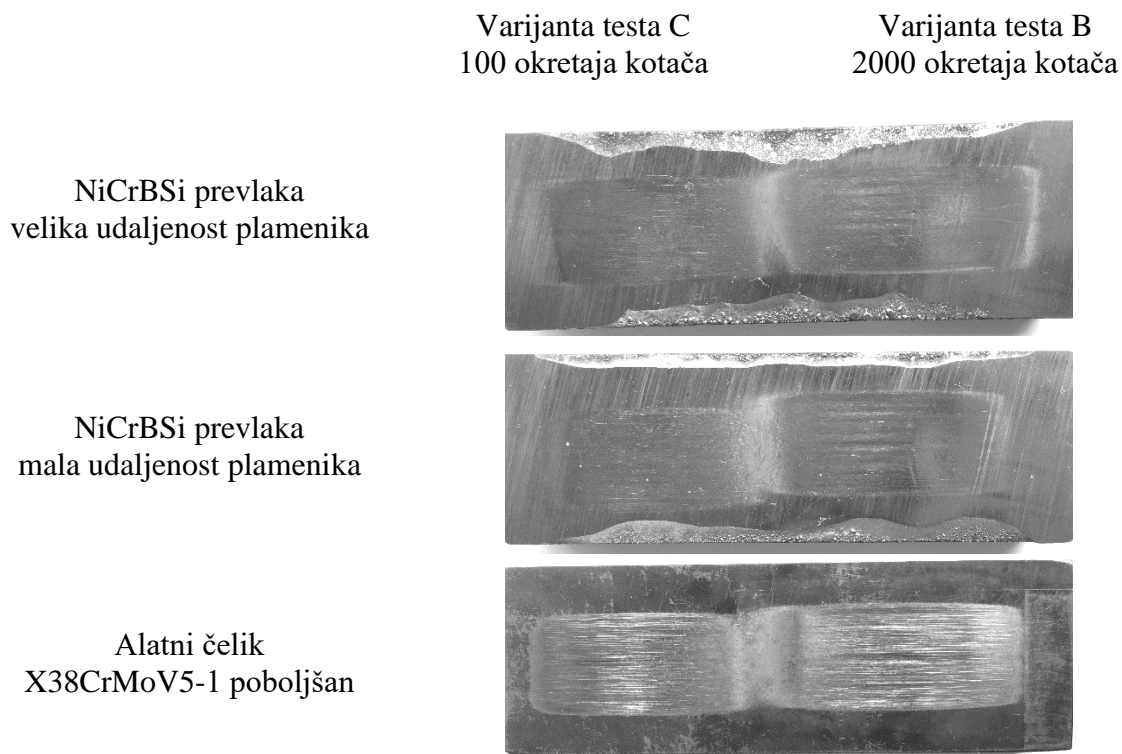
Oznaka uzorka	$m_1$ , g	$m_2$ , g	$\Delta m_{2000}$ , g	$\Delta V_{2000}$ , mm <sup>3</sup>	Aritmetička sredina $\Delta V_{2000}$ , mm <sup>3</sup>
111	180,3015	180,2695	0,0320	4,0921	3,8363
112	179,4515	179,4245	0,0270	3,4527	
113	179,5083	179,4773	0,0310	3,9642	
121	180,8265	180,8028	0,0237	3,0307	3,5507
122	179,6041	179,5729	0,0312	3,9898	
123	180,7429	180,7145	0,0284	3,6317	
131	180,3595	180,1415	0,2180	27,6650	25,5415
132	180,2445	180,0495	0,1950	24,7462	
133	180,2019	180,0111	0,1908	24,2132	
141	179,7213	179,5209	0,2004	25,4315	23,5660
142	180,1899	180,0135	0,1764	22,3858	
143	180,0339	179,8536	0,1803	22,8807	
1-1	170,5663	170,3862	0,1801	23,0897	22,7179
1-2	170,5258	170,3613	0,1645	21,0897	
1-3	182,0571	181,8772	0,1799	23,0641	
1-4	182,0925	181,9082	0,1843	23,6282	
2-1	171,7220	171,6021	0,1199	15,3718	15,3878
2-2	170,2692	170,1489	0,1203	15,4231	
2-3	181,9825	181,8632	0,1193	15,2949	
2-4	181,8885	181,7679	0,1206	15,4615	
3-1	183,3295	183,1190	0,2105	26,7778	26,9431
3-2	183,3215	183,1186	0,2029	25,8110	
3-3	183,3065	183,0972	0,2093	26,6251	
3-4	183,3425	183,1180	0,2245	28,5587	

Kao i za varijantu C, na slici je dan dijagramski prikaz rezultata ispitivanja gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja za B varijantu postupka (2000 okretaja kotača). Vidljivo je da, i za povećani broj okretaja kotača, najveću otpornost na abrazijsko trošenje tj. najmanji gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja, ima NiCrBSi prevlaka naštrcana uz veću udaljenost plamenika od uzorka.



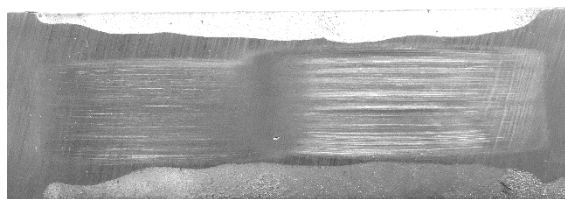
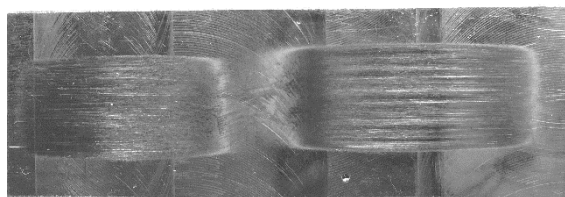
Slika 7 Dijagramski prikaz gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja za B varijantu postupka (2000 okretaja kotača)

Na slici 8 su prikazani usporedni tragovi trošenja za sve četiri kombinacije razina faktora i materijale podloge nakon 100 i 2000 okretaja kotača.

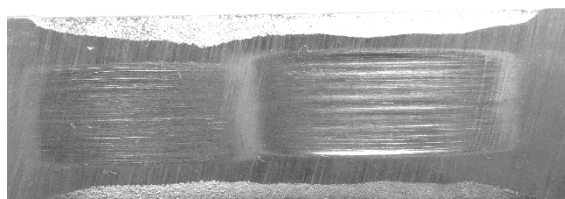


Alatni čelik  
X38CrMoV5-1

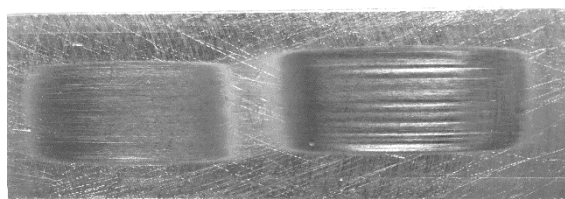
NiBSi prevlaka  
velika udaljenost plamenika



NiBSi prevlaka  
mala udaljenost plamenika



Čelik S275JR+AR



Slika 8. Usporedba tragova trošenja

#### 4. Zaključak

Usporedbom gubitka volumena prevlaka te materijala podloga, pri kraćem (tablica 6, slika 6) i duljem trošenju (tablica 7, slika 7), može se zaključiti da za obje varijante ispitivanja, NiCrBSi prevlaka naštrcana uz veću udaljenost plamenika od uzorka ima najmanji gubitak volumena (uz najveću prosječnu tvrdoću od 60 HRC), a zatim slijedi ista vrsta prevlake, ali naštrcana uz manju udaljenost plamenika od uzorka, prosječne tvrdoće 57 HRC. Materijal podloge - poboljšani alatni čelik X38CrMoV5-1 se, za obje varijante, nalazi na trećem mjestu i prema gubitku volumena i prosječnoj tvrdoći koja iznosi 53 HRC. Na četvrtom mjestu, po prosječnoj tvrdoći, koja iznosi 33 HRC, se nalazi prevlaka NiBSi naštrcana uz manju udaljenost plamenika od uzorka. Međutim, za razliku od NiCrBSi prevlaka i poboljšanog alatnog čelika X38CrMoV5-1, ovoj tvrdoći ne odgovara i isto mjesto po gubitku volumena; suprotno, gubitak volumena je za 100 okretaja kotača najveći (7. mjesto), dok se za 2000 okretaja kotača, ovaj materijal nalazi na 6. mjestu. Primijećeno je slično ponašanje kao za materijal podloge - čelik S275JR+AR, koji ima najnižu prosječnu tvrdoću 140 HV10. Manji gubitak volumena od ove tri vrste materijala (NiBSi prevlaka i čelik S275JR+AR) ima materijal podloge - alatni čelik X38CrMoV5-1 u dostavnom stanju (meko žareno) iako ima nižu prosječnu tvrdoću 193 HV10 od NiBSi prevlaka naštrcanih i uz manju (prosječna tvrdoća 33 HRC) i veću udaljenost plamenika (prosječna tvrdoća 30 HRC). To se može protumačiti prisutnošću karbida u strukturi alatnoga čelika, što je još izraženije za poboljšano stanje ovoga materijala. Prisutnost karbida, ali i borida i silicida je izražena u NiCrBSi prevlakama [23], što je i uzrokovalo manji gubitak volumena. Prema [24], značajnu ulogu za smanjenje abrazivskog trošenja, mogu imati kromovi karbidi, jer je njihova tvrdoća (oko 1400 HV), veća i od tvrdoće kvarca (1200 HV), kao najzastupljenijeg abraziva u prirodi. U naprijed navedenim materijalima prevlaka odnosno podloge, u ovome istraživanju, koji imaju najmanji gubitak volumena (NiCrBSi prevlake naštrcane i uz manju

i veću udaljenost plamenika te alatni čelik X38CrMoV51 u poboljšanom i dostavnom stanju), prisutni su kromovi karbidi.

Iz slike 8 je vidljivo da su pri 100 okretaja kotača najdublji tragovi trošenja kod NiBSi prevlake naštrcane uz malu udaljenost plamenika, dok su površinski tragovi trošenja prisutni kod NiCrBSi prevlake naštrcane uz veliku udaljenost plamenika. Pri 2000 okretaja kotača najdublji tragovi trošenja su kod materijala podloge, čelik S275JR +AR, što je u korelaciji s dobivenim rezultatima ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje (tablica 6 i 7), (slika 6 i 7).

Trošenje je jedan od najčešćih oblika oštećivanja mehaničkih dijelova i istraživanje trošenja može značajno doprinijeti saznanjima o ponašanju dijelova u eksploataciji.

## 5. Literatura

- [1] Šimunović, K.; Šarić, T.; Šimunović, G. Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings-A Review. Part 1: General Facts, Wear and Corrosion Investigations. // Tribology Transactions. 57 (2014), 6; 955-979.
- [2] Šimunović, K.; Šarić, T.; Šimunović, G. Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings -A Review. Part 2: Microstructure, Adhesive Strength, Cracking Behavior, and Residual Stresses Investigations. // Tribology Transactions. 57 (2014), 6; 980-1000.
- [3] Fauchais, P.; Vardelle, A.; Dussoubs, B. Quo Vadis Thermal Spraying? // Journal of Thermal Spray Technology. 10 (2001), 1; 44-66.
- [4] Vardelle, A.; Moreau C.; Akedo J.; Ashrafizadeh, H.; Berndt, C. C.; Oberste Berghaus J.; Boulos, M.; Brogan J.; Bourtsalas, C. A.; Dolatabadi, A.; Dorfman, M.; Eden, J. T.; Fauchais, P.; Fisher, G.; Gaertner, F.; Gindrat, M.; Henne, R.; Hyland, M.; Irissou, E.; Jordan, H. E.; Khor Khiam, A.; Killinger, A.; Lau, Y. C.; Li, C. L.; Li, L.; Longtin, J.; Markocsan, N.; Masset, J. P.; Matejicek, J.; Mauer, G.; McDonald, A.; Mostaghimi, J.; Sampath, S.; Schiller, G.; Shinoda, K.; Smith, F. M.; Ansar Syed, A.; Themelis, J. N.; Toma, F. L.; Trelles, J. P.; Vassen, R.; Vuoristo, P. // The 2016 Thermal Spray Roadmap, Journal of Thermal Spray Technology. 25 (2016), 8; 1376-1440.
- [5] Sharma, S. P.; Dwivedi, D. K.; Jain, P. K. Abrasive Wear Behaviour of Continuously Compacted Thermal-Sprayed Ni Base Alloy Powder Coatings in Different Conditions. // International Journal of Surface Science and Engineering. 2 (2008), 3-4; 240-251.
- [6] Sharma, S. P.; Dwivedi, D. K.; Jain, P. K. Effect of CeO<sub>2</sub> Addition on the Microstructure, Hardness, and Abrasive Wear Behaviour of Flame-Sprayed Ni-Based Coatings. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology. 222 (2008), 7; 925-933.
- [7] Sharma, S. Abrasive Wear Study of NiCrFeSiB Flame Sprayed Coating. // Journal of the Institution of Engineers India Ser. D. 94 (2013-2014), 2; 75-80.
- [8] Sharma, S. Abrasive Wear Study of Rare Earth Modified Coatings by Statistical Method. // Journal of Thermal Spray Technolgy. 21 (2012), 5; 773-781.
- [9] Wu, P.; Zhou, C. Z.; Tang, X. N. Microstructural Characterization and Wear Behavior of Laser Cladded Nickel-Based and Tungsten Carbide Composite Coatings. // Surface & Coatings Technology. 166 (2003), 1; 84-88.
- [10] Sharma, S. P.; Dwivedi, D. K.; Jain, P. K. Effect of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Addition on the Microstructure, Hardness and Abrasive Wear Behavior of Flame Sprayed Ni Based Coatings. // Wear. 267 (2009), 5-8; 853-859.
- [11] Leech, P. W.; Li, X. S.; Alam, N. Comparison of Abrasive Wear of a Complex High Alloy Hardfacing Deposit and WC-Ni Based Metal Matrix Composite. // Wear, 294-295 (2012); 380-386.
- [12] Harsha, S.; Dwivedi, D. K.; Agarwal, A. Performance of Flame Sprayed Ni-WC Coating under Abrasive Wear Conditions. // Journal of Materials Engineering and Performance. 17 (2008), 1; 104-110.
- [13] Dhakar, B. M.; Dwivedi D. K.; Sharma, S. P. Studies on Remelting of Tungsten Carbide and Rare Earth Modified Nickel Base Alloy Composite Coating. // Surface Engineering. 28 (2012), 1; 73-80.

- [14] Harsha, S.; Dwivedi, D. K.; Agarwal, A. Influence of CrC Addition in Ni-Cr-Si-B Flame Sprayed Coatings on Microstructure, Microhardness and Wear Behaviour. // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 38 (2008), 1-2; 93-101.
- [15] Kim, H.-J.; Hwang, S.-Y.; Lee, C.-H.; Juvanon, P. Assessment of Wear Performance of Flame Sprayed and Fused Ni-Based Coatings. // *Surface & Coatings Technology*. 172 (2003), 2-3; 262-269.
- [16] Sue, A.; Sreshta, H.; Qiu, B. H. Improved Hardfacing for Drill Bits and Drilling Tools. // *Journal of Thermal Spray Technology*. 20 (2011), 1-2; 372-377.
- [17] Hejwowski, T.; Szewczyk, S.; Weronki, A. An Investigation of the Abrasive and Erosive Wear of Flame-Sprayed Coatings. // *Journal of Materials Processing Technology*. 106 (2000), 1-3; 54-57.
- [18] Klimpel, A.; Dobrzanski, L. A.; Lisiecki, A.; Janicki, D. The Study of Properties of Ni-W<sub>2</sub>C and Co-W<sub>2</sub>C Powders Thermal Sprayed Deposits. // *Journal of Materials Processing Technology*. 164 (2005); 1068-1073.
- [19] Miranda, J. C.; Ramalho, A. Abrasion Resistance of Thermal Sprayed Composite Coatings with a Nickel Alloy Matrix and a WC Hard Phase. Effect of Deposition Technique and Re-Melting. // *Tribology Letters*. 11 (2001), 1; 37-48.
- [20] Simunovic, K.; Grilec, K.; Simunovic, G. Abrazijska otpornost NiCr i NiCrWC prevlaka (Abrasion Resistance of NiCr and NiCrWC coatings). // *Proceedings of the 1st DAAAM International Conference "Advanced Technologies for Developing Countries"*, Slavonski Brod, Croatia, September 2002. DAAAM International Vienna, 239-244.
- [21] Wang, Q.; Chen, Z. H.; Ding, Z. X.; Chen, D. Abrasive Wear Behavior of WC Reinforced Ni-Based Composite Coating Sprayed and Fused by Oxy-Acetylene Flame. // *Surface Review and Letters*. 16 (2009), 3; 475-485.
- [22] ASTM G65-94, Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus, in *Annual Book of ASTM Standards*, 3.02 (1995), 232.
- [23] Simunovic, K.; Slokar, Lj.; Havrlisan, S. SEM/EDS investigation of one-step flame sprayed and fused Ni-based self-fluxing alloy coatings on steel substrates. // *Philosophical magazine*. 97 (2017), 4; 246-268.
- [24] Ivušić, V. *Tribologija*. // *Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju*, (1998), 71.