

ANALIZA VARIJANCE GUBITKA VOLUMENA USLIJED ABRAZIJSKOG TROŠENJA

ANALYSIS OF VARIANCE OF THE VOLUME LOSS DUE TO ABRASION WEAR

Sara Havrlišan¹, Katica Šimunović¹, Tomislav Šarić¹, Ilija Svalina¹, Dražen Turinski¹, Roberto Lujčić¹, Goran Šimunović¹, Branko Štrbac²

¹ Sveučilište u Slavanskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Trg I. Brlić Mažuranić 2, Slavonski Brod, Hrvatska

² Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija

Ključne riječi: abrazijsko trošenje, analiza varijance, planirani pokusi, statistička analiza

Key words: abrasive wear, analysis of variance, design of experiment, statistical analysis

Sažetak: Cilj ovog rada je primjenom analize varijance istražiti utjecaj ulaznih parametara - faktora (vrsta prevlake i udaljenost plamenika od radnog predmeta pri postupku naštrcavanja pomoću plinskog plamena) i interakcija na odziv (gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja). Za istraživanje otpornosti prevlaka na abrazijsko trošenje primijenjen je faktorski plan pokusa, s istovremenim mijenjanjem dva prethodno navedena faktora na dvije razine uz tri ponavljanja kombinacija razina faktora. Pri ispitivanju otpornosti prevlaka primijenjena je normirana metoda "suhi pijesak/gumeni kotač" i to za kraće i dulje vrijeme trošenja. Na osnovi statističke analize dobivenih podataka može se zaključiti da vrsta prevlake kao i udaljenost plamenika od radnog predmeta pri postupku naštrcavanja imaju značajan utjecaj na gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja pri kraćem vremenu trošenju, dok je pri duljem vremenu trošenja jedino značajan faktor vrsta prevlake.

Abstract: The aim of this paper is to apply analysis of variance for the investigation of the influence of input parameters - factors (type of coating and spraying distance from the workpiece during the deposition) and interactions on the response (volume loss due to abrasion wear). To investigate the resistance of coatings to abrasion wear, a factorial design of experiment was applied, with simultaneous change of the two previously mentioned factors to two levels with three repetitions of factor level combinations. The standardized method "dry sand / rubber wheel" was applied for testing the resistance of coatings for shorter and longer wear times. Based on statistical analysis of the obtained data, it can be concluded that the type of coating and spraying distance from the workpiece during the deposition have a significant impact on volume loss due to abrasion wear at shorter wear time, while at longer wear time type of coating is the only significant factor.

1 UVOD

Primjena planiranih pokusa značajna je u svim područjima ljudskog djelovanja te tako i u području toplinskog naštrcavanja i ostalih postupaka prevlačenja [1-3]. S obzirom da se legure NiCrBSi često primjenjuju za zaštitu od trošenja, dosta autora je u svojim radovima istraživalo različite vrste trošenja, gdje je odziv bio gubitak mase ili volumena ili brzina trošenja, a ulazne varijable su bile parametri postupka naštrcavanja, parametri ispitivanja (često su mijenjani opterećenje i temperatura ispitivanja) te karakteristike prevlake.

Opterećenje, temperatura ispitivanja, prisutnost WC u NiCrBSi prašku te vrsta tehnike toplinskog naštrcavanja su mijenjani na dvije razine u istraživanju autora [4] prilikom primjene kliznog testa trošenja "valjčić po ploči" za prevlake od legura nikla naštrcane pomoću plazme i plinskog plamena s utaljivanjem. Ispitane su sve kombinacije razina faktora, odnosno primijenjen je potpuni faktorski plan pokusa s odzivom - gubitak mase prevlaka, ali i gubitak mase kliznog elementa nakon ispitivanja kliznog trošenja.

Istraživanje kliznog trošenja tipa "valjčić po ploči" prevlaka od legura nikla nanesenih laserom i zatim naknadno obrađenih laserom su proveli autori [5] primjenjujući dva seta planiranih pokusa. U prvom pokusu, na tri razine mijenjani su: omjer između površine pokrivene mikrorupicama i cijele površine i geometrijski faktor - omjer između promjera i dubine mikrorupice s ciljem određivanja Stribeck krivulja. U drugom pokusu, umjesto prvog, gore navedenog, faktora određen je faktor udaljenost među mikrorupicama na tri razine te je kombiniran s faktorom promjer mikrorupica (jer je dokazano da dubina ovisi o promjeru), isto na tri razine. Promatran je utjecaj na promjenu koeficijenta trenja s ciljem određivanja minimalnog. U ovom radu je pokazano da su pokusi iterativni proces [6] u kojem se iz prethodnih pokusa zaključuje te se planiraju sljedeći pokusi.

Ovisnost odziva (gubitak mase) za plazma naštrcane s prenesenim lukom legure nikla, kod suhog kliznog trošenja, o tvrdoći prevlake (ovisne o naknadnoj toplinskoj obradi), temperaturi ispitivanja i prijednom putu klizanja, dobivena je

u radu [7], primjenjujući faktorski plan pokusa s tri faktora na tri razine. Zaključeno je da je značajan faktor temperatura ispitivanja.

Otpornost na klizno trošenje i koroziju za tri vrste HVOF naštrcanih prevlaka (NiCrBSi, WC-12%Co i Cr₃C₂-25%NiCr) su istraživali autori [8]. Za istraživanje kliznog trošenja tipa "valjčić po disku", proveli su faktorski plan pokusa mijenjajući dva faktora (opterećenje i temperaturu) na dvije razine, dok je treći faktor (prijeđeni put klizanja) mijenjan na pet razina.

U radu [9], ispitan je utjecaj četiri ulazne varijable na dvije razine - opterećenje, udio tvrdih WC čestica u prevlaci, veličina abrazivskih ispitnih čestica i medij (suho i ispitivanje u vodi) na gubitak mase uslijed abrazivskog trošenja. Dokazano je da veličina abrazivskih ispitnih čestica i prisutnost tvrdih čestica u prevlaci od legure nikla dobivenom plazma postupkom i utaljenom imaju značajan utjecaj na abrazivsko trošenje.

Ispitivanje otpornosti na abrazivsko trošenje ("valjčić po disku") HVOF naštrcanih prevlaka od legura nikla s dodatkom WC i CeO₂ je provedeno u radu [10]. Autor je mijenjao četiri faktora na tri razine (veličina abraziva, opterećenje, temperatura, prijeđeni put klizanja), s ciljem dobivanja značajnih faktora na odziv, prosječni gubitak mase. Sličan pristup primijenjen je u radu istoga autora [11], gdje su proučavane prevlake od legura nikla naštrcane pomoću plinskog plamena s dodatkom CeO₂ i La₂O₃, uz mijenjanje četiri faktora (veličina abraziva, opterećenje, temperatura, brzina klizanja) na tri razine.

Cilj ovog rada je primjenom planiranih pokusa te statističkom analizom podataka (analiza varijance) istražiti utjecaj vrste prevlake i udaljenost plamenika od radnog predmeta pri postupku naštrcavanja pomoću plinskog plamena i interakcija na gubitak volumena uslijed abrazivskog trošenja pri kraćem i duljem vremenu trošenja.

2 EKSPERIMENTALNI DIO

Za istraživanje otpornosti prevlaka na abrazivsko trošenje primijenjen je faktorski plan pokusa, s istovremenim mijenjanjem dva faktora na dvije razine uz tri ponavljanja kombinacija razina faktora.

Ulazne varijable ili faktori mijenjani na dvije razine su: vrsta legure nikla iz iste skupine - NiCrBSi i NiBSi te udaljenost plamenika od uzorka pri postupku naštrcavanja - mala (6 mm) i velika (20 mm).

Izlazna varijabla tj. odziv je gubitak volumena uslijed abrazivskog trošenja određen normiranom metodom "suhi pijesak/gumeni kotač", nakon 100 i 2000 okretaja kotača uređaja za ispitivanje (kraće i dulje vrijeme trošenja).

S obzirom na višu tvrdoću koju proizvođač Castolin navodi za NiCrBSi prevlaku [12], u odnosu na NiBSi prevlaku (koja isto nije preniska, do 42 HRC [12]), očekuje se bolja otpornost NiCrBSi prevlake na abrazivsko trošenje. Međutim, kako je uključena i ulazna varijabla udaljenost plamenika pri postupku naštrcavanja, cilj je provjeriti postoji li značajan utjecaj ove varijable te interakcija između vrste prevlake i udaljenosti plamenika.

Ispitivanje otpornosti na abrazivsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu te je primijenjen test "suhi pijesak/gumeni kotač" koji se provodi prema ASTM G65-94 normi [13]. Ova metoda ispitivanja otpornosti na abrazivsko trošenje je često primjenjivana [14-18], no navedeni autori u svojim istraživanjima nisu mijenjali udaljenost plamenika od radnog predmeta pri postupku naštrcavanja.

Ispitivanje otpornosti na abrazivsko trošenje provedeno je za dulje i kraće vrijeme trošenja, odnosno prema B (2000 okretaja kotača) i C (100 okretaja kotača) varijanti postupka.

3 REZULTATI ISPITIVANJA

Nakon brušenja gornje površine naštrcanih uzoraka, uzorci su ispitani testom "suhi pijesak/gumeni kotač" te su zatim vagani na analitičkoj vagi METTLER B5C 1000, točnosti 10⁻⁴ g. Vaganjem uzoraka prije i nakon ispitivanja određen je gubitak mase, no prema ASTM G65-94 normi [13], gubitak mase preračunava se u gubitak volumena.

U tablici 1 su prikazani rezultati ispitivanja otpornosti na abrazivsko trošenje za kraće vrijeme trošenja, C varijanta postupka (100 okretaja kotača) [2, 19].

Tablica 1. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazivsko trošenje za C varijantu postupka (100 okretaja kotača)

| Vrsta materijala | $\Delta V_{100} / \text{mm}^3$ |
|--|--------------------------------|
| NiCrBSi prevlaka mala udaljenost plamenika | 0,4987 |
| | 0,5882 |
| | 0,6394 |
| NiCrBSi prevlaka velika udaljenost plamenika | 0,3836 |
| | 0,5115 |
| | 0,4604 |
| NiBSi prevlaka mala udaljenost plamenika | 2,1574 |
| | 2,4873 |
| | 2,3096 |
| NiBSi prevlaka velika udaljenost plamenika | 1,7386 |
| | 1,7513 |
| | 1,8528 |

U tablici 2 su prikazani rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za dulje vrijeme trošenja, B varijanta postupka (2000 okretaja kotača) [2, 19].

Tablica 2. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za B varijantu postupka (2000 okretaja kotača)

| Vrsta materijala | $\Delta V_{2000} / \text{mm}^3$ |
|--|---------------------------------|
| NiCrBSi prevlaka mala udaljenost plamenika | 3,4527 |
| | 3,9642 |
| | 4,0921 |
| NiCrBSi prevlaka velika udaljenost plamenika | 3,9898 |
| | 3,0307 |
| | 3,6317 |
| NiBSi prevlaka mala udaljenost plamenika | 24,2131 |
| | 24,7462 |
| | 27,6650 |
| NiBSi prevlaka velika udaljenost plamenika | 25,4315 |
| | 22,3858 |
| | 22,8807 |

U nastavku slijedi statistička analiza podataka za gubitak volumena prevlaka, kako bi se utvrdilo utječe li udaljenost plamenika pri postupku naštrcavanja na gubitak volumena.

4 STATISTIČKA ANALIZA PODATAKA

Za statističku analizu podataka i redosljed izvođenja pokusa korišten je licencirani softver *Design Expert* kao i za analizu podataka. Eksperimentalni podatci su statistički analizirani pomoću modela efekata, odnosno aritmetičkih sredina, očekivanja (modeli analize varijance) s ciljem određivanja utjecaja (efekata) ulaznih varijabli (vrsta prevlake i udaljenost plamenika od radnog predmeta pri postupku naštrcavanja pomoću plinskog plamena) i interakcija na odziv (gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja).

4.1 Statistička analiza podataka za abrazijsko trošenje prema C varijanti postupka

Zbog načela randomizacije, uzorci nisu bili ispitivani pravilnim redosljedom prema konvencionalnom rasporedu za faktorski plan pokusa, stupac 1, tablica 3, nego prema potpuno slučajnom rasporedu generiranom u softveru (stupac 2, tablica 3). Time je uvažena i polazna pretpostavka za model analize varijance. Tako je, na primjer, kombinacija NiCrBSi - mala udaljenost (prva po konvencionalnom rasporedu za faktorski plan pokusa), bila šesta po redu na ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje. U tablici 3 su, osim konvencionalnog i slučajnog rasporeda uzoraka, prikazani dobiveni rezultati gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja za prevlake (prikazani ranije u tablici 1), za C varijantu postupka (100 okretaja kotača).

Tablica 3. Plan pokusa, redosljed izvođenja pokusa i odziv - gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja prema C varijanti postupka (100 okretaja kotača)

| Konvencionalni raspored | Broj pokusa | Faktor A, Vrsta prevlake | Faktor B, Udaljenost plamenika | Odziv, Gubitak volumena, $\Delta V_{100} / \text{mm}^3$ |
|-------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------------|---|
| 1 | 6 | NiCrBSi | mala | 0,4987 |
| 2 | 10 | NiCrBSi | mala | 0,5882 |
| 3 | 1 | NiCrBSi | mala | 0,6394 |
| 4 | 4 | NiBSi | mala | 2,1574 |
| 5 | 9 | NiBSi | mala | 2,4873 |
| 6 | 11 | NiBSi | mala | 2,3096 |
| 7 | 3 | NiCrBSi | velika | 0,3836 |
| 8 | 8 | NiCrBSi | velika | 0,5115 |
| 9 | 12 | NiCrBSi | velika | 0,4604 |
| 10 | 2 | NiBSi | velika | 1,7386 |
| 11 | 5 | NiBSi | velika | 1,7513 |
| 12 | 7 | NiBSi | velika | 1,8528 |

U tablici 4 su prikazani rezultati analize varijance za gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja (100 okretaja kotača).

Tablica 4. Analiza varijance gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja prema C varijanti postupka (100 okretaja kotača)

| Izvor varijabilnosti | Suma kvadrata odstupanja | Broj stupnjeva slobode | Srednje kvadratno odstupanje | F_0 | Vjerojatnost za F_0 |
|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|----------|-----------------------|
| A - Vrsta prevlake | 7,076659 | 1 | 7,076659 | 700,7248 | $4,45 \cdot 10^{-9}$ |
| B - Udaljenost plamenika | 0,327492 | 1 | 0,327492 | 32,42803 | 0,00045724 |
| AB | 0,128299 | 1 | 0,128299 | 12,70403 | 0,00735479 |
| Pogreška | 0,080792 | 8 | 0,010099 | | |
| Ukupno | 7,613243 | 11 | | | |

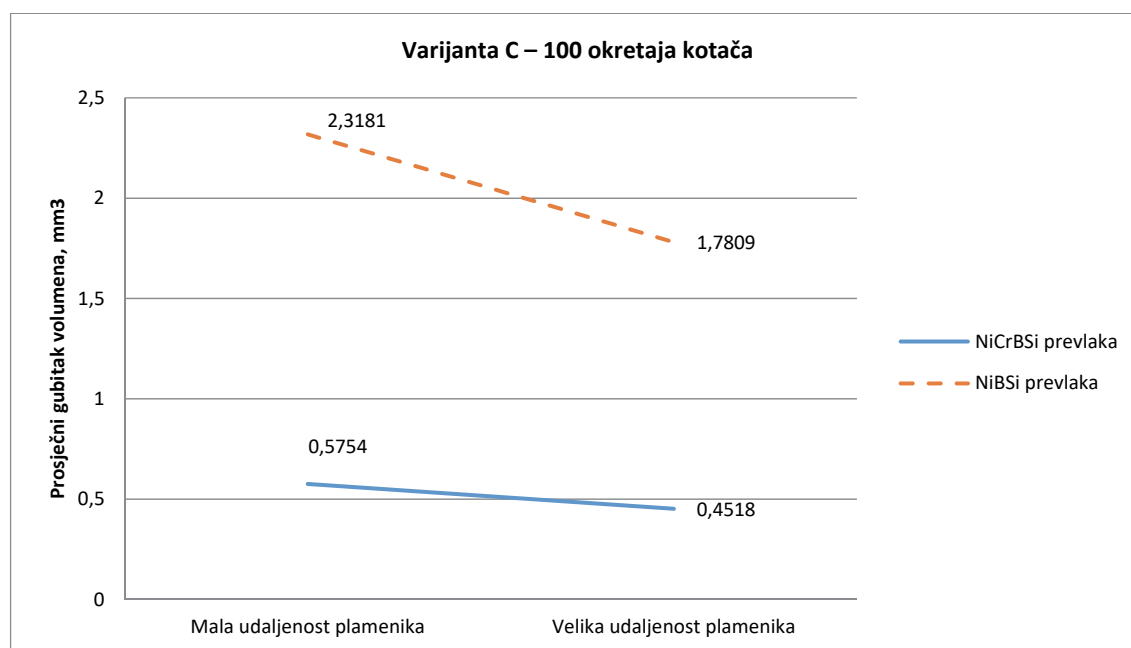
Iz tablice 4 je vidljivo da su efekti faktora A i B te interakcija između faktora značajni, jer su varijabilnosti zbog promjene razina faktora (srednja kvadratna odstupanja), koje redom iznose 7,08; 0,33; 0,13, značajno veće od varijabilnosti unutar pojedinih ćelija (0,01). Stoga su i vrijednosti F_0 varijable (omjer srednjeg kvadratnog odstupanja za pojedini faktor, odnosno interakciju i srednjeg kvadratnog odstupanja zbog ponavljanja, pogreške), koje redom iznose 700,72; 32,43 i 12,7 veće od kritične vrijednosti za vjerojatnost pogreške prve vrste od 5%. Vjerojatnost za F_0 omjere je stoga manja od 0,05 te se prihvaća alternativna hipoteza da se aritmetičke sredine razina faktora razlikuju. To znači da vrsta prevlake ima značajan utjecaj na gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja, ali i udaljenost plamenika te da postoji značajna interakcija između ova dva faktora.

Ovdje je potrebno osvrnuti se na varijabilnost unutar pojedine ćelije (pojedine kombinacije razina faktora), koja je izrazito mala (srednje kvadratno odstupanje za pogrešku iznosi 0,01), što znači da su eksperimentalni podatci za tri ponavljanja za iste kombinacije razina faktora ujednačeni te je mala slučajna pogreška. Procesno se ujednačenost podataka gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja za ponavljanja može protumačiti time što se radi o plićem tragu trošenja gdje je zahvaćena jednoličnija struktura. Veća varijabilnost podataka za iste uvjete (ponavljanja u pojedinoj kombinaciji razina faktora) se može očekivati za dulje trošenje (dublji trag), jer se može zahvatiti područje različitih struktura, odnosno različitih tvrdoća.

Kako bi se još dodatno analizirali podatci, u tablici 5 su prikazane prosječne vrijednosti odziva za pojedine kombinacije razina faktora (ćelije), kao i za razine faktora.

Tablica 5. Prosječne vrijednosti odziva za kombinacije razina faktora i razine faktora (C varijanta postupka - 100 okretaja kotača)

| Prosječna vrijednost odziva za ćelije | Faktor B - razina 1 mala udaljenost plamenika | Faktor B - razina 2 velika udaljenost plamenika | Prosječna vrijednost odziva za razine faktora A |
|---|---|---|---|
| Faktor A - razina 1 NiCrBSi prevlaka | 0,5754 | 0,4518 | 0,5136 |
| Faktor A - razina 2 NiBSi prevlaka | 2,3181 | 1,7809 | 2,0495 |
| Prosječna vrijednost odziva za razine faktora B | 1,4468 | 1,1164 | |



Slika 1. Prikaz prosječnog odziva za kombinacije razina faktora (C varijanta postupka - 100 okretaja kotača)

Iz grafičkog prikaza (slika 1) podataka iz tablice 5, vidljivo je da se manji gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja postiže uz veliku udaljenost plamenika od uzorka za obje vrste prevlake. Vidljivo je i da NiBSi prevlaka ima veći gubitak volumena od NiCrBSi prevlake.

Utjecaji (efekti) ovih faktora mogu se izraziti razlikom između prosječnih vrijednosti izmjerenih odziva na višoj i nižoj razini.

Glavni efekt (utjecaj) faktora A (vrsta prevlake) iznosi:

$$A = \frac{2,3181 + 1,7809}{2} - \frac{0,4518 + 0,5754}{2} = 1,5359 \quad (1)$$

To znači da je promjenom faktora A s niže (NiCrBSi prevlaka) na višu razinu (NiBSi prevlaka) došlo do prosječnog povećanja gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja za $1,5359 \text{ mm}^3$.

Glavni efekt (utjecaj) faktora B (udaljenost plamenika) iznosi:

$$B = \frac{0,4518 + 1,7809}{2} - \frac{2,3181 + 0,5754}{2} = -0,3304 \quad (2)$$

Promjenom faktora B s niže (mala udaljenost plamenika) na višu razinu (velika udaljenost plamenika) došlo je do prosječnog smanjenja gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja za $0,3304 \text{ mm}^3$.

Pri tome, efekti faktora A , odnosno faktora B za različite razine faktora B , odnosno faktora A , mogu se izraziti na sljedeći način:

- efekt faktora A na razini 1 faktora B (mala udaljenost plamenika) iznosi:
 $2,3181 - 0,5754 = 1,7427$ (razlika prosječnih gubitaka volumena za obje vrste prevlake naštrcane uz male udaljenosti plamenika)

- efekt faktora A na razini 2 faktora B (velika udaljenost plamenika) iznosi:
 $1,7809 - 0,4518 = 1,3290$ (razlika prosječnih gubitaka volumena za obje vrste prevlake naštrcane uz velike udaljenosti plamenika)

- efekt faktora B na razini 1 faktora A (NiCrBSi prevlaka) iznosi:
 $0,4518 - 0,5754 = -0,1236$ (razlika prosječnih gubitaka volumena za obje udaljenosti za NiCrBSi prevlaku) - za NiCrBSi prevlaku, za veću udaljenost plamenika došlo je do smanjenja gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja

- efekt faktora B na razini 2 faktora A (NiBSi prevlaka) iznosi:
 $1,7809 - 2,3181 = -0,5372$ (razlika prosječnih gubitaka volumena za obje udaljenosti za NiBSi prevlaku) - za NiBSi prevlaku, za veću udaljenost plamenika došlo je do smanjenja gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja.

Može se zaključiti da se faktor A (vrsta prevlake) ponaša slično na različitim razinama faktora B (udaljenost plamenika). Razlika prosječnih gubitaka volumena između dvije prevlake naštrcane uz malu udaljenost plamenika ($1,7427$) je slična razlici za veliku udaljenost plamenika ($1,3290$).

Međutim, faktor B , se ponaša različito na različitim razinama faktora A (razlika prosječnih gubitaka volumena iznosi $0,1236 \text{ mm}^3$ za NiCrBSi prevlaku za malu i veliku udaljenost plamenika, dok za prevlaku NiBSi iznosi $0,5372 \text{ mm}^3$, što je $4,34$ puta veće u odnosu na NiCrBSi prevlaku. Prevlake se različito ponašaju za naštrcavanje uz malu i veliku udaljenost plamenika te se može tvrditi da postoji interakcija između faktora, što je i dokazano analizom varijance (tablica 4).

Interakcija se može izračunati kao prosječna vrijednost razlike efekata faktora na razinama drugoga faktora te iznosi:

$$AB = \frac{1,3290 - 1,7427}{2} = -0,2068 \quad (3)$$

ili

$$AB = \frac{-0,5372 + 0,1236}{2} = -0,2068 \quad (4)$$

Analiza varijance za eksperimentalne podatke (tablica 4) je pokazala da generalno postoji značajan utjecaj oba faktora na odziv te da postoji interakcija između faktora. U nastavku slijedi tzv. Tukey-ev test kojim se mogu usporediti u parovima aritmetičke sredine pojedinih ćelija da bi se odredilo postoji li značajna razlika među njima. Kako postoje četiri kombinacije razina faktora, odnosno četiri ćelije, bit će moguće provesti šest usporedbi aritmetičkih sredina svake ćelije sa svakom. Osobito je korisno usporediti prosječne vrijednosti gubitka volumena za NiCrBSi prevlaku naštrcanu uz malu i veliku udaljenost plamenika, jer je razlika mala te se ne može, bez statističkih metoda, odrediti je li značajna. Razlika je malo veća za NiBSi prevlaku te će se i za taj slučaj provesti Tukey-ev test. Za Tukey-ev test koristi se pokazatelj T_α (izraz

5) koji ovisi o srednjem kvadratnom odstupanju za pogrešku MS_E i broju ponavljanja n_1 te o varijabli q raspodijeljenoj po raspodjeli ovisnoj o broju aritmetičkih sredina za usporedbu p i broju stupnjeva slobode za pogrešku f [6].

$$T_\alpha = q_\alpha(p, f) \cdot \sqrt{\frac{MS_E}{n_1}} \quad (5)$$

Ako je apsolutna vrijednost razlika aritmetičkih sredina veća od pokazatelja T_α , tada se, uz određenu vjerojatnost pogreške prve vrste α , može tvrditi da je razlika značajna.

Primjenom izraza 5, za vjerojatnost pogreške prve vrste $\alpha = 0,05$, za broj stupnjeva slobode za pogrešku $f = 8$ i broj ćelija $p = 4$ (4 aritmetičke sredine za usporedbu), vrijednost varijable q iznosi 4,89 [6] te je vrijednost pokazatelja T_α sljedeća:

$$T_\alpha = 4,86 \cdot \sqrt{\frac{0,01}{3}} = 0,28 \quad (6)$$

Razlika aritmetičkih sredina gubitka volumena za NiCrBSi prevlaku naštrcanu uz malu i veliku udaljenost plamenika iznosi $0,4518 - 0,5754 = -0,1236$. Apsolutna vrijednost razlike (0,1236) je manja od vrijednosti pokazatelja T_α (0,28) te se zaključuje da razlika gubitaka volumena za NiCrBSi prevlaku naštrcanu uz malu i veliku udaljenost plamenika nije značajna.

Za NiBSi prevlaku naštrcanu uz malu i veliku udaljenost plamenika, razlika aritmetičkih sredina gubitka volumena iznosi $1,7809 - 2,3181 = -0,5372$. Apsolutna vrijednost razlike (0,5372) je veća od vrijednosti pokazatelja T_α (0,28) te se zaključuje da je razlika gubitaka volumena za NiBSi prevlaku naštrcanu uz malu i veliku udaljenost plamenika značajna.

4.2 Statistička analiza podataka za abrazijsko trošenje prema B varijanti postupka

I prilikom ispitivanja prevlaka prema B varijanti postupka (dulje trošenje uz 2000 okretaja kotača), rezultati ispitivanja, dobiveni faktorskim planom pokusa i prikazani u tablici 6, prikupljeni su poštujući princip randomizacije. Sada je, na primjer, kombinacija NiCrBSi - mala udaljenost (prva po konvencionalnom rasporedu za faktorski plan pokusa), bila deseta po redu [2, 19]. Primijenjeni su isti uzorci, kao i za ispitivanje kraćom varijantom te će rezultati biti usporedivi.

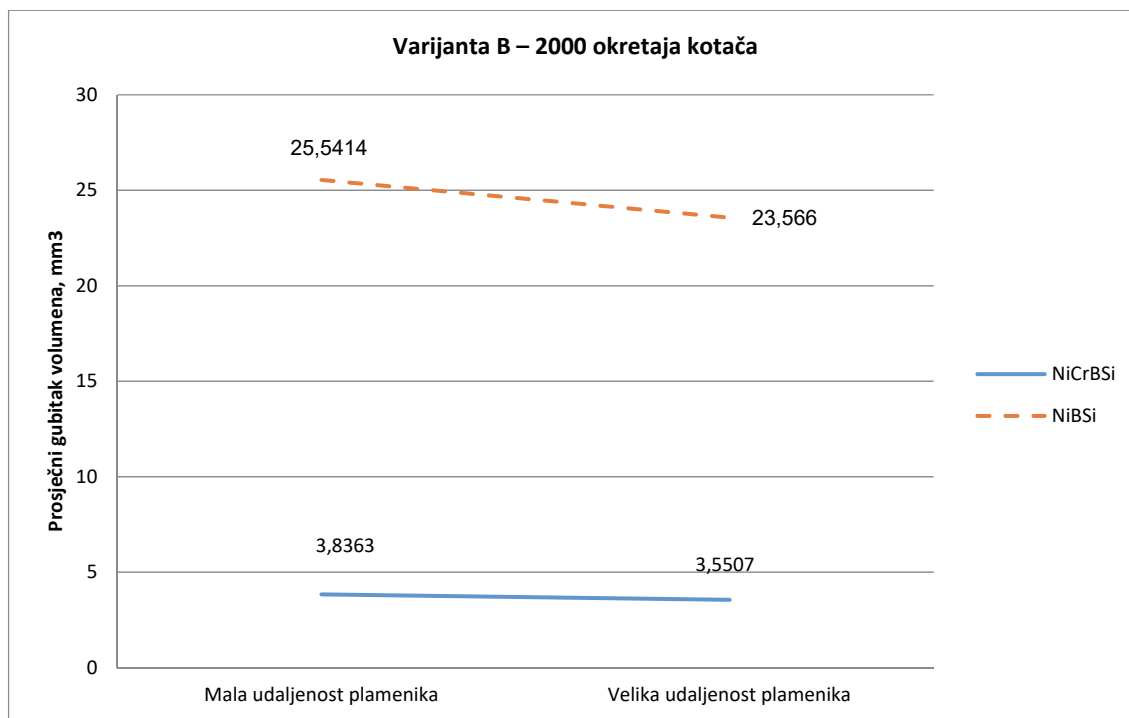
Tablica 6. Plan pokusa, redoslijed izvođenja pokusa i odziv - gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja prema B varijanti postupka (2000 okretaja kotača)

| Konvencionalni raspored | Broj pokusa | Faktor A, Vrsta prevlake | Faktor B, Udaljenost plamenika | Odziv, Gubitak volumena, $\Delta V_{2000} / \text{mm}^3$ |
|-------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------------|--|
| 1 | 10 | NiCrBSi | mala | 3,4527 |
| 2 | 2 | NiCrBSi | mala | 3,9642 |
| 3 | 6 | NiCrBSi | mala | 4,0921 |
| 4 | 9 | NiBSi | mala | 24,2131 |
| 5 | 3 | NiBSi | mala | 24,7462 |
| 6 | 11 | NiBSi | mala | 27,6650 |
| 7 | 4 | NiCrBSi | velika | 3,9898 |
| 8 | 1 | NiCrBSi | velika | 3,0307 |
| 9 | 8 | NiCrBSi | velika | 3,6317 |
| 10 | 7 | NiBSi | velika | 25,4315 |
| 11 | 12 | NiBSi | velika | 22,8807 |
| 12 | 5 | NiBSi | velika | 22,3858 |

Na osnovi prikazanih prosječnih vrijednosti odziva za pojedine kombinacije razina faktora (ćelije), kao i za pojedine razine faktora (tablica 7), što je i grafički prikazano na slici 2, vidljivo je da se manji gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja postiže uz veću udaljenost plamenika od uzorka za obje vrste prevlake, što je zaključeno i za kraće trošenje prema varijanti C postupka (slika 1). Međutim, razlika prosječnog gubitka volumena za NiBSi prevlaku naštrcanu uz malu i veliku udaljenost plamenika iznosi 23% u odnosu na veću prosječnu vrijednost za kraće trošenje (strmiji pravac na slici 1), dok je za dulju varijantu trošenja to 7% (položniji pravac na slici 2).

Tablica 7. Prosječne vrijednosti odziva za kombinacije razina faktora i razine faktora (B varijanta postupka - 2000 okretaja kotača)

| Prosječna vrijednost odziva za ćelije | Faktor B - razina 1 mala udaljenost | Faktor B - razina 2 velika udaljenost | Prosječna vrijednost odziva za razine faktora A |
|---|-------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Faktor A - razina 1 NiCrBSi prevlaka | 3,8363 | 3,5507 | 3,6935 |
| Faktor A - razina 2 NiBSi prevlaka | 25,54143 | 23,566 | 24,5537 |
| Prosječna vrijednost odziva za razine faktora B | 14,6889 | 13,5584 | |



Slika 2. Prikaz prosječnog odziva za kombinacije razina faktora (B varijanta postupka - 2000 okretaja kotača)

Pravci na grafičkom prikazu (slika 2) su gotovo paralelni te se može zaključiti, da za ovu varijantu postupka (dulje vrijeme trošenja), neće postojati interakcija između faktora, što će kvantitativno biti dokazano analizom varijance modela.

Izveštaj iz softvera *Design Expert* za analizu varijance gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja za B varijantu postupka (2000 okretaja kotača) prikazan je u tablici 8.

Tablica 8 Analiza varijance gubitka volumena uslijed abrazijskog trošenja prema B varijanti postupka (2000 okretaja kotača)

| Izvor varijabilnosti | Suma kvadrata odstupanja | Stupnjevi slobode | Srednje kvadratno odstupanje | F_0 | Vjerojatnost za F_0 |
|--------------------------|--------------------------|-------------------|------------------------------|--------|-----------------------|
| A - Vrsta prevlake | 1305,44 | 1 | 1305,44 | 806,74 | < 0,0001 |
| B - Udaljenost plamenika | 3,83 | 1 | 3,83 | 2,37 | 0,1623 |
| AB | 2,14 | 1 | 2,14 | 1,32 | 0,2831 |
| Pogreška | 12,95 | 8 | 1,62 | | |
| Ukupno | 1324,37 | 11 | | | |

Iz tablice 8 vidljivo je da suma kvadrata odstupanja za faktor A - vrsta prevlake iznosi 1305,44. Broj stupnjeva slobode za faktor A je 1 (2 - 1). Srednje kvadratno odstupanje za faktor A je 1305,44 (1305,44/1).

Suma kvadrata odstupanja za faktor B - udaljenost plamenika iznosi 3,83. Broj stupnjeva slobode za faktor B je 1 (2 - 1). Srednje kvadratno odstupanje za faktor B je 3,83 (3,83/1).

Suma kvadrata odstupanja za interakciju faktora A i B iznosi 2,14. Broj stupnjeva slobode za interakciju faktora A i B je 1 ((2 - 1) · (2 - 1)). Srednje kvadratno odstupanje za interakciju je 2,14 (2,14/1).

Vjerojatnost za izračunatu vrijednost F_0 za faktor A (806,74 = 1305,44/1,62) je manja od 0,05 (vjerojatnost pogreške prve vrste α) što znači da je faktor A (vrsta prevlake) značajan, što znači da promjena razina faktora A utječe na promjenu odziva tj. gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja nakon 2000 okretaja kotača.

Vjerojatnost za izračunatu vrijednost F_0 za faktor B ($2,37 = 3,83/1,62$) je veća od 0,05 (vjerojatnost pogreške prve vrste α) što ukazuje da faktor B (udaljenost plamenika) nije značajan te promjena razina faktora B ne utječe na promjenu odziva tj. gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja nakon 2000 okretaja kotača.

Vjerojatnost za izračunatu vrijednost F_0 za interakciju faktora A i B ($1,32 = 2,14/1,62$) je veća od 0,05 (vjerojatnost pogreške prve vrste α) što znači da interakcija faktora A i B (vrsta prevlake i udaljenost plamenika) nije značajna.

5 ZAKLJUČAK

Pri istraživanju otpornosti na abrazijsko trošenje legura nikla iz iste skupine - NiCrBSi i NiBSi, primijenjen je faktorski plan pokusa, gdje su istraživane prevlake predstavljale jednu ulaznu varijablu, dok je druga ulazna varijabla bila udaljenost plamenika od radnog predmeta pri postupku naštrcavanja. Odziv je bio gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja nakon 100 i 2000 okretaja kotača, primjenom normirane metode "suhi pijesak/gumeni kotač". Podatci su statistički analizirani s ciljem određivanja utjecajnih varijabli na gubitak volumena.

Na osnovi statističke analize podataka može se zaključiti da vrsta prevlake kao i udaljenost plamenika pri postupku naštrcavanja imaju značajan utjecaj na gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja pri 100 okretaja kotača (kraće trošenje), dok je pri 2000 okretaja kotača (dulje trošenje) jedino značajan faktor vrsta prevlake. To se može protumačiti činjenicom da se zbog naštrcavanja u više prolaza, mogu pojaviti različite strukture po slojevima prevlake, jer se isti slojevi prevlake mogu ugrijavati više puta, a gornji sloj (zadnji prolaz) takvom utjecaju nije podvrgnut. Promijenjena struktura po debljini prevlake stoga može imati utjecaj na drugačije ponašanje pri ispitivanju varijantom B postupka (dulje trošenje - dublji trag), za koju je dobivena i veća varijabilnost uslijed ponavljanja kombinacija razina faktora. Uspoređujući ove dvije vrste prevlaka, NiCrBSi prevlaka ima značajno manji gubitak volumena uslijed abrazijskog trošenja zbog kromovih karbida, silicida, borida i karboborida u strukturi, dok je za prevlaku NiBSi, i bez obzira na navedenu vrijednost tvrdoće od strane proizvođača praška (i do 42 HRC), dokazano značajno trošenje zbog male količine kroma (0,7 %), ali i ugljika (0,1 %) te nemogućnosti stvaranja kromovih karbida koji značajno utječu na smanjenje abrazijskog trošenja. Tvrdoća kromovih karbida (oko 1400 HV), veća je i od tvrdoće kvarca (1200 HV), kao najzastupljenijeg abraziva u prirodi, a koji je korišten za obje varijante postupka. Za varijantu C (kraće trošenje), dokazano je općenito da je udaljenost naštrcavanja značajan faktor, ali za NiCrBSi prevlaku (Tukeyevim testom) je dokazano da nije (što je i slučaj za dulje trošenje, čak za obje vrste prevlaka). Stoga se može zaključiti, da se u praksi, NiCrBSi prevlaka, primjenjiva za zaštitu od abrazijskog trošenja, može nanijeti uz manju udaljenost plamenika.

6 LITERATURA

- [1] Simunovic, K., Havrlisan, S., Saric, T., Vukelic, Dj., *Modeling and Optimization in Investigating Thermally Sprayed Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings: A Review*, Materials, 13, 2020, 20, str. 4584
- [2] Havrlišan, S., Stohastički pristup modeliranju i optimiranju procesa naštrcavanja pomoću plinskog plamena, Slavonski Brod, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, 2017, 226 str.
- [3] Pierlot, C., Pawlowski, L., Bigan, M., Chagnon, P., *Design of Experiments in Thermal Spraying - A Review*, Surface and Coatings Technology, 202, 2008, str. 4483-4490
- [4] Rodriguez, J., Martin, A., Fernandez, R., Fernandez, J. E., *An Experimental Study of the Wear Performance of NiCrBSi Thermal Spray Coatings*, Wear, 255, 2003, str. 950-955
- [5] Garrido, A. H., Gonzalez, R., Cadenas, M., Battez, A. H., *Tribological Behavior of Laser-Textured NiCrBSi Coatings*, Wear, 271, 2011, 5-6, str. 925-933
- [6] Montgomery, D. C., *Design and Analysis of Experiments*, Hoboken, John Wiley & Sons, 2013, 730 str.
- [7] Kesavan, D., Kamaraj, M. A., *Study on Influence of Aging Treatment on Sliding Wear Resistance of a Nickel Based Hardfacing Alloy*, Transactions of the Indian Institute of Metals, 64, 2011, 4-5, str. 453-460
- [8] Shabana, F., Sarcar, M. M. M., Suman, K. N. S., Kamaludin, S., *Tribological and Corrosion Behavior of HVOF Sprayed WC-Co, NiCrBSi and Cr₃C₂-NiCr Coatings and Analysis using Design of Experiments*, Proceedings 4th International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC), Hyderabad, India, Gokaraju Rangaraju Institute of Engineering and Technology, Materials Today, 2, 2015, 4-5, str. 2654-2665
- [9] Fernandez, J. E., Fernandez, M. D., Diaz, R. V., Navarro, R. T., *Abrasive Wear Analysis using Factorial Experiment Design*, Wear, 255, 2003, str. 38-43
- [10] Felde, I., Bergant, Z., Grum, J., *Simulation of Laser Alloying Process*, Critical Infrastructure Protection Research: Results of the First Critical Infrastructure Protection Research Project in Hungary, Book Series: Topics in Intelligent Engineering and Informatics, Nadai, L., Padányi, J. (ur.), Springer International Publishing, 12, 2016, str. 59-67
- [11] Sharma, S., *Abrasive Wear Study of Rare Earth Modified Coatings by Statistical Method*, Journal of Thermal Spray Technology, 21, 2012, 5, str. 773-781
- [12] Priručnik Castolin III: Product & Process Data Book, 240 str.
- [13] ASTM G65-94, *Standard Test Method for Measuring Abrasion using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*, in Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, 3.02, 1995, 12 str.
- [14] Sue, A., Sreshta, H., Qiu, B. H., *Improved Hardfacing for Drill Bits and Drilling Tools*, Journal of Thermal Spray Technology, 20, 2011, 1-2, str. 372-377

- [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 and Coatings Technology, 172, 2003, 2-3, str. 262-269
- [16] Hejwowski, T., Szewczyk, S., Weroni, A., *An Investigation of the Abrasive and Erosive Wear of Flame-Sprayed Coatings*, Journal of Materials Processing Technology, 106, 2000, 1-3, str. 54-57
- [17] 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, str. 37-48
- [18] Šimunović, K., Grilec, K., Šimunović, 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", Katalinić, B., Kljajin M., (ur.), Slavonski Brod, DAAAM International Vienna, 2002, str. 239-244
- [19] Havrlišan, S., Šimunović, K., Vukelić, D., *Modelling of abrasive wear of Ni-based self-fluxing alloy coatings by the application of experimental design*, Tehnički vjesnik, 23, 2016, 6, str. 1687-1693