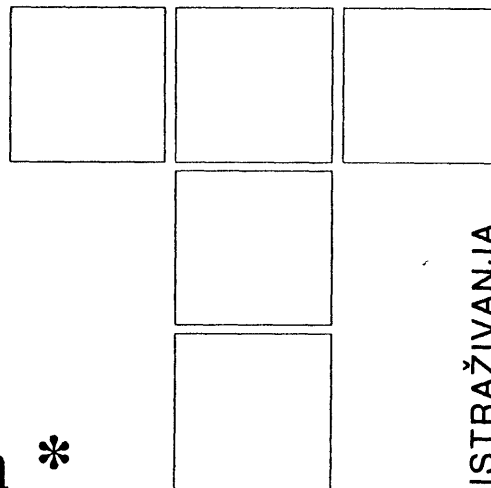


**B. JEREMIĆ, M. BABIĆ, N. MILIĆ,
B. VASILJEVIĆ**

Tribološke karakteristike regenerisanih površina *



1. UVOD

U najvećem broju slučajeva otkazi kod tehničkih sistema nastaju kao posledica razvoja triboloških procesa, odnosno pohabanosti kontaktnih elemenata. Nivo kritičnih pohabanosti se kreće od reda nekoliko desetina mikrometara (na primer ležišta brusilica) pa do nekoliko milimetara (mašine koje rade u abrazivnoj i agresivnoj sredini). Sa druge strane su nepobitne činjenice da se elementi tehničkih sistema izrađuju od legiranih čelika koji u sebi sadrže legirajuće elemente kao što su Cr, Ni, Co, W itd. Navedeni elementi su skupi i strateški materijali sa tačno procenjenim rezervama u svetu.

Ako se posmatraju osnovna ograničenja pri eksploataciji tehničkih sistema, dolazi se do zaključka da je obezbeđenje njihove radne sposobnosti jedan od osnovnih ciljeva funkcije održavanja. To znači da deo koji je zbog pohabnosti doveo do otkaza treba zameniti novim ili stari regenerisati. Da bi se deo zamenio novim mora postojati u magacinu. To znači da ukoliko je deo kritičniji sa aspekta pojave otkaza i njegova zaliha mora biti veća. Ovo je loš pristup jer angažuje znatna finansijska sredstva koja su zamrznuta u rezervnim delovima koji leže u magacinu i zauzimaju određeni prostor.

Bolji pristup je ako se pohabani element regeneriše, tj. nanese sloj triboloških karakteristika boljih od onih koje je posedovao osnovni materijal tog kontaktnog elementa.

*Dr Branislav Jeremić, dipl. ing.,
vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Kragujevcu
Dr Miroslav Babić, dipl. ing.,
docent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu
Dipl. ing. Nenad Milić,
asistent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu
Dr Bogdan Vasiljević, dipl. ing.,
docent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu*

Osim navedenog, racionalan pristup je i ako se elementi tehničkih sistema izrađuju od niže kvalitetnih materijala, a samo na kontaktne površine nanose slojevi izuzetnih triboloških karakteristika. Kroz ovo saopštenje se daju rezultati ispitivanja, tj. izbora optimalnih triboloških karakteristika regenerisanih slojeva pomoću plamenog spreja.

Za regeneraciju su korišćene tri vrste praha i to na bazi nikla, kobalta i nikla sa kobaltom i volfram karbidom. Iako se preporuka proizvođača ovih prahova odnosi za iste uslove eksploatacije, dobijene tribološke karakteristike su u nekim uslovima ostvarivanja kontakta značajno različite.

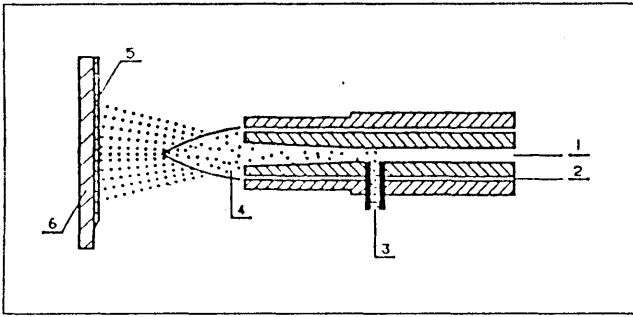
2. PROCES REGENERACIJE I IZBOR MATERIJALA SA TRIBOLOŠKOG ASPEKTA

Danas se najčešće u svetu koriste metode regeneracije zasnovane na korišćenju praha koji se različitim postupcima prevodi u tečno ili stanje plazme i deponuje na površinu koja se regeneriše. Očigledno je da su u procesu regeneracije prisutni termički procesi koji u zavisnosti od primenjene metode mogu dovesti do:

- termičkog preobražaja osnovnog materijala elementa koji se regeneriše,
- termičkih deformacija i
- zaostalih naprežanja nastalih kao posledica vezivanja raznorodnih materijala pri termički opterećenom elementu koji se regeneriše.

Navedeno ukazuje na još jedan važan aspekt kod izbora materijala i metode regeneracije.

Za deponovanje sloja materijala koji su korišćeni za ispitivanje (čiji su rezultati prezentirani u ovom radu) primenjen je plameni sprej. Kod plamenog spreja, gas za sagorevanje pomoću ejektorskog principa dovodi u svoju struju čestice praha, koje zatim ulaze u zonu u kojoj gas sagoreva (slika 1.).



Sl. 1. Regeneracija pomoću plamenog spreja:
 1 - gas za usisavanje čestica praha, 2 - gas za sagoravanje, 3 - otvor za usisavanje čestica praha, 4 - zona sagoravanja gasa, odnosno topljenja praha, 5 - naneti sloj, 6 - element koji se regeneriše
 Regeneration with flame spray: 1 - gas for powder particles suction, 2 - gas for combustion, 3 - opening for powder particles suction, 4 - zone of gas combustion i.e. powder melting, 5 - applied layer, 6 - element that is being regenerated.
 Восстановление пламенной смесью: 1 - газ, всасывающий порошок, 2 - горячий газ, 3 - всасывающее отверстие, 4 - зона сгорания газа и плавления порошка, 5 - нанесенное покрытие, 6 - восстанавливаемый элемент

Pri prolasku čestica kroz zonu sagoravanja, dolazi do njihovog topljenja i ubrzavanja u visokotemperaturskoj struji gasa. Na površinu elementa za regeneraciju istopljeni materijal dolazi u obliku sitnih istopljenih čestica koje se sudaraju sa njim. Pri tome dolazi do njihovog udaranja o površinu, deformisanja, međusobnog vezivanja i obrazovanja kompaktnog sloja. Udar i deformacija čestica dovodi do njihove neuobičajeno brze kristalizacije i hlađenja.

Osnov tehnologije regeneracije pomoću plamenog spreja podrazumeva adekvatnu pripremu površine (peskarenje, odmaščivanje i predgrevanje), kao i završnu obradu (brušenje) predmeta (deponovanog sloja) na željene dimenzije.

Kod izbora materijala za regeneraciju kontaktnih elemenata treba poći od sistemskog pristupa u analizi obavljanja funkcije tribomehničkih sistema kojima ti elementi pripadaju. Ovo se prvenstveno odnosi na:

- prirodu i nivo opterećenja,
- brzine relativnog kretanja i
- sredinu u kojoj se kontakt ostvaruje.

U najvećem broju slučajeva odabrani materijal je vezan i za tačno određeni postupak regeneracije (navarivanje, plameni sprej, plazma sprej, plazma lučno navarivanje itd.). To znači da osnovno ograničenje kod regeneracije ne može biti vezano samo za izbor materijala, već i za metod kojim se ovaj materijal deponuje na pohabanu površinu.

Može se generalno zaključiti da najpoznatiji svetski proizvođači prahova za regeneraciju (METCO, PLASMA ALLOY, STELLITE, MOGUL, THERMACOTE, WELCO) izbor materijala vezuju u širem smislu za uslove ostvarivanje kontakta (tabela I).

Tabela I

Materijal	Uslovi eksploatacije				
	Termič. optereć.	Erozija	Korozija	Hladna abrazija	Topla abrazija
Legure na bazi kobalta		*	*	*	*
Legure na bazi nikla			*	*	*
Volfram karbid				*	*
Keramička	*				

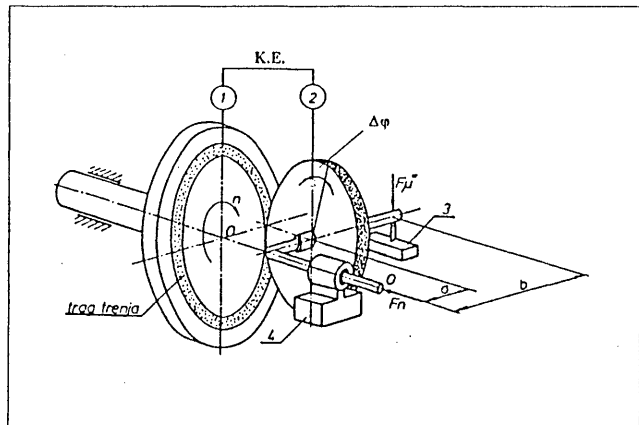
Iz navedene tabele je očigledno da prah napravljen od legure na bazi kobalta ima najširi spektar primene za regeneraciju, dok je prah na bazi keramike uglavnom namenjen termički opterećenim elementima.

3. EKSPERIMENTALNI USLOVI

3.1. Merni lanac

Ispitivanja triboloških karakteristika regenerisanih površina izvedena su na tribometru koji obezbeđuje promenljivu geometriju kontakta (pin on disc i disc on disc). U ovom slučaju je samo rađeno sa geometrijom disc on disc (slika 2.).

Na nepokretnom disku po obimu je nanešen sloj materijala za regeneraciju. Zaokretanjem diska za ugao $\Delta\varphi$ oko ose omogućeno je ponavljanje većeg broja eksperimenata.



Sl. 2. Geometrija kontakta "disc on disc" - linijski kontakt (K.E. - kontaktni elementi, 1 - pokretni disk, 2 - nepokretni disk, 3 - dinamometar za merenje sile trenja, 4 - nosač sa kotrljajućom vodicom)
 Geometry of "disc-on-disc" contact - linear contact (K.E. - contact elements, 1 - moving disc, 2 - fixed disc, 3 - dynamo meter for measuring the friction forces, 4 - carrier with the rolling guide).
 Геометрия контактирования "disc on disc" линейный контактирующий (К.Е. - контактирующие элементы, 1 - подвижный диск, 2 - неподвижный диск, 3 - динамометр для измерения силы трения, 4 - сущий с направляющей качения)

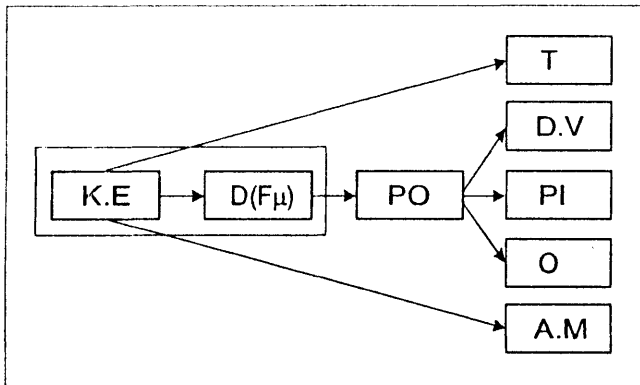
ta pri svim ostalim istim uslovima i dobijanje pouzdanih rezultata istraživanja.

Pri normalnom opterećenju silom F_n dolazi do ostvarenja linijskog kontakta između diskova. Zbog procesa trenja u zoni kontakta, nepokretni disk (2) sa polugom na kojoj je fiksiran, teži da ostvari rotaciju oko ose O-O. Ovome se suprotstavlja dinamometar koji registruje silu F_μ . Ova sila predstavlja proizvod stvarne sile trenja F_μ i odnosa dužina a/b. Signal sile trenja se sa dinamometra prenosi u pojačivač (kao deo mernog lanca - slika 3.) i neprekidno registruje na pisaču u toku procesa istraživanja.

3.2. Kontaktni elementi

Kontaktne elemente su činili pokretni i nepokretni disk. Pokretni disk je bio izrađen od čelika Č.5420, cementiran do dubine $f=1-1.2$ mm i sa tvrdoćom od 58 HRC. Kontaktne površine su obrađene brušenjem uz obezbeđenje kvaliteta N5.

Regeneracija, odnosno nanošenje sloja izvršeno je sa tri različita praha proizvoda firme MOGUL METALLIZING.



Sl. 3. Merni lanac (TR-tribometar, K.E.-kontaktni elementi, T-sitem za identifikaciju topografije TALYSURF 6, A.M.-alatni mikroskop UIM-2I, D(Fμ)-dinamometar su mernim trakama za merenje sile trenja, PO-pojačivač HBM KWS 3073, DV digitalni voltmetar za električno uravnoteženje pojačivača SOLARTRON 7040, PI-pisač RIKADENKI R-50, O-dvokanalni osciloskop TEKTRONIX 422).
Measuring setup (TR - tribometer, K.E. contact elements, T - system for topography identification TALYSURF 6, A.M. tool microscope UIM - 2I, D(Fμ) - dynamometer with strain gauges for measuring the friction forces, PO - amplifier HBM KWS 3073, DV digital voltmeter for electrical balancing of amplifier SOLARTRON 7040, PI plotter RIKADENKI R-50, O - two-channel oscilloscope TEKTRONIX 422).
Измерительная цепь (TR - трибометр, К.Е. - контактные элементы, Т - система для идентификации топографии TALYSURF 6, А.М. - инструментальный микроскоп УИМ 2I, D(Fμ) - динамометр, PO - усилитель HBM KWS 3073, D.V. - цифровой вольтметр для электрического уравновешивания усилителя SOLARTRON 7040, PI - пишатель RIKADENKI R-50, O - двухканальный осциллоскоп TEKTRONIX 422)

Osnovne karakteristike materijala (praha) i nanešenog sloja date su u tabeli II.

Tabela II

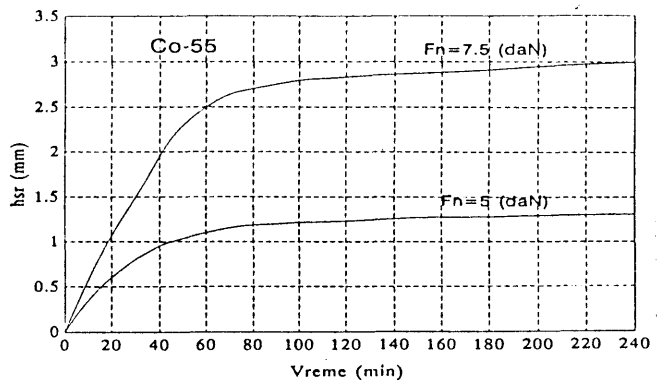
Komercijalni naziv praha	Osnova	Hemijski sastav	Tvrdoća sloja HRC
Co - 55	Kobalt	C,Fe,Si,Ni,Cr,B,W,Co	57.3
N - 55	Nikl	C,Fe,Si,Ni,Cr,B,Cu,Mo	62
W - 58	Nikl sa kobaltom i volfram karbidom	C,Fe,Si,Ni,Cr,B,Mo,Co,volfram karbid	65

3.3. Uslovi ostvarivanja kontakta

kontakt linijski dužine 2.5 mm,
podmazivanje granično,
brzina klizanja $v=2.4$ m/s i
normalno opterećenje $F_n = 5$ daN i 7 daN.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

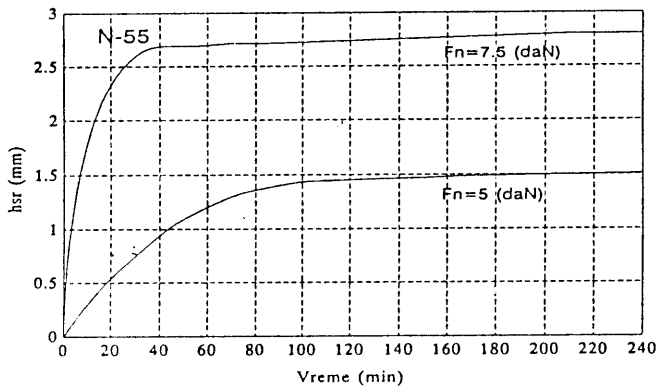
Sva istraživanja su izvedena sa ciljem da se sagleda proces habanja kontaktnih elemenata za definisane uslove ostvarivanja kontakta.



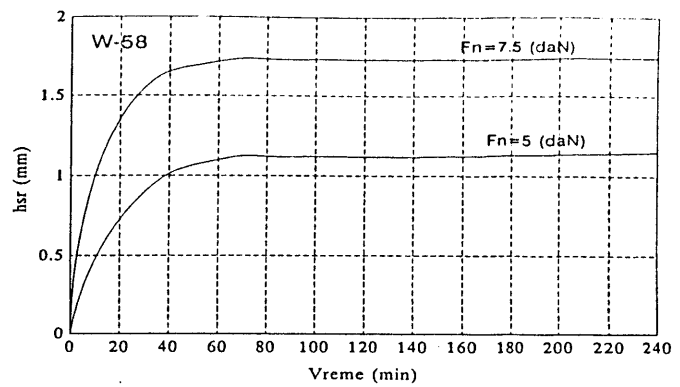
Sl. 4. Uticaj opterećenja na proces habanja nanešenog sloja Co-55
Influence of loading on the wear process of the applied layer Co-55
Влияние нагрузки на процесс изнашивания покрытия Co-55

Merenje pohabanosti nepokretnog diska izvedeno je pomoću alatnog mikroskopa. Merenja su vršena na svakih 0.5 mm (posmatrajući dužinu dodira), a rezultati koji se prikazuju na slikama 4., 5. i 6. predstavljaju srednje vrednosti širine pojasa habanja (h_{sr}).

U svim slučajevima (slike 4., 5. i 6.) očigledno je da se relativno brzo završava proces inicijalnog habanja. Posle toga priraštaj pohabanosti se odvija jako sporo. Sa istih slika se vidi da nivo opterećenja ima veoma značajan uticaj na intenzitet procesa habanja. Uočene su manje



Sl. 5. Uticaj opterećenja na proces habanja nanešenog sloja N-55
 Influence of loading on the wear process of the applied layer N-55
 Влияние нагрузки на процесс изнашивания слоя N-55

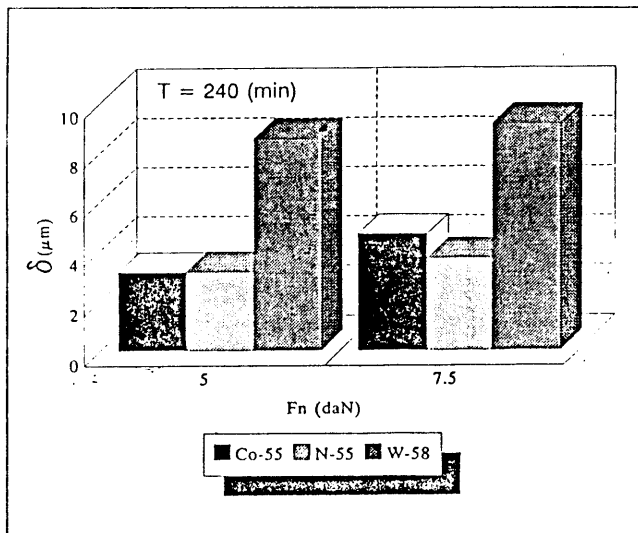


Sl. 6. Uticaj opterećenja na proces habanja nanešenog sloja W-58
 Influence of loading on the wear process of the applied layer W-58
 Воздействие нагрузки на процесс изнашивания слоя W-58

razlike u tribološkom ponašanju slojeva na bazi praha Co-55 i N-55. Sloj na bazi volfram karbida (W-58) je najtvrdi i ima značajno veću otpornost na habanje u odnosu na ostala dva (Co-55 i N-55).

U toku istraživanja praćena je promena dubine traga trenja na pokretnom disku (slika 7.)

Sa slike 7. se vidi da vrsta materijala nanešenog sloja ima veoma bitan uticaj na nivo pohabanosti pokretnog diska. Ovaj uticaj je značajniji od uticaja nivoa opterećenja.



Sl. 7. Uticaj opterećenja i vrste nanešenog sloja na nivo pohabanosti pokretnog diska
 Influence of loading and kind of the applied layer on the moving disc wear level
 Воздействие нагрузки и виды нанесенного слоя на износ подвижного диска

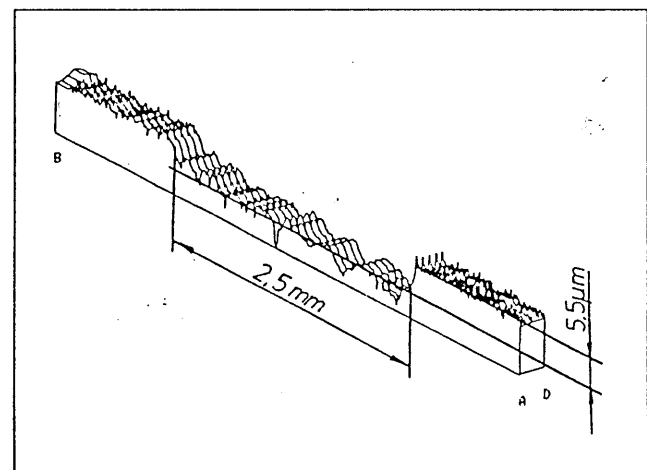
Očigledno je da ukoliko tvrdoća nanetog sloja značajnije prevazilazi tvrdoću materijala drugog kontaktnog elementa i proces habanja tog elementa je intenzivniji.

Ako se uporede rezultati sa slike 4. i slike 7. vidi se da je posle 3 sata habanje nanetog sloja W-58 približno 1.6 puta manje u odnosu na Co-55 i N-55, ali je zato habanje pokretnog diska za W-58 približno 2.2 puta veće u odnosu na ostala dva materijala. Ovaj zaključak se odnosi na normalno opterećenje od 7.5 daN.

Iz napred navedenog se zaključuje da postoji optimum sa aspekta izbora materijala koji se nanosi, a u zavisnosti od drugog kontaktnog elementa i uslova ostvarivanja kontakta.

Merenje dubine traga trenja je vršeno na sistemu Talysurf 6 pomoću slike dobijene prostornim skeniranjem zone kontakta. Jedan primer za ovo je prikazan na slici 8.

Sa slike 8. se vidi da se prostornim skeniranjem mogu meriti pohabanosti koje su reda veličine desetog dela mikrometra.



Sl. 8. Profil pohabane površine na tragu trenja pokretnog diska
 Worn surface profile on the moving disc friction trace
 Профиль изношенной поверхности на дорожке трения подвижного диска

5. ZAKLJUČAK

Za izvođenje procesa regeneracije i izbor materijala sa tribološkog aspekta, treba poći od uslova ostvarivanja kontakta. Drugi veoma važan kriterijum je vezan za materijal i tvrdoću kontaktnog elementa koji se ne regeneriše.

Ukoliko tvrdoća nanetog sloja značajnije prevazilazi tvrdoću materijala drugog kontaktnog elementa i proces habanja tog elementa je intenzivniji.

Sloj na bazi volfram karbida bi bio veoma dobar za regeneraciju elemenata koji obavljaju funkciju u abrazivnoj sredini.

LITERATURA

- [1] MITIN B. S., Poroškovaja metalurgija i napilenije pokritija, "Metalurgija", Moskva, 1987.
- [2] KUDINOV V. V., PEKŠEV P. JU., Nanesenije pokritij plazmoj, "Nauka", Moskva, 1990.
- [3] JEREMIĆ B., MILIĆ N., BABIĆ M., MEYER M., Uticaj geometrije kontakta na proces razaranja sloja čvrstog maziva, Tribologija u industriji, No 1., Mašinski fakultet, Kragujevac, 1991.
- [4] Prospektni materijali firmi: METCO, PLASMA ALLOY, STELLITE, MOGUL, THERMACOTE WELCO itd.

* Rad je izložen na Trećoj jugoslovenskoj konferenciji o tribologiji YUTRIB'93, Kragujevac, 24.-25. juna 1993.god.

Tribological Characteristics of Recovered Surfaces

Contact making condition is, from tribological aspect, the main criterion for selection of recovery process material. The second important criterion is related too material and hardness of the contact element not subjected to recovery. The research was carried out on elements recovered by powder spray flame based on cobalt, nickel, and nickel with cobalt and wolfram carbide.

If the hardness of the deposited layer is excessively above the material hardness of the other contact element, that element would then be subjected to a more intensive wear. Wolfram carbide layer is very good for recovery of the element functioning in abrasive environment.

Трибологические характеристики восстановленных поверхностей

Условия осуществления контакта с адекватным трибологическим явлением являются важнейшим критерием при выборе материала покрытия. Вторым определяющим критерием является материал и твердость контактирующего элемента, который не восстанавливается. Исследования проводились на элементах, восстановленных пламенной порошковой смесью кобальта, никеля, никель-кобальта и карбида вольфрама.

Когда твердость покрытия гораздо больше твердости другого контактирующего элемента этой элемент изнашивается более интенсивно. Покрытие из карбида вольфрама оказалось очень эффективным для восстановления деталей работающих в абразивной среде.