

PREGLED METOD ZA PRIPRAVO TRDIH PREVLEK

Peter Panjan in Boris Navinšek, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

Review of vapour-phase coating processes for hard coatings

ABSTRACT

Hard coatings can be deposited by a large variety of techniques. Generally they can be divided in three groups: Chemical Vapour Deposition (CVD), Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition (PACVD) and Physical Vapour Deposition (PVD). The basic of these techniques, a comparison of individual technologies, their possibilities, advantages and limitations are presented.

POVZETEK

Za pripravo trdih prevlek obstaja veliko različnih metod. V splošnem jih lahko razdelimo v tri skupine: kemijsko depozicijo iz parne faze (CVD), kemijsko depozicijo iz parne faze v prisotnosti plazme (PACVD) in fizikalno (vakuumsko) depozicijo iz parne faze (PVD). V prispevku opisujemo osnove teh postopkov, njihove prednosti in omejitve, naredila pa sva tudi primerjalno analizo posameznih metod.

1. Uvod

Oplemenjenje površin orodij, strojnih delov in nekaterih končnih izdelkov s trdimi zaščitnimi prevlekami, ki jih danes najpogosteje pripravimo s fizikalnimi (vakuumskimi) postopki nanašanja (PVD), ni nova ideja. Že dolga desetletja so v rabi različni postopki za zaščito in poboljšanje lastnosti površin, kot so trdo kromanje, kemotermične obdelave (nitiranje in karbonitriranje), obdelave v plazmi, anodna oksidacija, boriranje in vanadiranje ter še mnogi drugi. Osnova teh postopkov so spremembe kemične sestave in mikrostrukture na površini z elektrolizo, difuzijo ali kemijsko reakcijo, skratka procesi, ki vodijo do spremembe sestave in strukture osnovnega materiala. Izboljšanje kvalitete (vzdržljivosti) orodij, ki jih dosežemo s temi postopki je največ nekaj deset procentov, medtem ko dobimo s trdimi prevlekami tudi do desetkrat večjo vzdržljivost orodja. Za pripravo trdih prevlek je primernih cela vrsta keramičnih materialov. Pripravimo pa jih lahko z različnimi postopki nanašanja iz parne faze, ki jih bova v nadaljevanju podrobneje opisala.

2 Kemijsko nanašanje iz parne faze

Prve trde prevleke so bile narejene pred več kot trideset leti s kemijskim postopkom nanašanja iz parne faze (Chemical Vapour Deposition - CVD) /1,2/. Postopek se še danes uporablja za oplemenjenje rezalnih ploščic iz karbidne trdine s trdimi prevlekami TiN, TiC, TiCN, Al₂O₃ in z večplastnimi strukturami na osnovi naštetih prevlek. Bistvo postopkov CVD za pripravo trdih prevlek je kemijska reakcija med izbranimi plini na vroči podlagi (800 do 1100°C). Reakcija je lahko termični razkroj (piroliza), substitucija ali dvojna substitucija. Klasičen primer dvojne substitucije je nanašanja plasti TiN po shemi:



Tlak v reaktorski posodi je lahko atmosferski, ponavadi pa je nekoliko znižan, ker na ta način izboljšamo kvaliteto in uniformnost prevleke na podlagah z veliko površino.

Kvaliteta prevleke je odvisna tudi od čistosti površine podlage, kompatibilnosti prevleke in podlage, termodinamike in kinetike same reakcije. Termodinamične količine, ki jih lahko kontroliramo so: temperatura podlage, celotni tlak in delni tlaki reaktantov. Ravnotežni parni tlak pri izbrani temperaturi lahko izračunamo iz proste energije za izbrano reakcijo. CVD postopek nanašanja prevlek je zaporedje naslednjih procesov: (1) uparitev snovi, ki so potrebne za reakcijo, (2) transport plina do podlag, (3) adsorpcija, (4) razgradnja adsorbirane faze, (5) nanašanje prevleke izbranega materiala in desorpcija plinskih produktov, ki med reakcijo nastanejo, in (6) odstranitev teh plinov iz reaktorja. 1, 2 in 6 so transportni procesi, 2,3,4 in 5 pa reakcije na površini podlage. Transportni procesi so v splošnem odvisni od koncentracije reaktantov, difuzijske hitrosti, pretoka plinov in geometrije reaktorja. Hitrosti reakcij na površini pa so odvisne predvsem od koncentracije reaktantov in temperature.

Mikrostruktura CVD prevlek je odvisna od temperature podlage in prenasíčenosti pare snovi. Pri nižjih temperaturah imajo prevleke amorfnó strukturo, z naraščajočo temperaturo podlage pa nastajajo najprej finostrukturne polikristalne plasti, nato grobostrukturne polikristalne, dendritne, pri dovolj visokih temperaturah pa rastejo epitaksono. Vpliv prenasíčenosti na mikrostrukturo prevlek je ravno obraten.

Reakcije potekajo v termodinamičnem ravnotežju, kar olajša pridobivanje spojin v stehiometričnem razmerju. Prednosti postopkov CVD nanašanja plasti sta tudi razmeroma preprosta reaktorska posoda in enostavna kontrola postopka. Poglavitne slabosti postopkov CVD pa so visoka temperatura nanašanja ter omejena izbira kemijskih reakcij v plinski fazi, ki so primerne za pripravo trdih prevlek. Tudi nekateri stranski produkti reakcij so nezaželeni (npr. HCl), ker lahko poškodujejo podlago in ker so izpušni plini ekološko nesprejemljivi. Kot izhodne snovi nam v večini primerov rabijo halogenidi prehodnih elementov, ki pa so hlapljive spojine, zelo občutljive na vlago, in delo z njimi zahteva posebne varnostne ukrepe.

Zaradi visoke temperature nanašanja so se postopki CVD dolgo uporabljali le za zaščito orodij iz karbidne trdine. Šele pred nekaj leti so bili razviti postopki, ki potekajo v plazmi (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition - PACVD)/3,4,5,6,7,8./; s plazemsko aktivacijo reakcijskih plinov se temperatura, potrebna za potek kemijske reakcije, zniža na 550°C za TiC oz. 300°C za TiN in TiCN. Razelektritev v reaktorju dosežemo, če tlak plinske mešanice znižamo na nekaj mbar, vzbudimo pa jo lahko na več načinov: (a) z negativno elektrodo, ki se nahaja v posodi nasproti podlagam, (b) z indukcijsko tuljavo, ki jo vzbujamo z visoko frekvenco, (c) s kapacitivnim vzbujanjem in (d) z mikrovalovnim vzbujanjem. Način vzbujanja plazme izberemo glede na geometrijo podlag in reaktorja. Plazmo zgostimo ali jo usmerimo proti podlagam z magnetnim poljem. Največjo gostoto plazme dosežemo z mikrovalovnim vzbujanjem, slaba stran postopka pa je visoka cena mikrovalovnega generatorja.

V zadnjih letih so raziskovalci nevarne halogenide nadomestili s kovino-organskimi spojinami (govorimo o "Metal Organic Chemical Vapour Deposition - MOCVD" postopku) /9/. Kovino-organske spojine lahko pripravimo skoraj za vse kovinske elemente, vendar pa je cena teh spojin visoka. Slaba stran postopka je tudi neizogibna prisotnost ogljika (in v nekaterih primerih kisika) v plasti.

3 Fizikalni (vakuumski) postopki nanašanja

Konec sedemdesetih let je razvoj fizikalnih (vakuumskih) postopkov nanašanja (Physical Vapour Deposition - PVD) omogočil nanašanje prevlek TiN na orodja iz hitroreznih jekel pri temperaturah pod 500°C, t.j. pri temperaturi, ki je nižja od temperature popuščanja teh jekel /10,11/. Ta zahteva je bistvena, saj se na ta način izognemo popuščanju jekla in izgubi dimenzijskih toleranc. Osnova vseh postopkov PVD nanašanja trdih prevlek sta reaktivno napajanje in napršenje ob prisotnosti plazme, s katero aktiviramo (disociiramo, vzbudimo ali ioniziramo) atome tarče, reaktivnega plina oz. inertnega plina. Govorimo o aktiviranem reaktivnem nanašanju (Activated Reactive Physical Vapour Deposition - ARPVD). Podlage (orodja) so na negativnem električnem potencialu (bias-u), ki nastale ione pospeši na površino rastoče plasti. Tak postopek nanašanja se imenuje ionsko prekrivanje (Ion Plating - IP)/12,13,14/. Bistvo ionskega prekrivanja je torej obstreljevanje rastoče plasti z ioni iz plazme. Plazma je v nekaterih sistemih že prisotna (napršenje, napajanje s katodnim lokom), medtem ko jo moramo pri drugih ustvariti (enostavno ionsko prekrivanje). Odločilna je gostota plazme, energija pa mora biti dovolj velika, da pride do vzbujanja in ionizacije prisotnih nevtralnih atomov oz. molekul, vendar pa ne prevelika, ker lahko ioni z veliko energijo poškodujejo plast/15/. Izmed načinov vzbujanja plazme je najstarejši postopek, t.j. istosmerna razelektritev med dvema elektrodama, komajda zadosten, zato plazmo praviloma zgostimo z magnetnim poljem. Zelo učinkovit postopek je vzbujanje plazme z mikrovalovi (gostota ionov, ki jo dosežemo je do 10¹¹ ionov/cm³) /16/. Velik tehnični problem pa je, kako z mikrovalovi ustvariti plazmo v veliki vakuumski posodi.

Pojem "reaktivni" postopek nanašanja (reaktivno napajanje, reaktivno napršenje) pomeni, da tarčo čiste kovine ali zlitine izparevamo ali razpršujemo v atmosferi reaktivnega plina (npr. dušika, acetilena, kisika) /17,18,19,20,21/. Pri pravilno izbranih parametrih priprave raste na podlagi tanka plast ustrezne spojine (npr. TiN, CrN, TiC,...). Sestava in lastnosti plasti so odvisne od hitrosti razprševanja, razdalje med tarčo in podlago, temperature podlage, tlaka argona in reaktivnega plina, gostote toka izparjenih oz. razpršenih atomov tarče ter stopnje ionizacije argona, reaktivnega plina in izparjenih oz. razpršenih atomov tarče /22,23,24,25,26/. Tak način priprave tankih plasti različnih spojin ima v primerjavi z nanašanjem iz kompozitne tarče več prednosti: (a) hitrost nanašanja je veliko večja, (b) cena tarče je veliko manjša, (c) toplotna prevodnost kovinske tarče je veliko večja, zato jo (pri napršenju) lažje hladimo.

Različni postopki ionskega prekrivanja, ki so danes v uporabi, se razlikujejo tako po načinu uparitve atomov tarče, kakor tudi po tem, kako, kje in v kolikšni meri izparjene kovinske atome, atome (molekule) reaktivnega

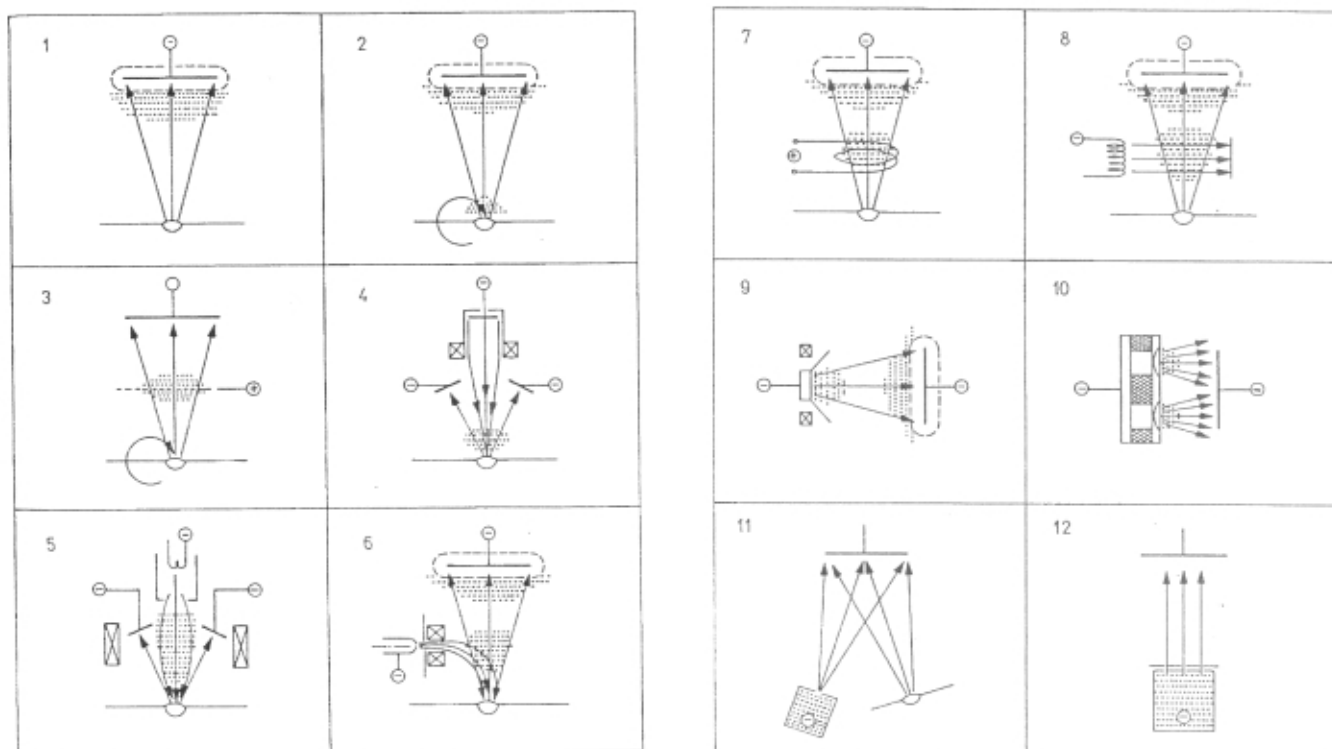
plina in atome delovnega (inertnega) plina (argona) aktiviramo (t.j. disociiramo, vzbudimo ali ioniziramo).

Postopek nanašanja trdih prevlek PVD poteka v treh korakih: (a) uparitve atomov kovinske tarče, (b) transporta atomov ali gruče atomov (nevtralnih in ioniziranih) na podlage, (c) kondenzacije curka atomov na podlagah in rast plasti. Atome tarče (izvira) lahko uparimo: (a) s segrevanjem z elektronskim curkom, katodnim lokom ali laserjem (napajanje) in (b) z obstreljevanjem tarče z inertnimi ioni (razprševanje) - vsak vpadli ion izbije iz tarče določeno število atomov; število razpršenih atomov je odvisno od vrste tarče ter od vrste, energije in vpadnega kota ionov. Postopki uparitve atomov izvira se razlikujejo: (a) po energiji uparjenih atomov (pri napršenju je povprečna energija razpršenih atomov 1-10 eV, pri napajanju 0.1 eV, energija ionov pa je določena z električnim potencialom na podlagah - "bias-om" (-100 do -200 V), (b) po stopnji ionizacije izparjenih atomov (navečja, t.j. >50%, je pri nanašanju s katodnim lokom) in (c) po hitrosti nanašanja (od 10 do 70 nm/min).

Uparjeni atomi in molekule na hladnejši podlagi se kondenzirajo v obliki tanke plasti /27/. Gonilna sila procesa je prosta energija kondenzacije (ΔG_{kon}), ki je premoso-razmerna logaritmu prenasičenosti P (P je razmerje tlaka curka uparjenih atomov (p₁) in ravnotežnega tlaka (p₂) pri temperaturi kondenzacije, t.j. temperaturi podlage T_p): $\Delta G_{kon} = -RT_p \ln P$. Za kinetiko kondenzacije vakuumskih tankih plasti (PVD) pa je zelo pomembna količina temperatura kondenzacije (t.j. temperatura podlage); vakuumske tanke plasti lahko nastanejo le pri občutni podhladitvi, to je pri razliki med tališčem snovi, ki jo nanašamo, in temperaturo kondenzacije.

Če sta torej izpolnjena osnovna termodinamska pogoja, se pričnejo atomi in molekule uparjene snovi kondenzirati na podlagi. Proces, ki so pomembni v začetni fazi kondenzacije, t.j. pri nukleaciji, so adsorpcija, odparevanje (desorpcija) in difuzija adsorbiranih atomov depozita po površini podlage, tvorba stabilnih jeder in njihova koalescenca /28/. Atomi depozita, ki priletijo na podlago, imajo presežek kinetične energije in se pri višjih temperaturah podlage gibljejo po njeni površini ali pa z nje odparijo, še preden pridejo do ugodnih mest za trajno adsorpcijo. Takšna mesta so razne napake na površini podlage ali večji skupki depozita, ki imajo zaradi večje mase večjo desorpcijsko energijo. Nukleacija tankih plasti je odvisna od razmerij naslednjih treh medatomskih vezavnih energij: (a) izparilne energije snovi (E_{izp}) iz katere nastane tanka plast, preračunane na en atom (to je energija kemijske vezi med atomi te snovi); (b) aktivacijske energije desorpcije (E_{des}), posameznega atoma depozita s podlage, ki podaja energijo kemijske vezi med atomi depozita in atomi podlage; (c) aktivacijske energije difuzije (E_{dif}) oz. selitve posameznega atoma depozita po površini podlage. Plasti rastejo otokasto (Volmer-Webrov mehanizem), če so vezne sile med atomi in molekulami depozita veliko močnejše od veznih sil med temi atomi in atomi podlage in dvodimenzionalno (Frank-van der Merwejev mehanizem), če so slabše.

Na sliki 1 je shematsko prikazano nekaj značilnih postopkov ionskega prekrivanja /29/. Pri t.i. enostavnem ionskem prekrivanju kovinski atomi, ki izparevajo iz izvira, ionizirajo pri prehodu skozi področje katodne plazme, ki jo ustvarimo posebej v ta namen. Stopnja ionizacije



Slika 1. Shematični prikaz postopkov ionskega prekrivanja, ki se uporabljajo za pripravo trdih prevlek /45/ (črtkano je označeno področje plazme): 1 - enostavno ionsko prekrivanje, 2 - ionsko prekrivanje z elektronskim curkom, 3 - aktivirano reaktivno napajanje, 4 - ionsko prekrivanje z votlo anodo, 5 - aktivirano reaktivno napajanje z napetostjo na podlagah, 6 - ionsko prekrivanje z lokom iz votle katode, 7 - RF-aktivirano ionsko prekrivanje, 8 - tetrodni sistem za ionsko prekrivanje, 9 - nanašanje s katodnim lokom, 10 - magnetronsko naprševanje, 11 - ionsko mešanje z ionskim curkom, 12 - nanašanje z ionskim curkom

kovinskih atomov je zelo majhna (0.1 do 1 %). Kadar napajamo z elektronsko puško, potem so vpadni elektroni tisti, ki ionizirajo kovinske in dušikove atome, vendar je bistvena razlika med visoko- in nizkonapetostno elektronsko puško; nizkoenergijski elektroni močneje ionizirajo plin.

Dodatno razelektritev v sistemu lahko ustvarimo z RF (radiofrekvenčnim) generatorjem - govorimo o aktiviranem ionskem prekrivanju /30/.

Visoko stopnjo ionizacije dosežemo, kadar izvir segrevamo z nizkonapetostnim (nekaj 100 V) in zelo močnim (100 A) elektronskim curkom /19,31/. Po tem principu deluje Balzersova naprava BAI 730 v Centru za trde prevleke v Domžalah, ki sem jo uporabil za pripravo nekaterih vzorcev s prevleko TiN. Napravo odlikuje visoka stopnja ionizacije ($2-5 \times 10^{14}$ ionov/cm³, tj. ≈50%), velika hitrost nanašanja (1-15 nm/s), velika ponovljivost, visoka kvaliteta prevlek in fleksibilnost naprave.

Atome kovinske tarče lahko uparimo tudi z nizkonapetostnim in močnim katodnim lokom/32,33/. Izvir materiala je ena ali več katod. Z močno iskro, ki naključno potuje po površini katode, dobimo lokalno staljena področja z gosto kovinsko plazmo, iz katere izpareva material. Stopnja ionizacije je izjemno velika (od 30 do 100%). Slaba

stran te metode pa je, da iz tarče poleg posamičnih atomov izparevajo tudi gručaste atome, zato je mikrostruktura tako pripravljenih plasti kapljčasta. Ideja za uporabo točkastega katodnega loka za pripravo trdih prevlek je prišla iz bivše SSSR (t.i. "PUSK" sistem). Licenco so odkupili ameriški podjetji MULTI-ARC in VAC-TEC ter INTERATOM iz Nemčije.

Pri magnetronskih napravah /34,35/ za pripravo trdih prevlek je odličen aktivacijski medij gosta plazma, ki je z magneti osredinjena v bližini tarče. Čeprav se magnetronsko naprševanje že dolgo časa uporablja za pripravo dekorativnih prevlek na osnovi TiN in drugih trdih prevlek ter difuzijskih zapor v mikroelektroniki, pa se pri pripravi trdih prevlek za zaščito orodij ni uveljavilo. V konvencionalnih magnetronih je plazma zgoščena v prostoru pred tarčo, zato je gostota toka ionov na podlage majhna. Tako pripravljene plasti so zato preveč porozne, imajo stebričasto mikrostrukturo, pa tudi oprijemljivost na podlagi je slaba. Problem je bil rešen šele pred nekaj leti, ko je bil razvit t.i. "unbalanced" magnetronski sistem /36,37,38/. Bistvo tega sistema je povečana gostota plazme v bližini podlag (orodij), kar dosežemo z asimetrično namestitvijo permanentnih magnetov. Ta izpopolnjena tehnika omogoča nanos gostih plasti, brez stebričaste mikrostrukture in z močno adhezijo na pod-

lago. Velika prednost magnetronskega naprševanja je v možnosti enostavne priprave večkomponentnih trdih prevlek (npr. TiAlN), saj lahko za izvir uporabimo kar zlitino z ustrežno sestavo.

V praksi se uporabljajo tudi naprave, ki namesto visokonapetostne in nizkotokovne elektronske puške uporabljajo nizkonapetostni in visokotokovni izvir elektronov, ki ga poznamo pod imenom votla katoda (hollow cathode) /39,40/. Stopnja ionizacije je lahko večja od 50%. Komericalne naprave te vrste je razvilo japonska podjetje Ulvac.

Narejenih je bilo tudi več poskusov nanašanja trdih prevlek z laserjem /41,42/. Za uspešno nanašanje potrebujemo npr. pulzno delujoči XeCl (valovna dolžina 308 nm) ali ArF (193 nm) eksajmerski laser. Potrebna gostota energije za napajanje, npr. TiN, je 4-5 J/cm², čas trajanja enega pulza okrog 40 ns, število pulzov pa okrog 100 na sekundo. Prednost priprave trdih prevlek z laserskim curkom je nizka temperatura nanašanja (<70°C), slabost pa predvsem majhna površina podlag, na katere lahko naneseemo homogeno plast.

Namesto razelektritve, ki zahteva relativno visok delovni tlak argona, so lahko izvir ionov ionske "puške" (ionski

izviri s širokim snopom) /43,44/. Obstreljevanje plasti z nizkoenergijskimi ioni in nevtralnimi delci z veliko energijo (od nekaj eV do nekaj keV) zelo izboljša oprijemljivost in mikrostrukturo prevlek. Ionski curek pa lahko uporabimo tudi za naprševanje prevlek.

Naprave za ionsko prekrivanje se razlikujejo tudi po načinu segrevanja podlag (segrevamo lahko z elektroni, ioni ali infra grelniki) in po načinu čiščenja podlag pred nanosom prevleke (jedkanje z ioni argona ali s kovinskimi atomi).

4 Sklepi

Meja med kemijskimi in fizikalnimi (vakuumskimi) postopki nanašanja se je v zadnjem desetletju močno zabrisala. Sestavni del kemijskih postopkov je postala plazma, medtem ko so osnova modernih fizikalnih metod vse bolj zapletene kemijske reakcije /45/.

V tabeli 2 so izpisane bistvene lastnosti kemijskih, fizikalno-kemijskih in fizikalnih postopkov nanašanja trdih prevlek. V tabeli 3 pa je narejena primerjava med fizikalnimi (vakuumskimi) postopki, ki temeljijo na napajevanju oz. na naprševanju.

Tabela 2. Značilne lastnosti kemijskih (CVD), fizikalno-kemijskih (PACVD) in fizikalnih (PVD) postopkov nanašanja trdih prevlek.

	CVD	PACVD	PVD/ARPVD
Izhodne snovi	hlapljiv halogenid ali kovino-organske spojine, reaktivni in nevtralni plini	iste kot pri CVD	kovinska tarča ali elektroda, reaktivni in nevtralni plini
Tlak v reaktorju	60 Pa - 0.1 MPa	10-100 Pa	0.1-1 Pa
Temperatura podlage	800-1000°C	250-450°C	250-450°C
Hitrost nanašanja	0.2-3 µm/min	10-50 nm/min	20-80 nm/min
Povprečna energija atomov oz. molekul	termična	termična	pri napajevanju: termična (0.2 eV), naprševanje: 1-10 eV
Transport atomov od izvira do podlage	laminarni tok in difuzija	laminarni tok in difuzija	molekularni tok (prosta pot je pri napajevanju večja od razdalje izvir-podlaga, pri naprševanju pa manjša, zato atomi doživijo več trkov z atomi plina)
Enakomernost nanosa plasti	odlična	dobra	slaba; potrebno je vrtenje podlag okrog izvira ali uporaba več izvirov
Prednost postopka	nanašanje pri atm. tlaku, kar omogoča prekrivanje votlin (odprtini) v podlagah; enostavno spreminjanje sestave, velika hitrost nanašanja, enostavno nizka cena naprave	nizke temperature nanašanja, večja reaktivnost, čistejša in gostejše plasti	nizke temperature nanašanja, "čista" metoda, možnost sinteze nestehiometričnih spojin
Slabe strani postopka	pogosto strupene in na zraku neobstoje snovi, ki jih potrebujemo za sintezo, visoka temperatura nanašanja, nekompatibilnost s številnimi podlagami, strupeni izpušni plini	pogosto strupene in na zraku neobstoje snovi, ki jih potrebujemo za sintezo, strupeni izpušni plini	drage naprave za nanos, spreminjanje sestave prevlek je vezano na menjavo dragih tarč ali izvirov

Tabela 3. Primerjava osnovnih fizikalnih lastnosti naprevanja in naprševanja

Naprevanje	Naprševanje
Uparitev atoma depozita	
1. S segrevanjem z elektronskim curkom, katodnim lokom ali laserjem	1. Ionsko obstreljevanje
2. Energija izparjenih atomov: $E=0.1$ eV pri 1200K	2. Energija razpršenih atomov: $E=1-10$ eV
3. Hitrost napor. ($M=50$, $T=1500K$ in $P=10^{-3}$): $\approx 1.3 \times 10^{17}$ at./cm ² s	3. Hitrost naprševanja (pri 1 mA/cm ² in $Y = 2$ at./ion) $\approx 3 \times 10^{16}$ at./cm ² s
4. Kotna porazdelitev izparjenih atomov je kosinusna	4. Pri velikih hitrostih naprševanja je kotna porazdelitev razpršenih atomov kosinusa
5. Disociacija spojin, razgradnja zlitin, sestava plasti odstopa od sestave snovi v izviro	5. Delna disociacija spojin, sestava plasti ustreza sestavi tarče
Plinska faza	
1. Izparjeni atomi potujejo v visokem ali ultra visokem vakuumu ($\sim 10^{-4}-10^{-6}$ Pa)	1. Delovni tlak argona (0.1-1 Pa)
2. Prosta pot je večja od razdalje med podlago in izviro	2. Prosta pot je manjša od razdalje med tarčo in podlago, zato razpršeni atomi na poti o podlag doživijo več trkov
Kondenzacija plasti	
1. Atomi, ki se kondenzirajo, imajo relativno nizko energijo	1. Atomi, ki se kondenzirajo, imajo relativno visoko energijo
2. Vgrajevanje atomov plina zanemarljivo	2. V plast se vgradi do nekaj at% atomov plina (argona)
3. Relativno velika kristalna zrna	3. Plasti imajo finoizmatno strukturo
4. Plasti rastejo s preferenčno orientacijo	4. Plasti so brez izrazite teksture
	5. Dobra oprijemljivost plasti na podlago

Ko izbiramo postopek nanašanja trdih prevlek, moramo upoštevati naslednje:

1. Nimamo optimalnega procesa za nanašanje trdih prevlek
2. Postopek nanašanja izberemo glede na vrsto orodja, ki ga želimo prekri
3. Najboljše rezultate dosežemo z napravami, ki imajo vgrajen nizkonapetostni elektronski lok ali pa več točkastih katodnih lokov
4. Fleksibilnost naprave (t.j. možnost istočasnega nanašanja trdih prevlek na orodja z najrazličnejšo geometrijo in velikostjo) mora biti čim večja
5. Ekonomičnost naprave je v največji meri odvisna od njene produktivnosti, t.j. delovne prostornine, hitrosti nanašanja, hitrosti segrevanja in hitrosti ohlajanja

5 Literatura

- /1/ B. Bhushan, B.K.Gupta, Handbook of Tribology, McGraw-Hill, Inc., Chap. 9, New York, 1991, 9.84-9.102
- /2/ H.K.Pulker, Verschleiss-Schutzschichten unter Anwendung der CVD/PVD-Verfahren, Expert Verlag, Sindelfingen, 1985
- /3/ A.I.Koren, Surface and Coat. Technol., 33 (1987), 31
- /4/ K.T.Rie and C.Brink, Proceed. of First Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen, 1988
- /5/ H.P.Lorentz, Proceed. of First Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen, 1988
- /6/ D.H.Jang, S.B.Kim and J.S.Chun, Proceed. of First Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen, 1988
- /7/ L. Shizhi, S.Yulong, X.Xiang and Y.Hongshun, Proceed. of First Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen, 1988
- /8/ J.Laimer, H.Störi and P.Rödhammer, J.Vac.Sci.Technol., A7 (5) (1989), 2952
- /9/ K.T.Rie and A.Gebauer, Materials Science and Engineering, A139 (1991), 61-66
- /10/ K.Reichelt and X.Jiang, Thin Solid Films, 191 (1990), 91-126
- /11/ J.Laimer, Vacuum, 40, 1/2 (1990) 27-32
- /12/ D.M.Matox, J.Appl.Phys., 34 (1963), 2493
- /13/ T.Spilvins, J.Vac.Sci.Technol., 17 (1), Jan/Feb 1980, 315
- /14/ H.Freller, Vacuum, Vol.45, N10/11, (1994), 997
- /15/ R.F.Bunshah and C.V.Deshpanndey, J.Vac.Sci.Technol. A3, (3), May/Jun 1985, 553
- /16/ F.Michel and et al., Rev.Sci. Instruments, 59 (1988), 1072

- /17/ R.F.Bunshah and C.Deshpandey, Physics of Thin Films, Vol.13, Academic Press, 1987, 59
- /18/ W.D.Westwood, Physics of Thin Films, Vol.14, Academic Press, 1989, 1-79
- /19/ W.D.Sproul, Surface and Coat. Technol., 33 (1987), 73-81
- /20/ H.K.Pulker, J.Vac.Sci.Technol. A 10(4), 1992
- /21/ P.Panjan in A.Cvelbar, Vakuumist, 26 (1992), 15-18
- /22/ S.Berg, T.Larson, C.Nender and H.O.Blom, J.Appl.Phys. 63, 63 (1988), 887
- /23/ S.Hofmann, Thin Solid Films, 191 (1990) 335-348
- /24/ J.N.Avaritsiotis and C.D.Tsiogas, Thin Solid Films, 209 (1992), 17-25
- /25/ G.M.Rao and S.Mohan, 42, 8/9 (1991) 515
- /26/ P.S.McLeod, Solid State Technology, Oct. 1983, 207
- /27/ E.Kansky, Nastajanje in rast vakuumskih tankih plasti, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Ljubljana, 1990
- /28/ K.Reichelt, Vacuum, 38/12 (1988) 1083-1099
- /29/ B.Zega, Zbornik radova 4. jug. simpozija o toplinskoj obradi metala, Plitvička jezera, 1986
- /30/ R.F.Bunshah, Proceed. of IX Int. Vacuum Congress, Madrid, 1983
- /31/ E.Moll, R.Buhl, H.K.Pulker and E.Bergman, Surface and Coatings Technol., 39/40 (1989), 475
- /32/ A.I.Grigorov, M.D.Kiselev, A.M..Dorodnov, Patent DE 2902142, 1978
- /33/ H.Randhawa and P.C.Johnson, Surface and Coatings Technol., 31 (1987), 303-318
- /34/ B.Zega, US Pat. 4, 374, 722 (1983)
- /35/ J.C.Vossen, W.Kern, ed., Thin Film Processes, Academic Press, New York, 1978
- /36/ B.Window and Sawides, J.Vac.Sci.Technol., A4 (1986), 453
- /37/ D.G.Teer, Surf.Coat.Technol., 36 (1988), 901
- /38/ S.Kadlec, J.Musil and W.D.Münz, J.Vac.Sci.Technol., A8 (3), May/Jun 1990, 1318
- /39/ F.J.R.Morley, H.R.Smith, J.Vac.Sci.Technol., 9 (1972), 1377
- /40/ S.Komiya, K.Tsurvoka, Jap.J.of Appl.Phys., Suppl.2/1 (1974), 415
- /41/ N.Biunno, J.Narayan, S.K.Hofmeister, A.R.Srivatsa and R.K.Singh, Appl.Phys.Lett. 54 (16) (1989), 1519-1521
- /42/ O.Auciello, T.Barnes, S.Chevacharoenkul, A.F.Schreiner and G.E.McGuire, Thin Solid Films, 181 (1989), 65-73
- /43/ S.Horita, T.Tujikawa, H.Akahori, M.Kobayashi and T.Hata, J.Vac.Sci.Technol. A 11(5) Sep/Oct 1993, 2452-2456
- /44/ W.Ensinger, B.Rauschenbach, Nucl. Inst. and Methods in Phys. Research B80/81 (1993), 1409-1414
- /45/ B.Zega, Zbornik XI. jug. vakuumskega kongresa, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Gozd Martuljek, 1990, 129-143

STROKOVNE EKSKURZIJE

Na sejah I.O. smo v zadnjih letih večkrat obravnavali možnosti ogleda zanimivih tovarn, tehnologij in raziskovalno razvojnih institucij doma in na tujem. Ker je težko uskladiti dogovor med tovarno in kandidati za udeležbo, medtem ko še ni znano niti število udeležencev niti datum izvedbe, želimo ugotoviti vsaj približno število interesentov.

Zato naprošamo bralce, da nam javijo, katere od spodaj naštetih ekskurzij (za katere že potekajo prva povpraševanja s strani DVTS) bi se najraje udeležili. Najbolj zaželeno označite z 1 ostale z 2, 3 in 4.

- A - Acroni (Jesenice) - metalurgija, plini
- B - Messer Griesheim (Ruše) - plinska tehnika
- C - Varian (Torino) - visokovakuumski elementi in sistemi
- D - vaš predlog

Glede na število preliminarne prijave bomo najprej (letos jeseni) pripravljali tisti ogled, za katerega bo največ zanimanja. Podatek o številu interesentov je pomemben tako za dogovor o obisku kot tudi za organizacijo prevoza. Prosimo, da nam javite vaš točen naslov, kamor vam bomo sporočili informacijo o datumu in pogojih ogleda, ko bo le-ta dokončno dogovorjen. Odgovore pošljite na naslov:

DVTS
Spruk Sonja ali Koller Lidija
Teslova 30
61111 LJUBLJANA
(tel.263-461 int. 251 ali 258)

A.P.

Naročnike Vakuumista prosimo, da čim prej poravnate naročnino za leto 1995.

Cena štirih števil, kolikor jih bo izšlo v letu, je 1000,00 SIT.