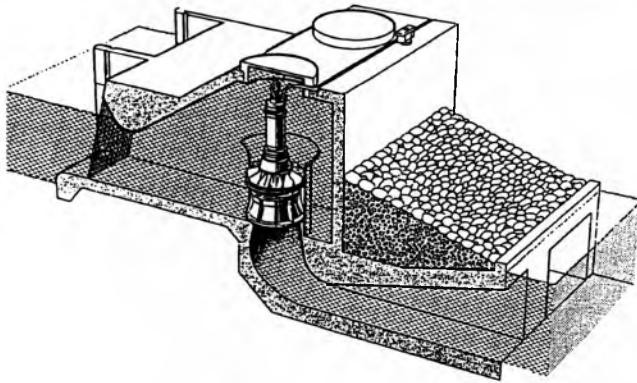


Sl. 37. Sifonska izvedba cijevne turbine malog učina. 1 ulazna rešetka, 2 zapornica, 3 generator, 4 multiplikator, 5 podlačni ventil, 6 turbinsko radno kolo, 7 vakuumska pumpa, 8 difuzor



Sl. 38. Smještaj Kaplanove turbine malog učina u podlačnoj turbinskoj komori

PUMPNO-TURBINSKI STROJ

Pumpno-turbinski stroj može raditi kao pumpa ili kao turbina. U vrijeme manje potrošnje električne energije radi kao pumpa i pretvara višak električne energije u elektroenergetskom sustavu u potencijalnu vodnu energiju, pumpajući vodu na višu razinu. Tako se sprečava zaustavljanje baznih elektrana u vrijeme manje potrošnje (npr. termoelektrana) i posredno akumulira električna energija. Ostalo vrijeme pumpno-turbinski stroj nije u pogonu ili radi kao turbina pokrivajući dnevna vršna opterećenja.

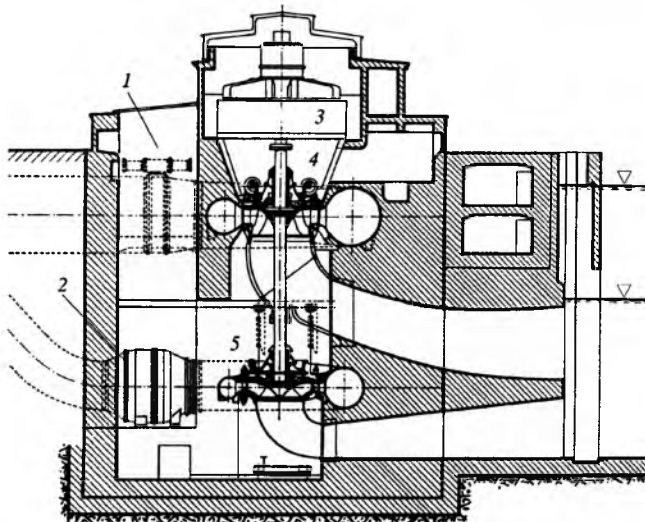
Pumpno-turbinski stroj može imati jedno radno kolo za oba režima rada ili odvojenu pumpu i turbinu ugrađenu na istom vra-

tilu (s istim motor-generatorom). Upotreba istog radnog kola za pumpni i turbinski rad nije pogodna zbog loše korisnosti u jednom ili oba režima rada, a pri većim geodetskim padovima nije ni moguća. Danas se stoga uglavnom primjenjuje stroj s pumpom odvojenom od turbine, što omogućuje optimalnu konstrukciju obaju radnih kola (sl. 39). Međutim, u takvoj se konstrukciji pojavljuju ventilacijski gubici u neaktivnom radnom kolu, koji se mogu smanjiti njegovim isključivanjem pomoću spojnice (može se samo s pumpom) ili stvaranjem vakuuma u neaktivnom dijelu stroja.

Vratilo pumpno-turbinskog stroja može biti okomito ili vodoravno. Okomit smještaj pogoduje zahtjevu da se zbog kavitacije pumpa postavlja niže od turbine. Brzina vrtnje stroja odabire se optimalno prema sporijem dijelu, tj. turbini. Ako se pumpno-turbinski stroj ugrađuje na mjestima s velikim geodetskim padom, može raditi s jednim stupnjem turbine, no potrebna je višestupanjaska pumpa.

LIT.: D. Horvat, Vodne turbine, knjiga I. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1965. – E. Mosony, Wasserkraftwerke. Band I. i II. VDI-Verlag, Düsseldorf 1966. – C. C. Warnick i dr., Hydropower Engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1984. – K. Begović, Hidroenergetska postrojenja. Uvod u probleme izbora opreme. DELIT, Sisak 1986. – F. Schweiger, J. Gregori, Developments in the Design of Kaplan Turbines. Water Power & Dam Construction, November 1987. – F. Schweiger, J. Gregori, Developments in the Design of Water Turbines. Water Power & Dam Construction, May 1989. – F. Schweiger, J. Gregori, Developments in the Design of Bulb Turbines. Water Power & Dam Construction, September 1989.

K. Franjić



Sl. 39. Pumpno-turbinski agregat s odvojenom pumpom i turbinom. 1 turbinski ventil, 2 pumpni ventil, 3 generator, 4 turbina, 5 pumpa

TVRDI METALI, sinterirani tehnički materijali koji se sastoje od vrlo tvrde faze, tj. od karbida ili nitrida prijelaznih metala IV. A, V. A i VI. A podskupine periodnog sustava kao tzv. nosilaca tvrdoće, i kobalta kao veznog metala. Izvanredna tvrdoća tih anorganskih materijala uglavnom je posljedica jakih međuatomnih veza u kristalnoj rešetki, zbog čega imaju visoko talište i velik modul elastičnosti, te malen koeficijent toplinskog rastezanja. Zahvaljujući tim svojstvima, otporni su na zaribanje, trošenje i visoke temperature, te se upotrebljavaju u širokom rasponu, od prahova za brušenje i poliranje do sinteriranih tvrdih materijala znatno smanjene krhkosti, od kojih se izrađuje brzo-rezni alat (v. *Alati*, TE I, str. 77). Tvrdi metali pripadaju širokoj skupini *tvrdih materijala*, koji se dijele na nemetalne i metalne.

Nemetalni tvrdi materijali međusobni su spojevi bora, dušika, ugljika i silicija te neki oksidi (aluminijev(III) oksid, torijev(IV) oksid, cirkonijev(IV) oksid). Toj skupini pripadaju i supertvrdi materijali borni nitrid i dijamant.

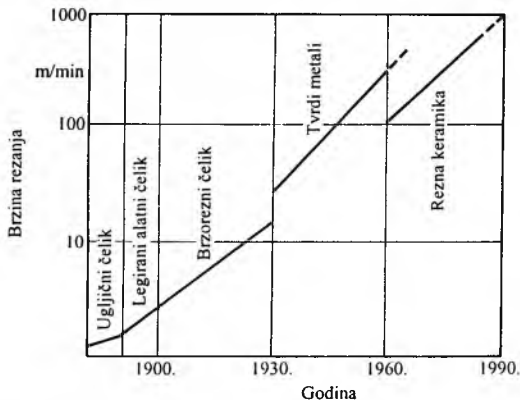
U *metalne tvrde materijale* ubrajaju se, osim tvrdih metala, i njihovi glavni sastojci, tj. karbidi i nitridi prijelaznih metala.

Zanimljivo je usporediti tvrdoću nekih tvrdih materijala. Tako je, npr., tvrdoća dijamanta 8000 HV, bornog nitrida 7000 HV, bornog karbida 3700 HV, silicijeva karbida 3500 HV, korunda 2800 HV, volframova karbida 2200 HV, tvrdih metala ~1500 HV, a alatnog čelika ~900 HV, dok je tvrdoća konstrukcijskog čelika samo ~100 HV.

Materijali pod nazivom *kermet* kombinacija su oksidne keramike i metala (v. *Sinteriranje*, TE12, str. 108). Za razliku od tvrdih metala, nisu vodiči elektriciteta, niti u većoj mjeri pokazuju druga metalna svojstva.

Tvrde metale uvela je u proizvodnju njemačka tvrtka Krupp 1926. godine pod imenom Widia (prema njem. *wie Diamant*). Bili su to tvrdi metali na osnovi volframnog karbida i kobalta (WC-Co), dok su se prvi višekarbidni tvrdi metali (WC-TiC-Co, WC-TiC-TaC-Co) pojavili 1931–1932. godine. Srodni se tipovi tvrdih metala upotrebljavaju i danas, i to jednokarbidni za obradbu metala koji daju kratku strugotinu (sivi lijev, obojeni metali), a višekarbidni za obradbu metala s dugom strugotinom (npr. čelik). Prije su se u tvrde metale ubrajali i steliti te tzv. lijevani tvrdi metali (v. *Alati*, TE 1, str. 77).

Sredinom 1960-ih godina brzine rezanja bitno se povećavaju (sl. 1) upotrebom tvrdih metala s prevlakom koja im poboljšava otpornost prema zaribavanju, korozivsku otpornost, izgled i dr.



Sl. 1. Povećanje brzine rezanja upotrebom novih materijala

PROIZVODNJA TVRDIH METALA

Tvrđi se metali proizvode sinteriranjem smjese komponenata u obliku praha, a postupak obično obuhvaća sljedeće faze: proizvodnju karbida i miješanje s kobaltom kao vezivom, prešanje smjese u približan ili konačan oblik, predsinteriranje, eventualno naknadno oblikovanje, završno visokotemperaturno sinteriranje, te najčešće i nanošenje prevlake.

Volframni karbid proizvodi se reakcijom volframnog praha i čađe u atmosferi vodika pri temperaturi od 1400–1700°C. Pri tom maseni udio ugljika mora biti 6,0–6,2%. Radni uvjeti, tj. čistoća vodika i temperatura bitno utječu na veličinu i raspodjelu čestica praha u konačnom proizvodu.

Ostali se karbidi proizvode reakcijom metalnih oksida i čađe u vakuumu ili u atmosferi vodika, i to titanov karbid (TiC) pri temperaturi višoj od 2000°C, a tantalni karbid (TaC) pri višoj od 1600°C. Umjesto titanova karbida često se proizvodi miješani karbid s jednakim masenim udjelom titana i volframa, jer je za tu reakciju dovoljna temperatura 1700°C.

Smjesa za proizvodnju tvrdih metala sastoji se od jednog ili više karbida, finog kobaltnog praha, te pomoćnog sredstva koje je potrebno pri prešanju (parafin, poli(vinil-alkohol) i dr.). Da bi se postigla jednolična raspodjela kobalta između karbidnih čestica, smjesa se u prisutnosti koje organske kapljevine melje do veličine čestica od 0,1–0,3 mm, osuši etanolom i tada je pogodna za prešanje. Okretne rezne pločice i drugi alati od tvrdih metala proizvode se prešanjem u matrice u automatskim prešama, ako to veličina i oblik dopuštaju, djelovanjem tlaka od 200–400 MPa i brzinom od 20–60 komada u minuti. Pri izravnom oblikovanju treba uzeti u obzir da se pri sinteriranju izmjere linearno smanjuju za 15–20%.

Predsinteriranje se provodi u atmosferi vodika ili u vakuumu pri temperaturi od ~600°C, na kojoj se uklanja pomoćno sred-

stvo dodano pri prešanju. Sinteriranje se nakon toga završava pri temperaturi od 1350–1700°C, već prema sastavu tvrdog metala (v. *Sinteriranje*, TE 12, str. 106). Materijal se često sinterira u peći kontinuirano i s automatskom kontrolom parametara, pri čemu se otpresci smještaju u grafitne posude. Takav je način nadzora i vođenja procesa vrlo složen, pa je opet u porastu upotreba diskontinuiranih, tandemski postavljenih peći, u kojima su praćenje sinteriranja, a posebice prilagodba različitim sastavima tvrdih metala jednostavniji.

Za dijelove koji se ne mogu odmah prešati u konačan oblik primjenjuje se neizravno oblikovanje. Otpresak približnih izmjera i oblika predsinterira se pri ~1000°C, čime se postižu mehanička svojstva pogodna za njegovo završno oblikovanje bušenjem, brušenjem i tokarenjem. Nakon toga slijedi završno sinteriranje.

Kako bi se dobili tvrdi materijali praktički bez pora, primjenjuje se vruće izostatsko prešanje. Njime se ravnomjernije raspodjeljuje tlak po čitavoj površini otpreska, što se postiže tlačanjem pomoću kapljevine. Tako se proizvode tvrdi metali za dinamički vrlo napregnute dijelove, npr. za oblikovanje metala. Iako se pritom smanjuje poroznost, ne mijenja se količina nepoželjnih primjesa u obliku uključaka. Kako i one pri dinamičkim opterećenjima djeluju kao inicijatori nastanka pukotina, posebnu je pozornost prilikom proizvodnje potrebno posvetiti čistoći komponenata i atmosfere.

Sredinom 1960-ih godina razvijeni su postupci prevlačenja tvrdih metala. Pod prevlačenjem se razumije nanošenje tankog sloja tvrdog materijala na neke tvrde metale radi poboljšanja njihove otpornosti prema zaribavanju. Između različitih postupaka najviše se primjenjuje kemijsko taloženje iz plinovite faze, poznato pod akronimom CVD (Chemical Vapour Deposition), u kojemu željeni sloj nastaje toplinskim raspadom pogodne smjese plinova. Tako se sloj titanova karbida dobiva od smjese titanova(IV) klorida i ugljikovodika (benzen, heptan) u prisutnosti vodika pri temperaturi od 900–1200°C. Pri nanošenju tvrdih slojeva na karbidne tvrde metale potrebno je spriječiti gubitak ugljika s površine tvrdog metala, jer bi inače kao međusloj nastala krhka η-faza sastava W₂Co₃C, koja bitno smanjuje savojnu čvrstoću. Zbog toga je poželjno da se ispod sloja titanova karbida kao međusloj difuzijom dobije miješani karbid volframa i titana. Prevlake se nanose u reaktoru gdje dijelovi od tvrdog metala vise ili leže na nosačima. Reaktor se zagrijava na potrebnu temperaturu, a ravnomjerno se nanošenje slojeva postiže pogodnim uvođenjem plinske smjese ili okretanjem dijelova. Naneseni sloj ne smije sadržavati mikropukotine jer znatno smanjuju čvrstoću i uzrokuju prijelom materijala.

Prevučeni tvrdi metali teško se leme na držač alata te se stoga uglavnom upotrebljavaju kao okretne rezne pločice koje se mehanički učvršćuju na alat. Debljina slojeva na okretnim pločicama iznosi najčešće 5–20 μm, što produljuje vijek trajanja tvrdog metala dva do tri puta ili povećava brzinu obradbe uz isti vijek trajanja. Najčešće se slojevi sastoje od titanova karbida, nitrida, karbonitrida te aluminijeva(III) oksida, a rjeđe od hafnijeva nitrida i niobijeva karbida. Sve se češće na tržištu pojavljuju i višeslojne prevlake u kojima svaki sloj ima određenu funkciju, a većina njih povećava otpornost osnovnog metala prema zaribavanju. Aluminijev(III) oksid pridonosi tom učinku zbog otpornosti prema oksidaciji i zadržavanja velike tvrdoće pri povišenoj temperaturi. Slojevi titanova nitrida, osim velike tvrdoće, imaju i lijepu zlatnožutu boju, pa često služe kao završna prevlaka.

Rubovi matrica za vučenje žica i šipki, zbog naravi njihove upotrebe, brzo se troše. Međutim, boriranjem se vijek trajanja matrica produljuje dva do četiri puta. Difuzijom bora kroz površinu nastaje u reakciji s kobaltom sloj kobaltnog(III) borida i kobaltnog(VI) borida debljine 15–60 μm, pri čemu se Vickersova tvrdoća povećava za ~700 HV. Nakon brušenja i poliranja boriranje se može ponoviti.

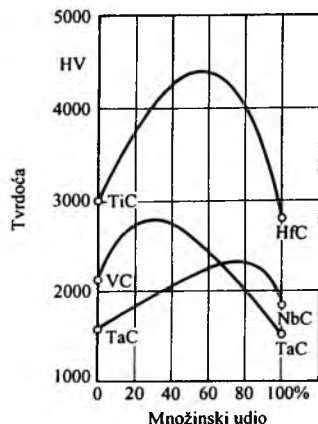
Osim kemijskog taloženja, primjenjuju se i fizikalni postupci nanošenja slojeva, među kojima su poznatiji napanje i ionsko nanošenje slojeva. Njihova je prednost u tome što su radne temperature niže, a nedostatak što je teže postići jednoličnu debljinu slojeva zbog usmjerene struje čestica.

Sinterirani tvrdi metali vrlo se teško obrađuju, i to samo elektroerozijskim postupkom te upotrebom alata od silicijeva karbida ili dijamanta.

SASTAV I MIKROSTRUKTURA TVRDIH METALA

Osnovna je komponenta mikrostrukture tvrdih metala vrlo tvrda faza (uglavnom karbid), koja ima dobru električnu i toplinsku vodljivost i pozitivan toplinski koeficijent električnog otpora, što je općenito karakteristično za metale. Ta svojstva u široko područje homogenosti pokazuju njihovu sličnost s međumetalnim spojevima.

Karbidi i nitridi metala IV. A i V. A podskupine periodnog sustava (Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta) kristaliziraju uglavnom u kubičnom, a karbidi VI. A podskupine (Cr, Mo, W) u heksagonskom sustavu. Izomorfni kubični karbidi daju međusobnim miješanjem kristale mješance različitih sastava (sl. 2), a u području gdje se eventualno ne miješaju često se tvrdoća povećava. Karbidi kubičnog sustava mogu se miješati s volframnim karbidom, pri čemu nastaju kubični kristali mješanci. Tako npr. titanov karbid pri 1400 °C otapa jednaku količinu volframnog karbida.



Sl. 2. Ovisnost tvrdoće karbidnih kristala mješavnica o njihovu sastavu

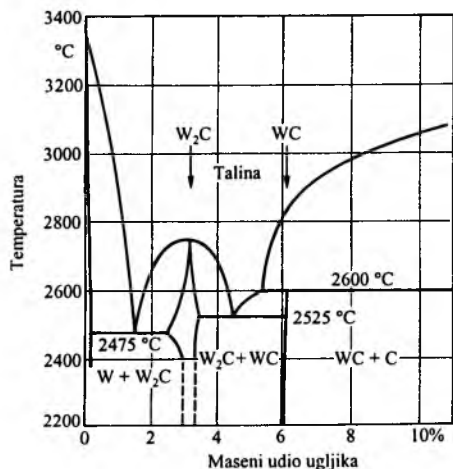
Tvrda se faza mnogo bolje otapa u rastaljenom veznom metalu nego obratno, a topljivost ovisi o temperaturi. Najveću topljivost pokazuje volframni karbid u kobaltu (tabl. 1), pa je to jedan od razloga što se tvrdi metali sastoje upravo od tih komponenata.

Tablica 1

TOPLJIVOST KARBIDA U KOBALTU, NIKLU I ŽELJEZU U ČVRSTOM STANJU (PRI 1250 °C)

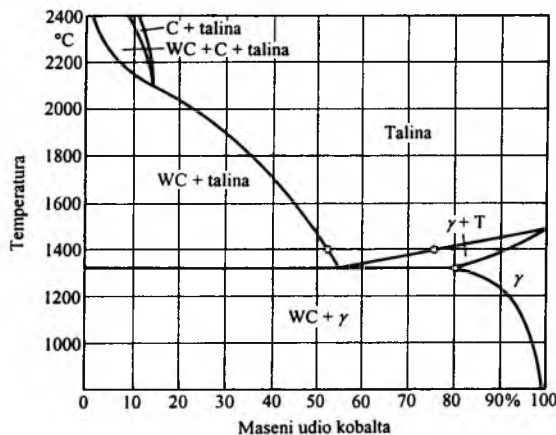
Metal	Maseni udio otopljenih karbida %							
	WC	TiC	Smjesa WC:TiC=1:1	TaC	NbC	VC	Mo ₂ C	Cr ₃ C
Kobalt	22	1	2	3	5	6	13	12
Nikal	12	5	5	5	3	7	8	12
Željezo	7	0,5	0,5	0,5	1	3	5	8

Volframni karbid raspada se pri temperaturi nižoj od tališta (sl. 3), pa se proizvodi sinteriranjem pri nižoj temperaturi



Sl. 3. Fazni dijagram sustava W-C

(1300...1700 °C). Pri 700 °C kobalt počinje otapati volframni karbid, tako da prilikom sinteriranja postoji tekuća faza zasićena volframovim karbidom (sl. 4) koja ispunjava prostor između čestica karbida. Nakon završetka procesa obujamni udio šupljina nije veći od 1%. Hlađenjem na temperaturu nižu od one za sinteriranje kristalizira najveći dio u kobaltu otopljenog volframnog karbida, a preostali dio stabilizira kubičnu modifikaciju kobalta, koja bi se na temperaturi nižoj od 417 °C preoblikovala u heksagonsku. Zbog različitih koeficijenata toplinskog rastezanja kobalt se nakon hlađenja nalazi pod vlačnim, a kristali volframnog karbida pod tlačnim naprezanjem. Zbog toga se pri mehaničkom opterećenju smanjuje mogućnost loma krhke karbidne komponente.



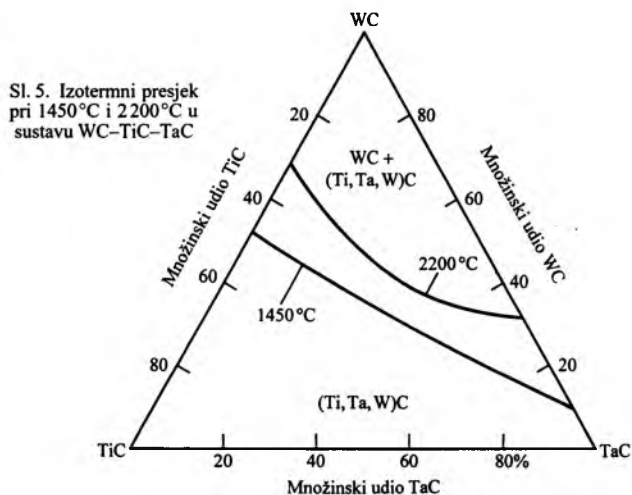
Sl. 4. Fazni dijagram sustava WC-Co

U sustavu volfram-ugljik-kobalt maseni je udio ugljika u volframnom karbidu 6,08...6,20, dok je stehiometrijski maseni udio 6,13%. Izvan tog područja nastaju međumetalni spojevi i složeni karbidi (npr. η -W₃Co₃C) ili se izlučuje grafit, a savojna se čvrstoća smanjuje.

U složenom sustavu WC-TiC-Co volframni karbid se prilikom sinteriranja otapa u titanovu karbidu do zasićenja. Uobičajeni trgovački tvrdi metali te skupine sastoje se od tri faze: od kubičnog karbida mješavnica (W,Ti)C, heksagonskog volframnog karbida (WC) i kobalta zasićenog tvrdom fazom. Ako se karbidu mješancu (W,Ti)C doda tantalov karbid, nastaje novi karbid mješancu (W,Ti,Ta)C, koji ima suženo područje postojanja (sl. 5).

Tvrdi metali na osnovi titanova karbida i nikla kao veznog metala s dodatkom molibdenova(II) karbida drukčije su strukture. Oko primarnih zrna titanova karbida nastaje pri sinteriranju omotač od kubičnih kristala mješavnica (Ti,Mo)C_{1-z} (z je odstupanje sastava od omjera 1:1), koji su, za razliku od titanova karbida, tijesno prekriveni niklom.

Boridi dosada nisu upotrijebljeni kao nosioci tvrdoće. U prisutnosti metala srodnih željezu ne postoji područje ravnoteže između tvrde faze i veznog metala, već nastaju krhki ternarni proizvodi.



Sl. 5. Izotermni presjek pri 1450 °C i 2200 °C u sustavu WC-TiC-TaC

MEHANIČKA SVOJSTVA TVRDIH METALA

Mehanička svojstva tvrdih metala ovise u prvom redu o njihovom sastavu. Tako se npr. povećavanjem udjela kobalta u tvrdom metalu tipa WC-Co povećava njegova savojna čvrstoća, a smanjuju mu se gustoća, modul elastičnosti, Vickersova tvrdoća i tlačna čvrstoća (tabl. 2). Modul elastičnosti E ovisi o vrijednostima modula elastičnosti pojedinih faza, a vrlo malo o rasporedu zrna, čime se razlikuje od čvrstoće, tvrdoće i ponašanja pri prijelomu.

Tablica 2
SVOJSTVA TVRDIH METALA TIPa WC-Co

Maseni udio kobalta %	Gustoća g/cm ³	Vickersova tvrdoća HV	Savojna čvrstoća N/mm ²	Tlačna čvrstoća N/mm ²	Modul elastičnosti kN/mm ²
2,5	15,3	1780	1100	—	660
6	14,9	1550	1600	5300	620
9	14,6	1450	1850	4900	580
12	14,3	1300	2000	4400	570
15	13,9	1250	2200	4000	530
20	13,6	950	2400	3700	490
25	13,2	850	2400	3400	460

Mikrostruktura tvrdog metala, npr. tipa WC-Co, može se karakterizirati srednjom linearnom veličinom zrna tvrde faze (l_{WC}) i srednjom debljinom sloja veznog metala između zrna (d_{Co}), a njihov je omjer jednak omjeru obujamnih udjela tvrde faze (φ_{WC}) i veznog metala (φ_{Co}):

$$\frac{l_{WC}}{d_{Co}} = \frac{\varphi_{WC}}{\varphi_{Co}} \quad (1)$$

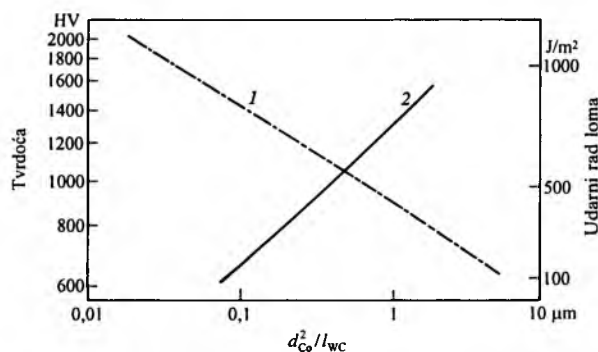
Između veličine zrna, prijelomne žilavosti K_{IC} i udarnog rada loma G_{IC} postoji eksperimentalno određena ovisnost:

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{\pi E} \approx \frac{d_{Co}^2}{l_{WC}} \quad (2)$$

U skladu s izrazom (1) proizlazi da udarni rad loma raste jednolično s porastom vrijednosti omjera d_{Co}^2/l_{WC} . To pokazuje da na energiju prijeloma znatno utječe rad utrošen pri plastičnoj deformaciji veznog metala. Nasuprot tomu, s obzirom na isti omjer, Vickersova tvrdoća opada (sl. 6):

$$HV = 877 \left(\frac{d_{Co}^2}{l_{WC}} \right)^{-\frac{1}{5}} \quad (3)$$

Za tvrde je metale karakteristično da im se tvrdoća i prijelomna žilavost mijenjaju u suprotnom smislu.



Sl. 6. Ovisnost tvrdoće (1) i udarnog rada loma (2) o omjeru d_{Co}^2/l_{WC}

Savojna čvrstoća R_{ms} tvrdih metala povezana je s načinom nastanka pukotine i njezinim širenjem prema izrazu

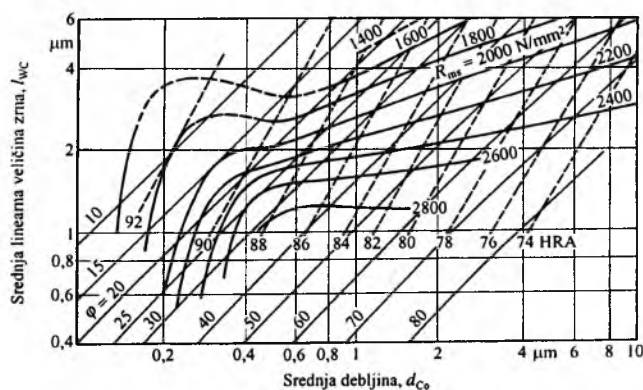
$$R_{ms} = (1-k) \frac{R_{WC}}{e^{1/m} \sigma_{WC}} \quad (4)$$

gdje je konstanta materijala m Weibulov parametar statističke pouzdanosti, R_{WC} vlačna čvrstoća tvrde faze, koja ovisi i o veličini zrna, σ_{WC} lokalni porast naprežanja u zrnima volframova karbida uzrokovan opterećenjem, a k je kontinuitet tvrde faze (omjer površina dodira karbidnih zrna prema njihovoj ukupnoj površini), a može se približno odrediti prema izrazu

$$(1-k) = \frac{l_{WC} \cdot \varphi_{Co}}{d_{Co}}, \text{ ako je } d_{Co} < d_{Co}^* \text{ i } \varphi_{WC} > \varphi_{Co}, \quad (5)$$

gdje je d_{Co}^* kritična vrijednost debljine kobalnog sloja među zrnima, tj. ona vrijednost uz koju je čvrstoća najpovoljnija.

Uz konstantnu veličinu zrna volframnog karbida savojna čvrstoća raste s porastom udjela kobalta, osim kad je kobalta vrlo mnogo. Za bilo koji udio veznog metala postoji određena veličina karbidnih zrna i debljina kobalnog sloja među zrnima pri kojima se postiže optimalna tvrdoća i savojna čvrstoća. Najčešće kritična vrijednost d_{Co}^* iznosi 0,3...0,4 μm (sl. 7).



Sl. 7. Ovisnost mehaničkih svojstava o mikrostrukturnim parametrima tvrdog metala WC-Co; R_{ms} savojna čvrstoća, HRA Rockwellova tvrdoća, φ obujamni udio

U duktilnom području ($d_{Co} > d_{Co}^*$) savojna čvrstoća raste s povećanjem stupnja raspršenosti karbidne faze, tj. sa smanjenjem veličine karbidnog zrna. Smanjenjem vrijednosti omjera d_{Co}^2/l_{WC} smanjuje se i prijelomna žilavost tvrdog metala, a povećava mu se čvrstoća. Ako se veličina karbidnih zrna smanji toliko da debljina kobalnog sloja postane manja od kritične debljine d_{Co}^* , tada tanki slojevi veznog metala svojom plastičnom deformacijom ne mogu spriječiti širenje pukotine. Povećanjem površine međusobnog dodira karbidnih zrna tvrdi metal postaje sve podložniji nastanku pukotina, te mu se smanjuje savojna čvrstoća. U području krhkog loma savojna čvrstoća i prijelomna žilavost sličnih su karakteristika.

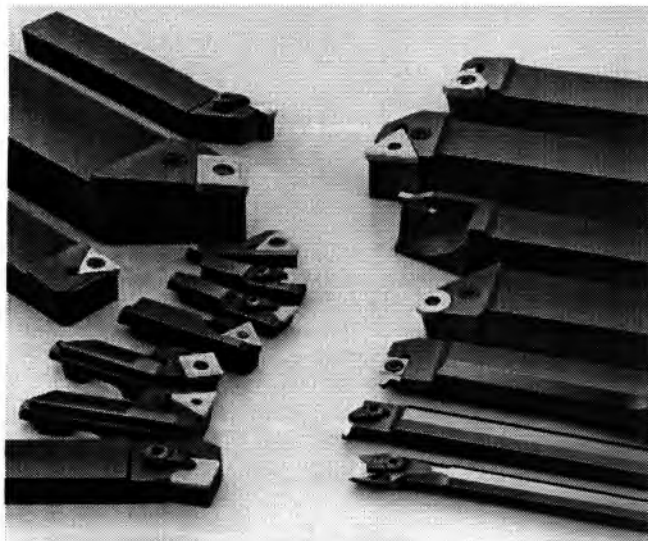
Pogreške kao što su uključci, zarez i nejednoličnosti u raspodjeli zrna smanjuju savojnu čvrstoću, što se očituje u nejednakenosti kvalitete tvrdih metala, a posebno u umoru materijala zbog dinamičkog izmjeničnog opterećenja. Smanjeni broj izmjena opterećenja ΔN koji materijal s pogreškama može izdržati povezan je sa smanjenom savojnom čvrstoćom ΔR_{ms} :

$$\frac{\Delta N}{N} = (n-2) \frac{\Delta R_{ms}}{R_{ms}} \quad (6)$$

gdje je N broj izmjena dinamičkog opterećenja koje materijal bez pogrešaka (i sa savojnom čvrstoćom R_{ms}) može sa sigurnošću izdržati, a n konstanta materijala koja ovisi o udjelu krhkog loma. Zbog bitnog udjela krhkog loma pri širenju pukotine, što je posljedica umora, vrijednost n je nepovoljnija ($n \approx 15$). Ti odnosi vrijede za sobnu temperaturu, dok se pri povišenim temperaturama mogu znatno razlikovati. Tako tvrdi metali s najsitnijim karbidnim zrnima, usprkos velikoj tvrdoći na sobnoj temperaturi, pri 800 °C imaju zbog tzv. puzanja manju čvrstoću nego oni s velikim zrnima. Ti su odnosi još mnogo složeniji u višekarbidnim tvrdim metalima.

PRIMJENA TVRDIH METALA

Tvrđi se metali zbog svojih posebnih svojstava, u prvom redu zbog velike tvrdoće, upotrebljavaju pri različitim postupcima obradbe metala, kamena, plastike i drva (v. *Alati*, TĚ 1, str. 77). Pločica od tvrdog metala zalemi se na čelični nosač tokarskog



Sl. 8. Tokarski alati s okretnom pločicom od tvrdog metala

alata (sl. 8). Osim za vrlo male alate (npr. svrdla), sve se više upotrebljavaju okretne rezne pločice koje se mehanički učvršćuju na alatni držač. One su obično okrugle, trokutaste, romboidne, kvadratne i sl. i njihove se nove oštrice mogu okretanjem redom dovoditi u radni položaj pošto se prethodna oštrica istroši. U nekih strojeva postoji mogućnost automatske izmjene pločica iz spremišta na držaču, što omogućuje dulji neprekidan rad i manji gubitak radnog vremena. Rezne se pločice uglavnom ne bruse, ali su istrošene pločice važna sekundarna sirovina za izdvajanje volframa, kobalta i drugih metala.

Tvrđi se metali normiraju na različite načine, npr. prema normi ISO/TC-29/726 (tabl. 3). Za obradbu materijala s kratkom strugotinom (skupina primjene K) upotrebljavaju se tvrdi metali od

Tablica 3

TVRDI METALI ZA OBRADBU REZANJEM PREMA NORMI ISO/TC-29/726

Skupina primjene	Materijal	Područje primjene
P 01 P 10	Nelegirani i niskolegirani čelici, čelični lijev	fino tokarenje i bušenje velikom brzinom (do 1,7 m/s) s vrlo malim posmakom
P 20	Niskolegirani i visokolegirani čelici, temperni lijev	skidanje strugotine, rezanje navoja srednjom i velikom brzinom s malim posmakom
P 25		tokarenje srednjom i velikom brzinom uz srednji presjek strugotine
P 30 P 40 P 50		skidanje strugotine srednjom brzinom i s velikim posmacima u teškim uvjetima, blanjanje sivog lijeva
M 10 M 20		Tvrđi Mn-čelik, legirani i žilavi sivi lijev, austenitni čelik
M 30 M 40	Čelici za automate, austenitni čelik, toplinski otporne slitine, obojeni metali	skidanje strugotine malom brzinom i s većim posmacima uz veći presjek strugotine, blanjanje
K 01	Sivi lijev velike tvrdoće i polimerni materijali skloni zaribavanju	fino tokarenje i skidanje strugotine, blanjanje
K 10 K 20	Sivi lijev (tvrdoća > 200 HB), slitine Al-Si, obojeni metali, polimerni materijali, ugljene elektrode	tokarenje i skidanje strugotine te bušenje srednjom i velikom brzinom uz mali presjek strugotine
K 30 K 40	Sivi lijev, ukočeno drvo Drvo, obojeni metali	tokarenje, skidanje strugotine i blanjanje pri nepovoljnim uvjetima

čistog volframnog karbida s kobaltom (WC-Co), s masenim udjelom kobalta od 3...11% i veličinom zrna volframnog karbida od 0,5...5 μm, dok se za brušenje uglavnom upotrebljavaju sitnozrnate vrste (veličina zrna < 1 μm). Mali dodaci tantalnoga i vanadijeva karbida usporavaju rekristalizaciju zrna volframnog karbida za vrijeme sinteriranja, a time i rast zrna. Izrazito sitnozrnati tvrdi metali, u kojih je veličina mikroznata mnogo manja od 1 μm, odlikuju se velikom tvrdoćom pri sobnoj, a malom čvrstoćom pri povišenoj temperaturi.

Materijali s dugom strugotinom (skupina primjene P: većina konstrukcijskih čelika i čelika za poboljšanje, npr. termičkom obradom) obrađuju se višekarbidnim tvrdim metalima (npr. WC-TiC-TaC-Co), pri čemu niobij, koji često dolazi uz tantal, ne smeta do masenog udjela od 30%.

Za materijale koji se teško obrađuju, kao što su visokolegirani čelici i neki obojeni metali (skupina primjene M) upotrebljavaju se tvrdi metali sličnog sastava kao za skupinu P, ali s manjim udjelom titanova karbida. Te se vrste označavaju kao tvrdi metali šire namjene i pogodni su za obradbu materijala s kratkom i dugom strugotinom, ali su manje trajni.

Velike se količine tvrdih metala (pretežno tipa WC-Co) upotrebljavaju za izradbu valjaka, matrica i drugih dijelova veće mase. Ako mogućnost abrazivnog zaribavanja prevladava pred udarnim naprezanjem (sapnice uređaja za pjeskarenje, kugle za mljevenje, unutrašnja obloga mlinova, mješala), prednost imaju tvrdi metali s manje kobalta (područje primjene K 01...K 20). Katkad se od takvih materijala izrađuju sjedišta ventila, klizne prstenaste brtve, vodilice itd.

Od početka primjene tvrdih metala najvažnija je njihova upotreba u izradbi vučnih matrica (npr. za žice, šipke, profile). U proizvodnji fino vučenih proizvoda potrebna je veća čvrstoća na tlak i trošenje te najmanja površinska hrapavost u vučnoj šupljini. Zbog toga se tu upotrebljavaju tvrdi metali tipa WC-Co s manjim masenim udjelom kobalta (~2,5%) i malim karbidnim zrnom.

Za vučenje šipki i profila pogodnije su žilavije vrste tvrdih metala (do 25% Co), jer su opterećenja pri deformaciji mnogo veća nego pri vučenju finijih proizvoda. Matrice za prešanje (do 25% Co), hladno i toplo kovanje, rezni alati i sl. jako su opterećeni na zaribavanje, udarce i tlak. Zbog skupoće takvi se materijali upotrebljavaju tek onda kad se može postići barem deseterostruko dulje vrijeme upotrebe od onoga u alatnih čelika. Međutim, postižu se često i mnogo bolji rezultati, pa se, npr., u matrica za hladno kovanje vijaka postižu dvadeseterostruko do stotruko dulja vremena upotrebe. U te se svrhe primjenjuju tvrdi metali visoke žilavosti, u kojima je maseni udio veznog metala i do 30%, a veličina karbidnog zrna i do 10 μm. Vrijeme upotrebe može se katkad produljiti toplinskom obradom nakon sinteriranja. Ako se prekorači dopušteno naprezanje, mogu se i žilavije vrste tvrdih metala (tlačne čvrstoće 3 200...6 200 MPa) slomiti na mjestima slučajnih defekata. Zbog toga se svi jako opterećeni alati od tvrdog metala (matrice, vučne matrice) postavljaju u čelična kućišta. To posebno vrijedi za visokotlačne alate u sintezi dijamanata, gdje se katkad pojavljuju radni tlakovi veći od 5 GPa.

Tvrđi metali nalaze široku primjenu i pri dubokim bušenjima Zemljine kore, pri kopanju ugljena i ruda, te pri dobivanju i obradbi kamena. Već prema načinu upotrebe alata primjenjuju se različite vrste tvrdih metala tipa WC-Co, najčešće s masenim udjelom kobalta od 6...17% i veličinom karbidnih zrna do 10 μm. Samo dijamantni alati po mnogim svojstvima nadmašuju alate od tvrdih metala.

Uvođenjem vrućeg izostatskog prešanja tvrdih metala proširila se mogućnost njihove upotrebe i na dinamički opterećenim alatima. Valjci od tvrdih metala za izradbu limova i žice imaju dulji vijek trajanja, pa količine proizvedene pomoću jednoga takvog valjka mogu biti dva i više puta veće od onih koje se dobiju upotrebom valjaka od drugih materijala. Zbog izvanredno glatke površine valjaka, valjane proizvode nije potrebno naknadno obrađivati.

LIT.: Cobalt Monograph. Centre d'information du cobalt, Bruxelles 1960. - R. Kieffer, F. Benesovsky, Hartmetalle. Springer-Verlag, Berlin 1965. - W. Schatt, Pulvermetallurgie Sinter- und Verbundwerkstoffe. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1979. - E. Hornbogen, Werkstoffe. Springer-Verlag, Berlin 1987. - B. Ilchner, Werkstoffwissenschaften. Springer-Verlag, Berlin 1990.