

Materiály s vysokou teplotou tavenia využívané v práškovej metalurgii

Elena Kantoríková, Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: elena.kantorikova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2763

Materials with a high melting point used in powder metallurgy

Abstract: Metals with a high melting point are frequently used materials in technical practice. Their fundamental advantage over other metal materials is their higher melting temperature, which exceeds the melting temperature of iron. Thanks to this physical property, such metals and their alloys can be used in environments where the components are subject to high thermal stress.

Keywords: powder metallurgy, refractory materials, mechanical properties.

ÚVOD

Typickým príkladom použitia vysokotavitelných materiálov sú žiaruvzdorné a žiarupevné materiály. Žiaruvzdorné materiály sú také, ktoré odolávajú vysokým teplotám a nemenia výrazne svoje rozmery. Žiarupevné materiály sú schopné pri vysokých teplotách prenášať silové zaťaženia. V súčasnej dobe sú zmienené vlastnosti často požadované. V mnohých prípadoch je technológia práškovej metalurgie (PM) jediná, ktorou sa dajú takéto vlastnosti dosiahnuť tak, aby spĺňali všetky mechanické, fyzikálne, chemické a ekonomické požiadavky. Príkladom môžu byť tepelné motory alebo meracia technika [1].

Medzi ďalšiu oblasť použitia kovov s vysokou teplotou tavenia patrí elektrotechnika. Mnoho elektrotechnických súčastí je počas pôsobenia elektrického prúdu vystavených vysokým teplotám, ktorým musia odolávať bez výraznej straty svojich vlastností počas celej svojej životnosti.

Najväčšie uplatnenie našla PM ťažkotaviteľných kovov pri výrobe elektrických kontaktov (najmä pre silnoprúdovú elektrotechniku). Elektrické kontakty sú súčasťou, od ktorých je požadovaná vysoká elektrická vodivosť, vysoká tepelná vodivosť, tvrdosť a odolnosť proti erózii elektrickým oblúkom. Tieto vlastnosti sú do určitej miery protichodné a spravidla ich nemožno dosiahnuť použitím jedného kovu. Napríklad pre veľké napätia, malé prúdy a časté prerušenia sa používa volfrám [2].

Elektrické vlákna vedú prúd pri vysokých teplotách. Preto sa najčastejšie zhotovujú z volfrámu alebo molybdénu. tieto kovy sú pre svoju vysokú teplotu tavenia (volfrám 3410 °C, molybdén 2610 °C) klasickými spôsobmi veľmi ťažko spracovateľné.

V druhom odseku sú uvedené niektoré technológie výroby práškov ťažkotaviteľných kovov a ich zliatin akými sú *Ti*, *Mo*, *W* alebo *Ta*.

1 KOVY S VYSOKOU TEPLITOU TAVENIA

Kovy s vysokou teplotou tavenia sú tie, ktorých teplota tavenia je vyššia, ako je v prípade železa (1536 °C). Podľa tohto kritéria sa tu zaraďujú *Ti*, *Zr*, *Hf*, *V*, *Nb*, *Ta*, *Mo*, *W* a *Re*. Technológia práškovej metalurgie sa uplatňuje pri spracovaní týchto kovov predovšetkým v prípade *Nb*, *Ta*, *Ti*, *Mo* a *W*.

Kovy s vysokou teplotou tavenia sa ťažko vyrábajú klasickou metalurgiou (procesom tavenia a odlievania). Veľmi vysoké teploty tavenia týchto kovov sťažujú ich premenu do kvapalného stavu. Kovy pripravené odlievaním majú vyšší obsah nečistôt, čo sa nepriaznivo odráža na ich mechanických vlastnostiach, často sú veľmi krehké. Pri ich výrobe pomocou PM možno podstatne znížiť teplotu prípravy a dosiahnuť vyššiu čistotu a lepšie vlastnosti. Práškové kovy sa vyrábajú redukciami pevných práškových oxidov vodíkom v tuhom stave a následným spekaním týchto práškov pri relatívne nižších teplotách [3].

Kovy s vysokou teplotou tavenia sa používajú predovšetkým pre elektrotechnický priemysel a pre konštrukčné aplikácie v oblasti vysokých teplôt. Podľa použitia ich môžeme rozdeliť na:

- kontaktné materiály s vysokou teplotou tavenia,
- konštrukčné materiály s vysokou teplotou tavenia.

Technológia práškovej metalurgie na prípravu konštrukčných kovov s vysokou teplotou tavenia sa

uplatňuje predovšetkým v prípade *Nb*, *Ta*, *Mo*, *W*. Aplikuje sa tak pre ich vysokú teplotu tavenia aj pre vysokú závislosť mechanických charakteristík týchto kovov od ich čistoty. Závislosť *Youngovho* modulu a pevnosti v ťahu vybraných vysokotavitelných kovov od teploty je zobrazená na Obr.1. Technológia PM umožňuje pripraviť tieto kovy v požadovanej čistote a s vlastnosťami, ktoré umožňujú ich ďalšie spracovanie bežnými tvárnymi procesmi do vyžadovanej formy, často na polotovary vo forme tyčí, drôtov, plechov, fólií a pod. [4]. Tieto kovy a ich zliatiny nachádzajú široké uplatnenie v mnohých oblastiach techniky, najmä v elektrotechnike a vákuovej technike (napr. tienenie pecí, výhrevné telesá pecí).

Volfrám a v menšej miere i molybdén vykazujú veľmi dobré pevnostné vlastnosti pri normálnej teplote a vynikajúce pevnostné vlastnosti pri zvýšených teplotách. Pevnosť vysoko čistého, tvárneného a následne žihaného *volfrámu* dosahuje pri $T = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ $R_m = 200\text{ MPa}$ a pri $T = 2200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_m = 100\text{ MPa}$. *Molybdén* dosahuje pri teplote $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ pevnosť $R_m = 200\text{ MPa}$. Pri použití týchto kovov pri zvýšených teplotách je však nutné zabrániť ich oxidácii, na ktorú sú náchylné. *Molybdén* začína v oxidačnej atmosfére oxidovať od $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, nad $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ je oxidácia veľmi intenzívna. *Volfrám* začína oxidovať pri $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ a oxidácia je intenzívna pri $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z tohto dôvodu musia byť súčiastky z *W* a *Mo*, ktoré majú pracovať v oxidačnej atmosfére, pokryté ochrannými povlakmi [5]. Mechanické vlastnosti *W*, *Mo* a *Ta* sú uvedené v tab. 1. Použitie vysokotavitelných kovov a ich zliatin je v tab. 2.

Tab. 1. Mechanické vlastnosti *W*, *Mo* a *Ta*

Vlastn.	stav	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Ta</i>
<i>HV</i>	spekaný	250	160	90
	kovaný	500	240	
	plech, valcovaný	500	350	
	plech, žiháný (rekryštalizovaný)	380	300	
<i>R_m</i> [MPa]	spekaný	150	-	200
	kovaný	1500	1000	
	drôt, ťahaný	4100	2500	
	drôt, žiháný	1100	1000	
<i>E</i> [%]	drôt, ťahaný	1 ÷ 4	2 ÷ 5	
	drôt, žiháný	-	20	
<i>E</i> [MPa]	pri 20 °C	39·10 ⁴	35·10 ⁴	19·10 ⁴
<i>G</i> [MPa]		15·10 ⁴	13·10 ⁴	

Technológia spracovania konštrukčných kovov s vysokou teplotou tavenia spočíva vo výrobe práškového kovu, jeho lisovaní a následnom spekaní,

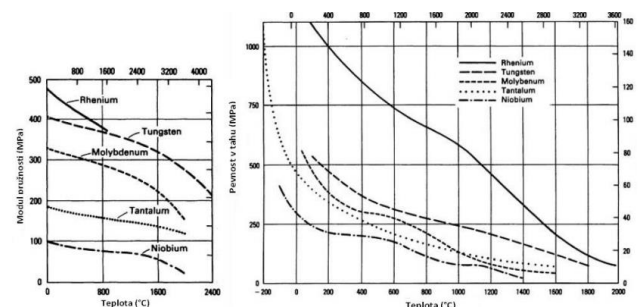
ktoré prebieha spravidla dvojstupňovo. Napríklad pri *volfráme* sa realizuje predspekávanie pri teplote $T = 1000 \div 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ a konečné spekanie pri teplote $T = 2800 \div 3100\text{ }^{\circ}\text{C}$, pri *molybdéne* pri $T = 2200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Speká sa v ochrannej atmosfére a vo vákuu [6].

Tab. 2. Hlavné oblasti použitia vysokotavitelných kovov a ich zliatin

Materiál	Použitie
<i>W</i> , <i>Mo</i> , <i>Mo-W</i> , <i>W-20Ag</i>	dýzy rakiet
<i>Ta-10W</i> , <i>Ta-10W-10Hf</i>	spaľovacie komory rakiet
<i>Nb</i>	dýzy a konštrukčné prvky rakiet
<i>W</i> , <i>W-ThO₂</i> , <i>W-La₂O₃</i>	žiarovky, výroba elektrónok
<i>Mo-0,5Ti-0,1Zr-0,5C</i>	sklárske priemysel, vysokoteplotné materiály, technika liatia, striekanie a tvárnenie kovov
<i>Mo-12Ti-0,3Zr-0,15C</i>	
<i>Mo-30W</i> , <i>Ta-10W-2,5Hf-0,01C</i>	
<i>Nb-10W-1Zr-0,1C</i>	
<i>Ta</i> , <i>Mo</i> , <i>W</i> , <i>Mo-30W</i>	chemický priemysel
<i>W</i> , <i>Mo</i> , <i>Nb</i> , <i>Ta</i>	elektrotechnika, stavba pecí, výhrevné drôty, plechy

Tvárniteľnosť *volfrámu* a *molybdénu* je veľmi závislá od ich čistoty. Veľmi nepriaznivo sa prejavuje obsah intersticiálnych prvkov ako sú *H*, *O*, *N* a *C*. Prechodová teplota pre *W* a *Mo* s čistotou 99,95 je medzi $T = 150 \div 350\text{ }^{\circ}\text{C}$. *Niób* a *tantal* sú dobre tvárniteľné až do obsahu až do obsahu nečistôt (*O* + *N* + *C*) do 0,2 %.

Do *volfrámu*, ktorý je určený pre prácu pri vysokých teplotách (vlákna žiaroviek a pod.), sa pridávajú pri jeho výrobe vysokotavitelné oxidy (*ThO₂*, *Al₂O₃*, *Y₂O₃*, *La₂O₃*, *CaO*, *K₂O*) v množstvách 0,03 ÷ 1,5 % hm. Oxidy zabezpečujú disperzné spevnenie a zabraňujú zhrubnutiu štruktúry *volfrámu*, a tým aj nežiadúcim zmenám mechanických vlastností [7].



Obr. 1. Závislosť *Youngovho* modulu a *R_m* vybraných kovov od teploty

1.1 Materiály na báze titánu

Titán je polymorfny kov vyskytujúci sa v dvoch kryštalografických modifikáciách α a β . Nízokoteplotná α -fáza má hexagonálnu tesne usporiadanú mriežku (*H12*), vysokoteplotná β -fáza má kubickú priestorovo centrovanú (*K8*). Teplota

transformácie α/β je 882 °C. Všetky priemyselne vyrábané zliatiny sa rozdeľujú do 6 skupín. Pomocou *PM* sa okrem technicky čistého *Ti* vyrábajú iba pseudo α zliatiny *Ti* a $\alpha + \beta$ zliatiny martenzitického typu.

Ti a jeho zliatiny sa vyznačujú pomerne vysokými hodnotami mechanických vlastností [8, 9]. Mechanické vlastnosti závisia od štruktúry a chemického zloženia a hodnoty medze klzu sa môžu pohybovať od 400 MPa do 1400 MPa pri ťažnosti *A* od 10 % do 30 %. Majú výhodný pomer pevnosti k hustote, ktorý je vyšší ako pri oceliach, pretože sa vyznačujú nízkou hustotou ($\rho = 4500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Majú dobré pevnostné vlastnosti pri stredne vysokých teplotách, pri ktorých už nemožno aplikovať špeciálne hliníkové zliatiny. Vyznačujú sa vysokou odolnosťou proti korózii. Uvedené vlastnosti predurčujú *Ti* a jeho zliatiny pre použitie v leteckej a kozmickej technike. V súčasnosti sa používajú aj v iných oblastiach, napr. v strojárskom a chemickom priemysle a v malom rozsahu i v medicíne [10].

Základným procesom prípravy tvarových súčiastok na báze *Ti* je výroba prášku. V súčasnosti sa aplikujú na výrobu práškového *Ti* resp. *Ti* zliatin tieto technológie:

- termická redukcia TiO_2 ,
- redukcia chloridov TiCl_4 ,
- hydro-dehydrogenačný proces,
- elektrolytický spôsob,
- metóda REP (Rotating Electrode Process, odtavovanie rotujúcej elektródy).

Rozvoj *PM titánu* a jeho zliatin stimulujú dva vzájomne sa prelínajúce aspekty, a to ekonomický a technický. Z ekonomického hľadiska je to skutočnosť, že *PM* poskytuje možnosť lepšieho využitia materiálu. Táto skutočnosť je zvlášť dôležitá pre *Ti* a jeho zliatiny, ktoré sa vyznačujú zlou obrábiteľnosťou. Pri výrobe konštrukčných súčiastok z *Ti* zliatin pre letecký priemysel klasickou metalúrgiou sa využije v priemere len 16 % z celkovej východiskovej hmotnosti. Vzniknuté triesky predstavujú ťažko spracovateľný odpad v prípade klasickej metalúrgie. Technológiou *PM* je možné všetok trieskový odpad premeniť na cennú surovinu - prášok. Technológia *PM* zaisťuje využitie titánového materiálu na 80 % ÷ 90 %. Z technického hľadiska *PM Ti* a jeho zliatin umožňuje vyrobiť materiály, ktoré sa uplatnením klasickej metalúrgie vôbec nedajú vyrobiť [11]. Ide o *Ti* zliatiny legované prvkami, ktoré segregujú alebo sú v tekutom stave nerozpustné v *Ti*, napr. *Fe*, *Cr*, *Mn*, *Ni* a iné. Technológia *PM* umožňuje potlačiť segregáciu týchto prvkov. Ďalej možno uskutočňovať legovanie matrice oxidmi, nitridmi, boridmi a pod. *PM* umožňuje tiež pripraviť izotropné materiály na báze *Ti*.

Oproti uvedeným výhodám aplikácie *PM* na výrobu *Ti* a *Ti* zliatin stojí viacero problémov, ktoré rozvoj *PM Ti* čiastočne sťažujú. Ich základom je vysoká afinita *Ti* ku všetkým intersticiárnym prvkom (*H*, *O*, *N*, *C*). Na prekonanie problémov prípravy *Ti* pomocou *PM* je potrebné nájsť optimálne technické riešenie predovšetkým v troch oblastiach *PM* titánu.

Prvá oblasť úzko súvisí s požadovanou vysokou čistotou konečných výrobkov, ktorá sa týka celého technologického cyklu od rafinácie predzliatin cez výrobu práškov a ich úpravu až po kompakáciu. Súčasťou uvedeného problému je nedostatok experimentálnych výsledkov, ktoré by umožnili presnejšie analyzovať stupeň negatívneho pôsobenia vtrúsenín a prímiesí na degradáciu úžitkových vlastností výrobkov a exaktne stanoviť prípustný stupeň znečistenia pre konkrétne aplikácie [12].

Druhá oblasť sa týka otázok nedeštruktívnej kontroly. Súčasné systémy nedeštruktívnej kontroly ťažko identifikujú defekty o veľkosti pod 0,25 mm. Z lomovej mechaniky je známe, že so zvyšovaním pevnostných vlastností sa veľmi prudko znižuje prípustná veľkosť kritického defektu. V extrémne namáhaných konštrukčných súčiastkach z *Ti* zliatin sa nesmie vyskytnúť defekt s kritickou veľkosťou nad 0,1 mm. Táto skutočnosť hovorí v neprospech *PM Ti*, kde je veľmi náročné vylúčiť výskyt pórov, resp. iných defektov s takouto veľkosťou. Keďže vyžadovaná miera rizika v letectve je veľmi nízka, vyžaduje si uplatnenie práškovej metalúrgie *Ti* pre kritické súčiastky mimoriadne technické opatrenia s cieľom zabezpečenia vysokej čistoty.

Tretia oblasť je oblasť skúšobníctva, kde nejde len o vypracovanie nových exaktných skúšobných metód, ale i o získanie rozsiahlych štatistických údajov a prevádzkových skúseností [13].

V leteckých aplikáciách *PM Ti* možno konštrukčné súčiastky rozdeliť do týchto dvoch kategórií:

- a) nekritické súčiastky sú tie, ktoré neprenášajú dynamické rázové alebo cyklické ťahové (viacosové) namáhanie,
- b) kritické súčiastky sú také, ktoré tieto namáhania prenášajú a ich poškodenie môže spôsobiť deštrukciu celého systému.

Na výrobu kritických súčiastok je nutné používať náročnejšie technologické varianty ako v prípade nekritických súčiastok. Výroba kritických súčiastok nedosiahla ešte vyžadovanú spoľahlivosť a stále sa len rozvíja. Na základe výroby nekritických a kritických súčiastok sa dajú spôsoby prípravy rozdeliť na dve skupiny, ktoré reprezentujú viaceré výrobné postupy:

- a) nekritické súčiastky sa pripravujú z miešaných práškov. Technológia výroby spočíva v mechanickej homogenizácii zmesi práškov jednotlivých kovov vo vyžadovanom pomere

a ďalšej kompaktizácii týchto práškov. Zmesi elementárnych práškov sa vyznačujú dobrou lisovateľnosťou a dobrou spekatelnosťou, takže uplatnením bežných spôsobov tvarovania sa môžu dosiahnuť hodnoty hustoty až 95 % teoretickej hustoty. Štruktúra takýchto materiálov je v mikroobjektoch značne heterogénna. Dôsledkom heterogenity štruktúry sú nízke hodnoty lomovej pevnosti a lomovej húževnatosti.

- b) kritické súčiastky sa pripravujú z predlegovaných alebo legovaných práškov. Pri tejto technológii má každá prášková častica chemické zloženie totožné s chemickým zložením konečného výrobku. Lisovateľnosť takýchto práškov je obťažná. Nutné je použiť izostatické spôsoby lisovania, či už za tepla alebo za studena. Uvedená technológia umožňuje získať homogénnu bezpórovitú štruktúru a lepšie mechanické vlastnosti. Tie umožňujú aplikáciu takto vyrobených konštrukčných súčiastok pre extrémne spôsoby namáhania [14].

V *PM titánu* musí byť zohľadnená vysoká afinita *Ti* k intersticiálnym prvkom. Tepelné spracovanie práškov i polotovarov sa musí realizovať vo vysokom vákuu alebo v inertných plynoch (*He*, *Ar*) s vysokou čistotou. Kontakt práškových častíc s ovzduším v procese spracovania (prítomnosť O_2 a N_2) degraduje jeho vlastnosti, a tým i vlastnosti konečného výrobku. *Ti* prášky, najmä jemné prášky, sú tiež vysoko horľavé, takže pri neopatrznej manipulácii s nimi môže dôjsť k explózii [15].

Kompaktizácia miešaných práškov sa realizuje pri použití lisovacích tlakov v rozsahu $p = 800 \text{ MPa} \div 900 \text{ MPa}$, čím sa získajú výlisky s hustotou $\rho = 85 \% \div 90 \%$. Proces spekania sa uskutočňuje najčastejšie vo vákuu pri teplotách približne $1400 \text{ }^\circ\text{C}$, v menšej miere v inertných plynoch, predovšetkým v *Ar*. Čistota argónu je veľmi vysoká, obsah kyslíka musí byť pod 0,005 % a dusíka pod 0,01 %. V prípade požiadaviek na vyššiu hustotu nasledujú sekundárne operácie tvarovania. Najčastejšie sa využíva izostatické lisovanie za tepla, ale používa sa aj kovanie za tepla a kovanie za tepla s nasledujúcim tepelným spracovaním. Kompaktizácia predlegovaných práškov sa môže uskutočniť izostatickým lisovaním za tepla, vákuovým lisovaním za tepla, kovaním alebo pretlačovaním. V súčasnosti ma najväčší význam izostatické lisovanie za tepla. Teplota lisovania sa pohybuje v intervale $T = 870 \text{ }^\circ\text{C} \div 980 \text{ }^\circ\text{C}$, lisovacie tlaky $p = 100 \text{ MPa} \div 200 \text{ MPa}$, aktívny lisovací čas $t = 2 \div 8$ hodín.

V leteckom priemysle sa technológia práškovej metalurgie uplatňuje najmä na výrobu nekritických súčiastok z $\alpha + \beta$ zliatin, napr. *Ti-6Al-4V* a *Ti-6Al-2V*. Uvedené materiály sú určené na tepelné spracovanie,

a preto konečnou operáciou je tepelné spracovanie, napr. izotermické žihanie pri teplotách $T = 450 \text{ }^\circ\text{C} \div 550 \text{ }^\circ\text{C}$ [16].

V chemickom a potravinárskom priemysle sa *PM Ti* využíva pri výrobe súčiastok odolných proti korózii, rôznych krúžkov, filtrov, elektród a pod.

1.2 Elektrotechnické kontaktné materiály

Elektrické kontakty uzatvárajú elektrické obvody, slúžia na prenos elektrického prúdu v určitom časovom intervale a k rozpojovaniu uzavretého elektrického obvodu. tieto v mnohých smeroch protichodné požiadavky sa vo viacerých prípadoch nedajú zabezpečiť čistými kovmi alebo ich zliatinami [17]. Technológia *PM* však umožňuje zjednotiť rozdielne vlastnosti, ktoré sú vyžadované pre kontaktné materiály, do jedného materiálu. Navyše kontakty vyrobené *PM* majú lepšie úžitkové vlastnosti (vyššiu odolnosť proti opotrebeniu), čo umožňuje skoro úplné nahradenie kontaktov z drahých kovov (*Au*, *Ag*, *Pt*, *Pd*).

Pri aplikácii kontaktov v elektrických obvodoch dochádza k degradačným procesom, ktoré určujú ich životnosť. Pri zapojení kontaktov vzniká medzi prvkami zapojenia elektrický oblúk, ktorý môže spôsobiť straty materiálu. Straty materiálu, ku ktorým môže dôjsť pri vzniku elektrického oblúka, podstatne ovplyvňujú životnosť spínacieho prístroja. Pri rozpojovaní kontaktu dochádza najprv k poklesu prierezu kontaktnej plochy a k narastaniu prúdovej hustoty, následkom čoho sa teplota môže zvýšiť na takú hodnotu, že bezprostredne pred úplným rozpojením sa kontaktný materiál nataví a elektrický prúd je vedený cez malý kovový mostík taveniny. Ak je hustota elektrického prúdu vysoká, nastane explózia, ktorá preruší mostík a dôjde k rozstreknutiu taveniny. Pri ďalšom vzniku elektrického oblúka sa kontaktný materiál v pätkle klenby ohreje až na teplotu varu a nastáva jeho vyparovanie. Celkové straty kontaktného materiálu, ktoré vznikajú pri rozpojení spínacích prvkov vyššie uvedeným mechanizmom, sa označujú termínom *prepal*.

Pri uzavretí kontaktu dochádza k nárazu pohyblivého spínacieho prvku na nepohyblivý (pevný) spínací prvok, čo je sprevádzané deformačnými procesmi. Tieto procesy sú krátkodobé ($8 \cdot 10^{-3} \text{ s}$), ale mnohonásobne sa opakujú.

Základnými požiadavkami kladenými na materiály elektrických kontaktov sú vysoká elektrická a tepelná vodivosť. Vodivosť napomáha tomu, aby sa kontaktný materiál počas zaťaženia prechodom prúdu čo najmenej ohrieval a aby prípadný ohrev nespôsobil poškodenie kontaktného materiálu i iných materiálov, ktoré aplikované v spínacom obvode. Ďalšími požiadavkami sú nízky prechodový odpor, odolnosť proti opalu a erozívne pôsobeniu elektrického oblúka, odolnosť proti korózii na vzduchu

a v mikrokľíme samotného prístroja, odolnosť proti zväraniu (vzájomnému spojeniu), odolnosť proti oteru pri vysokých spínacích tlakoch.

Elektrické kontaktné materiály sa delia do týchto dvoch skupín:

- materiály pre silnoprúdovú elektrotechniku (vysokonapäťové kontakty),
- materiály pre slaboprúdovú elektrotechniku (nízkonapäťové kontakty).

I keď medzi oboma skupinami neexistuje ostré rozhranie, pre každú skupinu existujú špecifické požiadavky na vlastnosti, ktoré majú rozhodujúci vplyv na voľbu materiálu. Pre materiály používané v silnoprúdovej elektrotechnike je základným problémom zvládnutie silných erózií pri prechode prúdu daným materiálom. Pri materiáloch pre slaboprúdovú elektrotechniku sa na prvé miesto z hľadiska materiálových požiadaviek kladie korózna odolnosť a minimálny transport materiálu. Korózna odolnosť je dôležitá na dosiahnutie konštantného prechodového odporu. Príklad použitia kontaktných materiálov v závislosti od parametrov el. obvodu je na obr. 2. Transport materiálu je charakterizovaný lokálnym prenosom materiálu z jedného kontaktu na druhý.

1.3 Materiály pre silnoprúdovú elektrotechniku

Základným materiálom pre silnoprúdovú elektrotechniku je volfrám, ale používa sa aj *Mo*, *Re* a spojené materiály *W-Ag* a *W-Cu*. Fyzikálne a mechanické vlastnosti *W* spolu s *Mo* a *Re* sú uvedené v tab. 3.

Tab. 3. Fyzikálne a mechanické vlastnosti *W*, *Mo* a *Re*

Vlastnosť	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Re</i>
Hustota pri 20 °C ρ_{20} [g·cm ⁻³]	19,3	10,2	21,04
Teplota tavenia T_{tav} [°C]	3410	2617	3180
Teplota varu T_{var} [°C]	5900	4800	5900
Merná elektrická vodivosť ρ [m·Ω ⁻¹ ·mm ⁻²]	18,2	17,3	5,23
Tepelná vodivosť λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	129,8	159,1	0,586
Pevnosť v ťahu R_m [MPa] – stav mäkký	1400	800	1200
Ťažnosť A [%] – stav mäkký	1-3	20	20

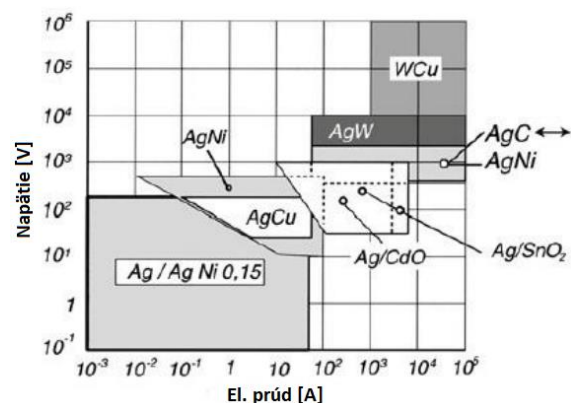
Volfrám má vysokú teplotu tavenia, veľmi dobrú odolnosť proti opalu a vysokú tvrdosť. Má však iba 1/3 elektrickej vodivosti meďi, zle sa spracováva a je málo tvárny. Je pomerne málo odolný proti oxidačnej

atmosfére pri teplotách nad 400 °C. Na jeho povrchu dochádza k tvorbe oxidických vrstiev, ktoré zvyšujú prechodový odpor. Materiálové straty, súvisiace s tvorbou elektrického oblúka sú v prípade materiálov na báze *W* pomerne nízke, a to pre jeho vysokú tvrdosť i stálosť elektrického oblúka. Kontakty na báze *volfrámu* sú vhodné vo všetkých prípadoch, keď možno očakávať vysoké prevádzkové zaťaženie. Uplatňujú sa elektrickej výzbroji automobilov (prerušovacie kontakty, zapaľovacie elektródy), vo vákuových zariadeniach, v regulátoroch napätia, v signalizačných zariadeniach a pod.

Na výrobu vysokonapäťových kontaktov sa používajú aj materiály na báze *molybdénu*. *Molybdén* je oproti *volfrámu* odolnejší proti plynom, má nižšiu hustotu a je lepšie obrábatel'ný. *Mo* je drahší v porovnaní s *W*. V *USA* sa používajú molybdénové kontakty i pre slaboprúdovú elektroniku.

Rénium má vynikajúce vlastnosti pre výrobu kontaktných materiálov. Spínacie prvky sú vhodné pre prúdy do 10 A, a príznaky transportu materiálu nie sú badateľné ani pri 100 miliónoch zapojení. Kým kontakty z materiálov na báze *W* možno používať do teplôt asi 700 °C, kontakty z materiálov na báze *Re* možno použiť i pri vyšších teplotách. Pre svoju vysokú cenu sa používa v menšej miere.

Pre aplikácie s vyššími hodnotami elektrickej vodivosti sa používajú spojené materiály *W* s kovmi s veľmi dobrou elektrickou vodivosťou, t. j. *Ag* a *Cu*. Tieto kovy sa v tekutom stave nerozpúšťajú vo *volfráme*, a preto sa nemenia vlastnosti jednotlivých zložiek v spojenom materiály. kontaktné materiály *W-Ag* a *W-Cu* sa vyznačujú vysokou odolnosťou proti opalu a malým sklonom k tvorbe návarov. Spínacie obvody tohto typu sú schopné vysokého zaťaženia do 1000 A. V prípade kontaktných materiálov typu *W-Ag* sa do *Ag* pridáva asi 0,04 hm. % *Ni*, ktorý zabezpečuje zlepšenie zmáčavosti *Ag*. Pri príprave kontaktov z čistých kovov sa prášky z týchto kovov lisujú (na hustotu 80 %), predspekajú pri nižšej teplote a spekajú pri vyššej teplote (napr. *W* pri $T = 2800$ °C) v ochrannej vodíkovej atmosfére.



Obr. 2. Použitie rôznych kontaktných materiálov v závislosti od napätia a el. prúdu

1.4 Materiály pre slaboprúdovú elektrotechniku

Pre slaboprúdovú elektrotechniku sa používajú najmä kontakty na báze striebra, ktoré sa vyznačujú vysokou elektrickou a tepelnou vodivosťou. Jeho nevýhodou je pomerne nízka odolnosť proti zlúčeninám síry, malá tvrdosť, sklon k zvaraniu a nízka odolnosť proti opalu. V menšej miere sa používajú materiály na báze zlata, platiny, paládia. Kontakty na báze *Ag*, *Au*, *Pt* a *Pd* sa vyrábajú klasickou technológiou. Nakoľko ani jeden zo spomenutých prvkov nezaraďujeme medzi materiály s vysokou teplotou tavenia, nebudeme sa zaoberať ich použitím a vlastnosťami [18].

ZÁVER

Pri vybratých materiáloch boli zhrnuté ich mechanické a fyzikálne vlastnosti ako aj oblasť ich využitia. Pomerne obsiahnutá bola opísaná problematika titánu a jeho zliatin nakoľko jeho význam pre využitie v priemysle stále narastá. V ďalšej časti boli rozobraté materiály používané v elektrotechnickom priemysle. Ťažkotaviteľné kovy nachádzajú významné uplatnenie v silnoprádovej elektrotechnike, pričom na výrobu množstva súčiastok je využívaná technológia *PM*. Veľké uplatnenie našla *PM* pri výrobe elektrických kontaktných materiálov.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená projektom KEGA 022ŽU-4/2021 Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky.

LITERATÚRA

- [1] IŽDINSKÁ Z. - ŠVEC P. (2013): *Prášková metalurgia*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, ISBN 978-80-227-3875-0, s. 140.
- [2] SKOTNICOVÁ K. - KURSA M. (2013): *Prášková metalurgia*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, ISBN 978-80-248-3378-1, s.153
- [3] NEMČOK, O. (2011): *Prášková metalurgia*. Dubnica nad Váhom: Dubnický technologický inštitút. ISBN 978-80-89400-20-1, s. 73.
- [4] MORAVEC J. - KANTORIKOVÁ E. - FABIAN P: (2020): *Prášková metalurgia*. Žilina EDIS, ISBN 978-80-554-1692-2.
- [5] NEIKOV, O. D. - NABOYCHENKO, S. S. - MURASHOVA, I. V. - GOPIENKO, (2009):

Handbook of Non-Ferrous Metal Powders - Technologies and Applications, 1st ed., 2009, Philadelphia: Elsevier, 671 p., ISBN 978-1-85617-422-0.

- [6] THÜMMLER, F. - OBERACKER, R. (1993): *Introduction to powder metallurgy*.1st ed. Cambridge: The University Press, 332 p., ISBN 0-901716-26-X
- [7] ASM Handbook (1998): Volume 7: *Powder Metal Technologies and Applications*. Ed. Peter W. Lee. 1st. ed. Materials Park: ASM International, 1147 p., ISBN 978-0871703873.
- [8] LUKÁČ, I. (1990): *Prášková metalurgia*, 1.vyd., Alfa, Vysoká škola technická v Košiciach, ISBN 80-05-00422-2.
- [9] VELGOSOVÁ O. - MIŠKUFOVÁ A. - LAUBERTOVÁ M. (2008): *Priprava kompozitov na báze Al*. In: Acta Metallurgica Slovaca 14, p. 103 – 112.
- [10] ANGELO, P. - PHI Learning Pvt. C. - SUBRAMANIAN, R. (2008): *Powder metallurgy science, technology and applications*. 1st.ed. Delhi: PHI Learning Pvt, 312 p., ISBN 9788120332812.
- [11] THÜMMLER, F. - OBERACKER, R. (1993): *Introduction to powder metallurgy*.1st ed. Cambridge: The University Press, 332 p., ISBN 0-901716-26-X.
- [12] GERMAN, R. M. (1994): *Powder Metallurgy Science*. 2nd ed. Princeton: MPIF, 472 p., ISBN 1-878954-42-3.
- [13] HOULDCROFT, P. T. - JOHN, R. (2001): *Welding and Cutting: A Guide to Fusion Welding and Associated Cutting Processes*, s. 240., ISBN 978-1855-7357-81.
- [14] KUHN, H. - MEDLIN, D. (2000): *ASM Handbook*. Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation. Materials Park, Ohio: ASM International, ISBN 0871703890.
- [15] SZABA, J.(2017): *Teplotná stabilita štruktúry práškových kompozitov na báze medi*. TU Košice Dizertačná práca.
- [16] MATTHEWS, F. L. - RAWLINGS, R. D. (1994): *Composite materials: engineering and science*. Chapman and Hall, London.
- [17] HOSFORD, W. F. (2005): *Mechanical behavior of materials*. New York, USA: Cambridge University Press, s. 425. ISBN 0-521-84670-6.
- [18] VELGOSOVÁ O. - MIŠKUFOVÁ A. - LAUBERTOVÁ M. (2008): *Priprava kompozitov na báze Al*. In: Acta Metallurgica Slovaca 14, p. 103-112.