

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Degradace slinutých karbidů

Autor: **Tomáš VÁCA**
Vedoucí práce: **doc. Dr. Ing. Antonín KŘÍŽ**

Akademický rok 2014/2015

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Váca	Jméno Tomáš		
STUDIJNÍ OBOR	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Dr. Ing. Kříž	Jméno Antonín		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Degradace slinutých karbidů			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN

CELKEM	56	TEXTOVÁ ČÁST	37	GRAFICKÁ ČÁST	19
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Cílem této práce je uvést základní informace o slinutých karbidech, jejich vlastnostech a způsobech zhoršování těchto vlastností. V experimentální části budou pomocí laboratorních testů zjišťovány změny vlastností pro různé druhy povrchu.
KLÍČOVÁ SLOVA	slinutý karbid, předdepoziční procesy, zbytkové napětí, tvrdost, lomová houževnatost, vnikací zkoušky K _{1c} , otěruvzdornost, korozní odolnost

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Váca	Name Tomáš	
FIELD OF STUDY	Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Dr. Ing. Kříž	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLÓMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Degradation of cemented carbides		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES

TOTALLY	56	TEXT PART	37	GRAPHICAL PART	19
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	<p>The aim of the thesis is to give a general overview of cemented carbides, their properties and means of decreasing of this properties. Using laboratory testing in the experimental part, there will be search for the changes of properties depending on diferent types of surfaces.</p>
KEY WORDS	<p style="text-align: center;">cemented carbide, pre-deposition modifications, residual stress, hardness, fracture toughness, K_{Ic} indentation tests, wear resistance, corrosion resistance</p>

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Dr. Ing. Antonínu Křížovi za podporu, vedení i za čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat mým konzultantům a všem lidem z KMM, kteří mi věnovali svůj čas, za jejich pomoc, ochotu a cenné rady. V neposlední řadě chci poděkovat rodině a přátelům za jejich podporu při studiu a při zpracovávání této práce.

Obsah

Úvod do řešené problematiky.....	9
1. Popis slinutých karbidů.....	10
1.1. Historický vývoj slinutých karbidů.....	10
1.2. Výroba slinutých karbidů a jeho komponent.....	11
1.2.1. Výroba prášků.....	11
1.2.2. Mletí.....	11
1.2.3. Formování.....	12
1.2.4. Slinování.....	13
1.3. Rozdělení, normy a značení.....	13
1.4. Současná situace a vývoj.....	14
2. Požadované vlastnosti vybraných skupin SK.....	16
2.1. Fyzikální a mechanické vlastnosti.....	16
2.1.1. Tepelná vodivost.....	16
2.1.2. Tvrdost.....	17
2.1.3. Pevnost.....	18
2.1.4. Modul pružnosti.....	18
2.1.5. Lomová houževnatost.....	18
2.2. Korozní a tepelná odolnost.....	20
2.2.1. Odolnost proti teplotním šokům.....	20
2.2.2. Creep.....	20
2.2.3. Korozní odolnost.....	20
2.2.4. Oxidace.....	21
2.3. Tenké vrstvy a vliv tenkých vrstev na vlastnosti systému tenká vrstva-substrát..	21
2.3.1. Tenké vrstvy.....	21
2.3.2. Metody depozice.....	22
2.3.3. Vlastnosti tenkých vrstev a systému tenká vrstva – substrát.....	23
3. Teplotní a chemické degradace slinutých karbidů.....	25
3.1. Teplotní zatěžování.....	25

3.1.1. Výroba.....	25
3.1.2. Pájení.....	25
3.1.3. Obrábění.....	25
3.2. Chemická degradace.....	25
3.2.1. Koroze.....	25
3.2.2. Oxidace.....	25
3.2.3. Naleptávání.....	26
4. Degradace slinutých karbidů v procesu výroby.....	26
4.1. Mechanické úpravy.....	26
4.2. Stripping.....	26
4.3. Předdepoziční procesy.....	27
4.3.1. Mechanické procesy.....	27
4.3.2. Nemechanické procesy.....	29
4.4. Depozice.....	29
5. Experimentální program.....	30
5.1. Materiál a vzorky.....	30
5.1.1. Materiál.....	30
5.1.2. Vzorky.....	31
5.2. Zjištění zbytkových napětí pomocí Rentgenové difrakce.....	31
5.3. Tvrdost dle Vickerse.....	32
5.4. Lomová houževnatost K_{IC}	33
5.4.1. Výpočet lomové houževnatosti dle Palmquista.....	35
5.4.2. Výpočet lomové houževnatosti dle Shettyho.....	36
5.5. Pozorování vtisků a trhlin pomocí REM.....	37
5.5.1. Snímky vtisků.....	38
5.5.2. Snímky trhlin.....	40
5.6. Drsnost povrchu.....	41
5.7. Měření odolnosti vůči opotřebení pomocí tribologie.....	44
5.8. Zjištění korozních vlastností pomocí potenciometru.....	46

5.9. Impact test.....	49
6. Diskuze výsledků.....	54
7. Závěr.....	55
Seznam použitých zdrojů.....	56

Úvod do řešené problematiky

Slinuté karbidy jsou jedním z nejpoužívanějších materiálů pro výrobu řezných nástrojů hodících se na obrábění většiny materiálů od měkkých k extrémně tvrdým a pokrývající velké množství aplikačních činností. Například se také používají pro výrobu nástrojů (pracovních částí) pro mlecí a dolovací činnosti. Hlavním ekonomickým ukazatelem těchto nástrojů je jejich trvanlivost, tedy časový úsek, po který si při svém používání zachovají vlastnosti potřebné ke své činnosti. Zhoršování vlastností je obecně proces vedoucí k zániku nástroje a míra této degradace v průběhu života nástroje pouze stoupá.

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi slinutých karbidů a procesy, které tyto vlastnosti mění. Výsledné vlastnosti nástroje jsou ovlivňovány už od prvních kroků výroby jednotlivých komponent. Výrobní proces může zanechat ve slinutém karbidu chyby, které budou materiál oslabovat a mohou se stát základem pro pozdější selhání nástroje nebo jen předpokladem pro budoucí degradaci způsobující snížení jeho trvanlivosti. Při výrobě materiálu a nástroje je slinutý karbid vystavován vlivům, které mohou snižovat jeho vlastnosti nebo předurčit jejich snižování v budoucnu. Na materiál působí mechanické vlivy např. broušení, omílání, otryskávání, tepelné procesy např. slinování, depozice, pájení a chemické změny např. stripping (odstranění tenkých vrstev).

Při následném použití je materiál vystaven mechanickému zatěžování a mechanickým rázům, a to navíc za působení vyšších teplot, které mohou způsobit změnu struktury. Běžné jsou také tepelné rázy. Na slinutý karbid také působí materiál obrobku a okolní prostředí – atmosféra a provozní kapaliny. To může vyústit v chemické reakce, korozi nebo naleptávání. Hlavně za vyšších teplot se objevuje oxidace slinutého karbidu.

Všechny tyto vlivy se kromě snížení trvanlivosti mohou projevit i na zhoršené kvalitě operací a mohou mít vliv na náhlá, například destruktivní, selhání nástroje.

Tato bakalářská práce je obecně zaměřena na vlastnosti slinutých karbidů, na popis mechanismů degradací a jejich vliv na slinuté karbidy a vlastnosti a to v průběhu celého životního cyklu slinutého karbidu od výroby komponent až po jeho používání a prakticky rozebírá vliv povrchových úprav, na tyto vlastnosti.

1. Popis slinutých karbidů

Tato kapitola obsahuje potřebné informace pro pochopení a základní orientaci v oblasti slinutých karbidů. Tenké vrstvy a jejich depozice jsou v této kapitole upozaděny (mají později svojí samostatnou část) a pozornost je zaměřena na nedeponované slinuté karbidy a na slinuté karbidy obecně.

1.1. Historický vývoj slinutých karbidů

Počátkem vývoje slinutých karbidů byl objev látek vyznačujících se velkou tvrdostí a vysokou teplotou tavení, karbidů, boridů a silicidů. Byly to karbidy wolframu s chemickým vzorcem WC a W_2C s jejichž slitinou se cíleně pracovalo. Z důvodu vysoké křehkosti a nízké houževnatosti nedošlo zpočátku k průmyslovému a obchodnímu využití. Z pokusů o využití wolframového prášku vzniklo odvětví zabývající se práškovou metalurgií a vytvoření řezných materiálů z karbidu wolframu bylo jedním z prvních cílů. Zahřívání wolframového prášku smíchaného s uhlíkem vedlo k vytvoření práškového karbidu wolframu o malé zrnitosti. Postupně se vyvinul proces pro výrobu slinutého karbidu, práškový karbid wolframu smíchaný s pojícím kovem (Co, Ni nebo Fe) se lisoval a zahříval. Takto vytvořený slinutý karbid se díky svým vlastnostem začal používat na výrobu řezných nástrojů. [2, 4]

Prvním komerčním využitím karbidů byla výroba drátových průvlaků z práškového karbidu wolframu, karbidu molybdenu nebo jejich směsi v roce 1914. Průmyslová výroba slinutých karbidů navázala na výzkum, který probíhal mezi lety 1923 a 1925 a v roce 1926 začala firma Krupp výrobu slinutého karbidu na bázi WC-Co. Tento nový materiál umožnil řádové zvýšení řezné rychlosti a stal se základem pro celou skupinu slinutých karbidů. V dalších letech se ve výzkumu operovalo s velikostí zrn a procentuálním podílem pojiva. Také se začalo používat přidávání malého množství karbidů vanadu a tantalu jako inhibitorů růstu zrna při slinování. [2]

Řezné nástroje ze slinutých karbidů typu WC-Co v té době dosahovaly velmi dobrých výsledků při obrábění litin a barevných kovů a to při dvou až třinásobných řezných rychlostech než jinak používané ocelové nástroje. Nástroje ze slinutých karbidů se ale nehodily na obrábění ocelí kvůli velkému difúznímu opotřebení a následně velmi krátké trvanlivosti. [2]

Následný vývoj slinutých karbidů pokračoval dvěma směry. Základem vývoje vedlejšího směru se stalo vyloučení karbidu wolframu a jeho plné nahrazení jinými karbidy. Díky tomu vznikla vlastní skupina řezných materiálů nazývaných cermety. Hlavní směr pokračoval přidáváním kubických karbidů TiC, TaC nebo NbC do slinutého karbidu WC-Co a dala vzniknout slinutým karbidům typu WC-TiC-Co a WC-TiC-TaC.NbC-Co. Také se začalo přidávat malé množství chromu a vanadu, jejichž kombinace velice výrazně omezovala růst zrna v průběhu slinování. [2, 4]

Na konci 60. let minulého století se objevily materiály s jemnozrnnými a rovnoměrnými karbidickými zrny, které dosáhly vyšší pevnosti bez snížení tvrdosti. Tato jemná zrna byla velikostně pod $0,5 \mu\text{m}$, což je vzhledem k původním jemnozrnným (pod $1 \mu\text{m}$) a běžným slinutým karbidům ($2-3 \mu\text{m}$) výrazný pokrok. Největší aktivita v oblasti submikronových slinutých karbidů byla mezi roky 1980 a 1990, například v USA, Anglii a Japonsku. [2, 4]

Přínosem při zkoumání slinutých karbidů bylo dosažení řízeného obsahu uhlíku. V karbidu wolframu byl určen stechiometrický obsah uhlíku 6,2 hmotnostních procent. Pokud se obsah uhlíku blíží k této hodnotě, má slinutý karbid normální strukturu a k jejímu získání stačí dosáhnout přesnosti do 0,1 %. V polovině 60. let bylo zjištěno, že některé vlastnosti jsou ovlivněny i při zachování normální struktury. Řízení obsahu uhlíku bylo zpřesněno na současné hodnoty 0,02 až 0,03 %. [2]

Tab. 1 Časový vývoj slinutých karbidů [2]

Rok	Nový materiál, technologie
1923-1925	WC-Co
1929-1931	Wc-TiC-Co
1930-1931	WC-TaC(VC, NbC)-Co
1933	WC-TiC-TaC(NbC)-Co
1938	WC-Cr ₃ C ₂ -Co
1947-1970	Submikrometrové WC-Cr ₃ C ₂ -Co
1956	WC-TiC-TaC(NbC)- Cr ₃ C ₂
1959	WC-TiC-HfC-Co
1965-1975	Vysokoteplotní izostatické lisování (HIP)
1968-1969	WC-TiC-TaC(NbC)-HfC-Co
1969-1971	Termochemické povrchové kalení
1969-1979	Komplexní karbidy s přísadou Ru
1972	Submikrometrový SK WC-Co

1.2. Výroba slinutých karbidů a jeho komponent

Výroba slinutých karbidů je typickým procesem práškové metalurgie. Tento proces se zjednodušeně skládá z přípravy prášků karbidů a pojících kovů, jejich smícháním, lisováním a slinováním.

1.2.1. Výroba prášků

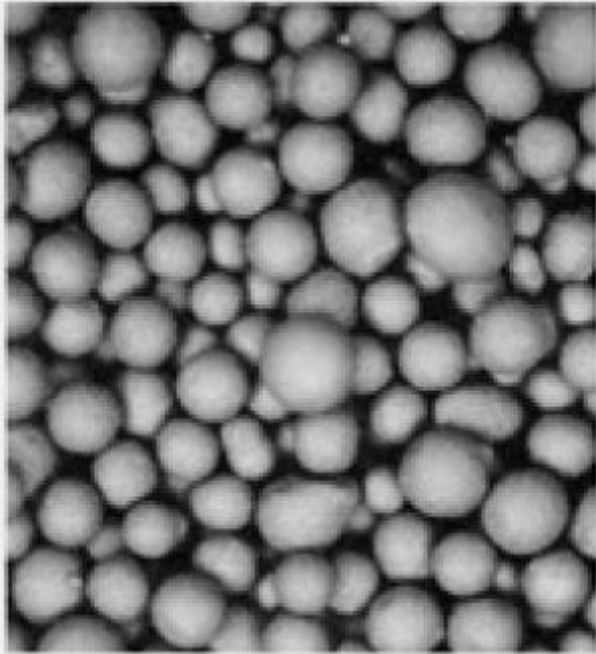
Podle jednoho z postupů je práškový wolfram vyráběn ze směsi oxidů wolframu. Ty procházejí redukční pecí a následný wolframový prášek je smíchán se sazemi a mlet v kulovém mlýnu. Zrnitost karbidových prášků je závislá na teplotě nauhličování, které probíhá v pecích. Prášky jsou poté rozdrobovány a homogenizovány. Směsné karbidy jsou vyráběny podobným postupem. [4]

1.2.2. Mletí

Příprava směsi pojícího kovu a karbidů výrazně ovlivňuje vlastnosti budoucího produktu. Je potřeba vytvořit jemnozrnnou a homogenní směs, čehož se dosahuje mletím za sucha nebo v kapalném prostředí. Pracovní kapalina při mokřém mletí napomáhá rozrušování částic a udržuje nízkou pracovní teplotu. Důležité je dokonalé vysušení směsi před jejím dalším použitím. Nejobvyklejší je použití kulových mlýnů, kde na směs působí mlecí koule v bubnu, který se otáčí. Rázově rozmělňují zrna karbidů a pojiva a tím zmenšují jejich rozměry. Třecí

účiněk koulí pomáhá k dokonalému rozmíchání a homogenizaci směsi. Aby se zabránilo znečištění směsi, používá se na výrobu mlecích koulí a vnitřního obložení mlýnu stejný typ slinutého karbidu jako ten, který bude vyráběn z právě mleté směsi. [2]

Alternativou ke kulovému mlýnu jsou atritory, ve kterých pohyb mleté směsi a mlecích kuliček zajišťuje rotující hřídel s míchacími rameny. [2]



Obr. 1 Mletý a vysušený prášek SK [1]

1.2.3. Formování

Nejčastější metodou formování, používanou pro výrobu vyměnitelných břitových destiček, je lisování ve formovacích lisech. Důležitým prvkem při tvarování je použití plastifikátoru, který snižuje tření mezi lisovacími nástroji a lisovanou směsí, zlepšuje zhutnění směsi a hlavně zaručuje zachování tvaru polotovaru po vyjmutí z lisovací formy. Plastifikátor se odstraní při sušení nebo při předslinování. Rovnoměrného zhutnění se dosahuje konstantním tlakem ve všech směrech a nejčastěji se používá oboustranné lisování. Vzhledem ke smrštění při slinování je potřeba připravovat výlisky větší než jsou rozměry hotového výrobku. [2]

Při izostatickém lisování za studena (CIP) se používají pružné uzavíratelné formy, na které působí tlak mechanickým tlakem pístu nebo hydraulickým tlakem kapaliny. Izostatické lisování za tepla (HIP) se vyznačuje použitím menších tlaků než CIP a proces probíhá za vysoké teploty. [4]

Pro výrobu monolitních nástrojů a tyčí se používá vytlačování. Dále se používá například lití nebo vstřikování do pomocných forem. V některých případech lze po formování polotovar dotvarovat.

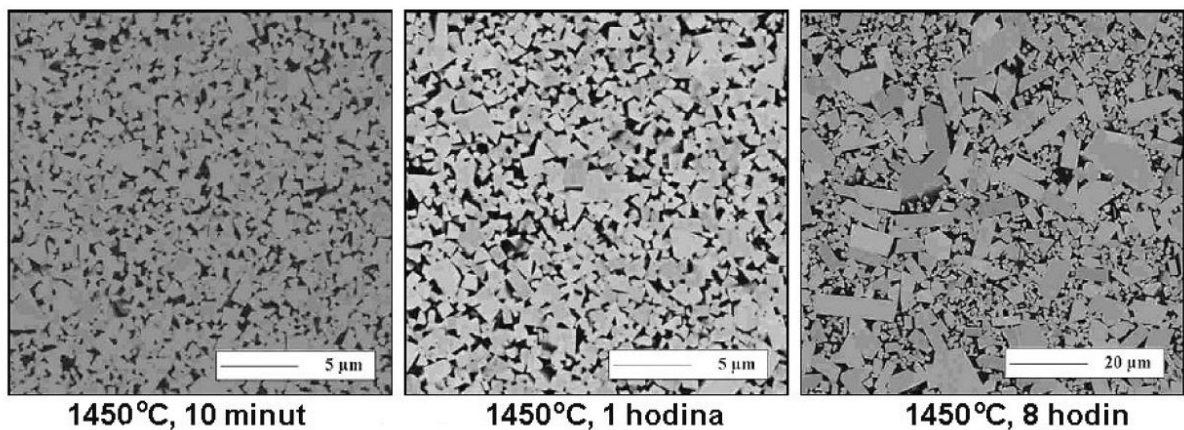
1.2.4. Slinování

Ve slinovací peci je vylisované těleso ohříváno a ochlazováno za řízených podmínek. V průběhu procesu se přeskupují jednotlivé složky, vytvářejí se hranice mezi zrny tvrdé fáze a výsledkem je zcela zhutněný materiál s požadovanou mikrostrukturou a vlastnostmi. Slinování se provádí v ochranné atmosféře nebo ve vakuu. [2]

Obvykle se pro slinování používají teploty 64 až 80 % složky s nejvyšší teplotou tavení. Pokud teplota přesáhne teplotu tavení jedné ze složek, jedná se o slinování za vzniku kapalné fáze. [2]

V systému WC-Co, kde bod tání nejnáze tavitelné složky, kobaltu, je 1 492 °C a teplota tání eutektika je 1 320 °C, se používá konečná teplota 1 400 °C. Teploty v průběhu slinování se obecně pohybují mezi 1 400 a 1 600 °C. Hlavní silou pro slinování a zhutňování materiálu je zmenšování povrchové energie, která je podstatně zesilována při klesající zrnitosti. [2]

Při slinování probíhá velké množství procesů, některé pouze vytvářejí vazby mezi zrny - povrchová difúze, objemová difúzní adheze, vypařování a kondenzace, jiné přispívají ke značnému zhutnění - přítomností tekuté fáze, difúzí po hranicích zrn, plastickým tečením. [2]



Obr. 2 Růst zrna v průběhu slinování (WC + 12 % Co) [4]

1.3. Rozdělení, normy a značení

Pro současné značení řezných materiálů se používá norma ČSN ISO 513. Slinuté karbidy obsahující karbid WC, které nemají deponovanou žádnou tenkou vrstvu, se označují HW (pro zrnitost $\geq 1 \mu\text{m}$) nebo HF (pro zrnitost $< 1 \mu\text{m}$). Všechny slinuté karbidy a cermety, které využívají tenkých vrstev, mají označení HC. Cermety bez deponované tenké vrstvy jsou označeny HT. Tato norma také označuje několik druhů řezné keramiky a supertvrdých materiálů (polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid bóru). [2]

Tato norma dále specifikuje slinuté karbidy pouze podle oblasti použití a nekontroluje jejich vlastnosti ani složení. Tyto skupiny jsou označeny písmenem a určenou barvou. Existuje 6 skupin - tři původní skupiny P, M a K a 3 novější skupiny označené N, S a H. Podskupiny jsou označovány dvoumístným číslem označujícím přibližně obsah pojícího

kovu, určujícím rozsah od největší tvrdosti (a otěruvzdornosti) k maximální houževnatosti. [2, 4]

Původní normy pro slinuté karbidy v různých státech, hlavně v Německu, USA, Rusku a Anglii, většinou vycházely ze značení firem zde působících. Po představení ISO normy je země opouštěly. Za původní normy lze označit německé válečné normy, které značně ovlivnily pozdější normy. [2, 4, 5]

Tab. 2 Základní rozdělení SK [2]

Označení skupiny	Určené použití
P (modrá)	Uhlíkové, slitinové a feritické korozivzdorné oceli
M (žlutá)	Lité oceli, austenitické oceli a tvárné litiny
K (červená)	Litiny, neželezné a nekovové materiály
N (zelená)	Slitiny hliníku, hořčíku nebo mědi, plasty, kompozity, dřevo
S (hnědá)	Titan a žárovevné slitiny
H (šedá)	Zušlechtěné a kalené oceli, tvrzené litiny

Skupina **K** používá slinuté karbidy, které obsahují WC jako jedinou tvrdou strukturní složku. Tyto materiály jsou nejvíce náchylné na teplotu, a proto nejsou vhodné pro obrábění materiálů s dlouhou třískou, které by více tepelně zatěžovali nástroj. Používají se tedy pro obrábění materiálů s krátkou a drobivou třískou, tedy hlavně šedé litiny, neželezných slitin a nekovových materiálů. Dají se použít i pro obrábění tvrzené a kokilové litiny, plastů nebo dřeva. Obvykle se používají relativně nízké řezné síly.

Pro obrábění uhlíkových, slitinových a feritických korozivzdorných ocelí, tj. takových, které vytvářejí dlouhou třísku, se používají slinuté karbidy ze skupiny **P**. Větší odolnosti za vysokých teplot a snížení vymílání nástroje se dosahuje přidáním velkého množství TiC a TaC. Používají se velké řezné síly a nástroj se značně opotřebovává.

Univerzální je skupina **M**, která se používá na lité oceli, austenitické oceli nebo tvárné a legované litiny a také na nízkopevnostní a automatové oceli. Díky vysoké houževnatosti se tyto slinuté karbidy hodí na těžké hrubovací a přerušované řezy. [2]

Jen malý počet slinutých karbidů z těchto tří skupin se používá pro lehké a dokončovací obrábění. Čím vyšší číslo podskupiny, tím je lze použít pro vyšší posuvové rychlosti a těžší obrábění. [2, 9]

1.4. Současná situace a vývoj

Výroba slinutých karbidů se zaměřuje na výrobu monolitních nástrojů a hlavně na výrobu vyměnitelných břitových destiček. Postupně se upustilo od pájení břitových destiček do ocelových držáků. V současné době naprostá většina nástrojů používá mechanicky upínané břitové destičky. Velmi dobře je také zvládnutá geometrie nástroje a utvařeče třísky. Společná je obecně snaha o zvýšení produktivity a snižování nákladů obrábění. Požaduje se optimální trvanlivost za vyšších řezných rychlostí a větší rozsah řezných podmínek.

V současné době se neočekává objev nového materiálu, který by ty současné dokázal nahradit a vývoj se zaměřuje na vylepšení vlastností již existujících materiálů. Pracuje se s předvýrobními a výrobními technologiemi a vyvíjejí se technologie pro zlepšení povrchových úprav materiálů. S rozvojem automatizace výroby je důležitá zejména spolehlivost a bezporuchovost používaných nástrojů. [4]

Důležitým pokračováním pro vývoj všech řezných nástrojů je rychlý rozvoj depozičních technologií, a proto se vývoj intenzivně věnuje zlepšení předdepozičních a depozičních procesů. Také probíhá výzkum nových tenkých vrstev.

Velký vliv na vývoj mají vlastnosti nových konstrukčních materiálů, především materiálů s vysokou pevností, pro jejichž opracování jsou potřeba trvanlivější nástroje s vyšší řezivostí. Například švýcarský výrobce slinutých karbidů, firma Extramet AG nedávno představila materiály vyvinuté speciálně pro zpracování těžce a velmi těžce obrobitelných materiálů zaměřené na hrubování, vrtání nebo také pro výrobu razníků. [6,7]

V oblasti pojiva se například operuje s možností legování kobaltu nebo s použitím směsí pojiv Co-Fe a Fe-Ni-Co. [5]

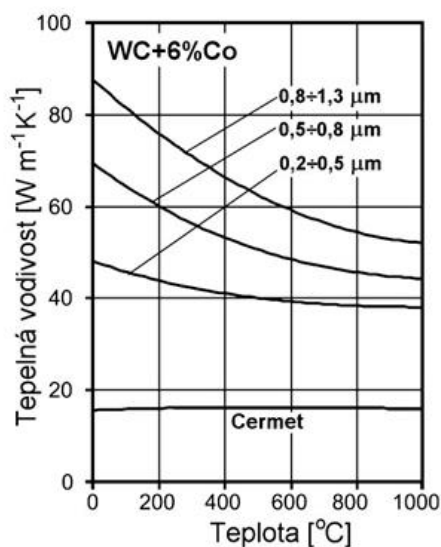
2. Požadované vlastnosti vybraných skupin SK

Naprostá většina slinutých karbidů je používána v obrábění, tato kapitola je tedy zaměřena primárně na vlastnosti, které zasahují nebo ovlivňují chování slinutých karbidů v této aplikaci. Vzhledem k dominanci použití kobaltového pojiva v současně používaných slinutých karbidech je popis vlastností cílen na tento typ slinutých karbidů a jiné typy jsou zmíněny, pokud se jejich vlastnosti významněji liší, nebo pokud se používají pro zlepšení konkrétní vlastnosti.

2.1. Fyzikální a mechanické vlastnosti

2.1.1. Tepelná vodivost

Pro prakticky používané slinuté karbidy (s obsahem Co do 30 %) je tepelná vodivost jen málo závislá na obsahu kobaltu. Pokud obsahuje pojivová fáze nikl, hodnoty tepelné vodivosti klesají. Hodnoty tepelné vodivosti slinutých karbidů WC-Co jsou dvakrát až třikrát vyšší než u rychlořezných ocelí. Slinuté karbidy s hrubším zrnem dosahují vyšších hodnot tepelné vodivosti. Lze také pozorovat snižování tepelné vodivosti se vzrůstající teplotou, viz obr. 3[2]



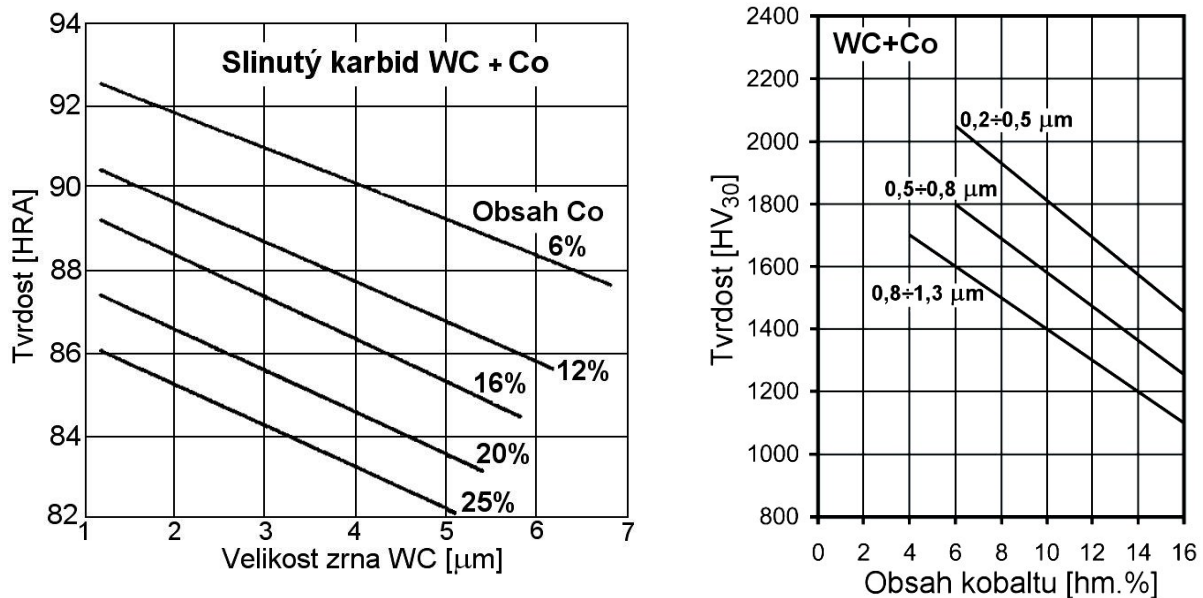
Obr. 3 Závislost tepelné vodivosti SK na teplotě [2]

Slinuté karbidy obsahující TiC mají nižší tepelnou vodivost než slinuté karbidy typu WC-Co. Pro obsah kolem 15 % TiC je tepelná vodivost zhruba stejná jako u rychlořezných ocelí, pro obsah mezi 30 a 60 % TiC je nižší. Tepelná vodivost slinutých karbidů se složitějšími karbidy je obecně nižší než u typu WC-Co. [2, 4]

Materiály s nižší tepelnou vodivostí lépe odvádějí vznikající teplo obrobkem, a tedy méně tepelně zatěžují nástroj. Na druhou stranu nižší tepelná vodivost snižuje odolnost proti teplotním šokům. U mikrometrových a ultrajemných slinutých karbidů je pokles tepelné vodivosti kompenzován vyšší ohybovou pevností a neprojevuje se u nich nižší odolnost proti teplotním šokům. [2]

2.1.2. Tvrdost

Tvrdost u slinutých karbidů typu WC-Co závisí nejvíce na obsahu kobaltu a velikosti zrn karbidů. Nejvyšší tvrdosti dosahují jemnozrnné materiály s nízkým obsahem Co. [2, 3]



Obr. 4 a 5 Závislost tvrdosti SK na obsahu kobaltu a velikosti zrna [2]

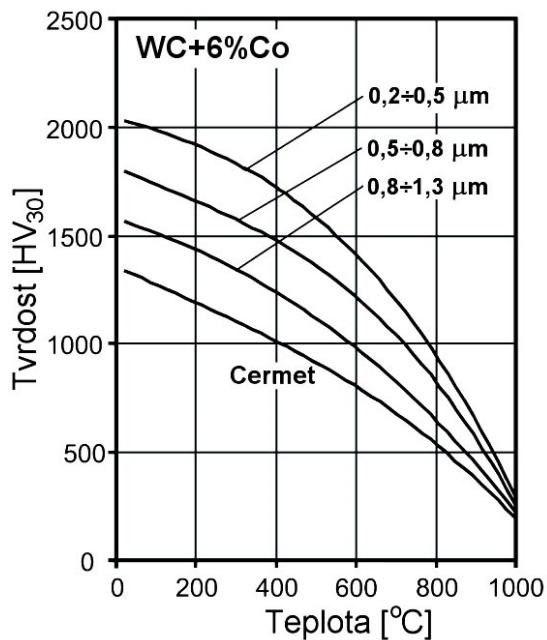
Vzhledem k působení vysokých teplot při obrábění je velmi důležitá závislost tvrdosti na teplotě. S narůstající teplotou tvrdost slinutých karbidů klesá, u struktur s jemnějším zrnem je intenzita poklesu menší, a slinuté karbidy si zachovávají tvrdost až do teplot mezi 900 °C. Nejrychleji klesá tvrdost u slinutých karbidů typu WC-Co, u kterých je tvrdost při pracovních teplotách přesto větší než u rychlořezných ocelí.

Obecně mají slinuté karbidy mnohem větší tvrdost než rychlořezné oceli, tato tvrdost se pohybuje pro slinuté karbidy typu WC-Co v rozsahu 80 až 93,6 HRA nebo až 1850 HV. Některé konkrétní materiály dosahují i vyšších hodnot. Tvrdost slinutých karbidů typu WC-TiC-Co (nebo WC-TiC-TaC.NbC-Co) je vyšší, jejich tvrdost roste s obsahem TiC a bývá v rozmezí 1300 až 1900 HV. [4]

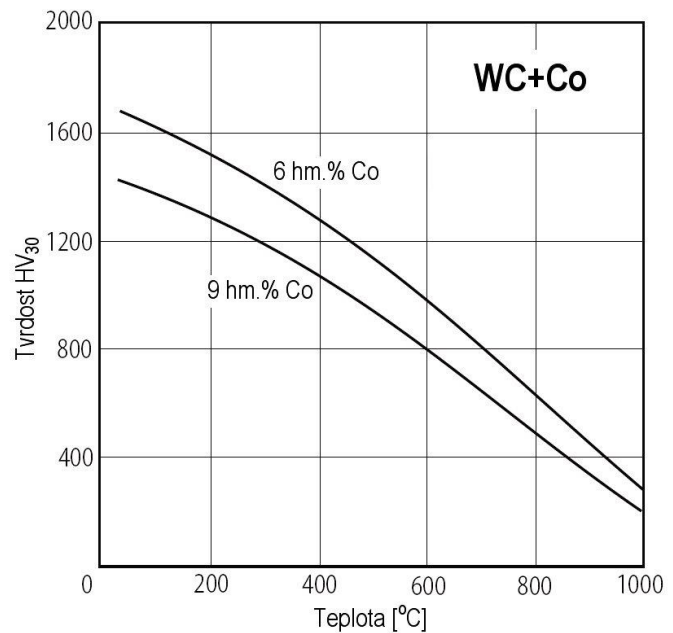
Tvrdost a odolnost proti opotřebení spolu souvisí do té míry, že lze použít hodnoty tvrdosti pro určení míry odolnosti. [5]

Kobalt lze nahradit niklem až do 6 hmotnostních procent bez ztráty tvrdosti, nad tuto hodnotu tvrdost velice rychle klesá. [5]

Tvrdost slinutého karbidu lze zvýšit rozpuštěním wolframu v kobaltu, což se nejvíce projeví u ultrajemných slinutých karbidů za vyšších teplot. [5]



Obr. 6 Závislost tvrdosti na teplotě vzhledem k zrnitosti [2]



Obr. 7 Závislost tvrdosti na teplotě vzhledem k obsahu kobaltu [2]

2.1.3. Pevnost

Pevnost v ohybu roste s rostoucím obsahem kobaltu a výrazně klesá s rostoucí teplotou (rychleji u materiálů s vysokým obsahem Co). U některých hrubozrnných materiálů může dosáhnout maxima při obsahu Co 16-18 % a poté klesat. Ohybová pevnost se pohybuje v rozsahu 2000 až 4700 MPa. Slinuté karbidy s obsahem TiC mají nižší ohybovou pevnost než slinuté karbidy typu WC-Co. [2, 4]

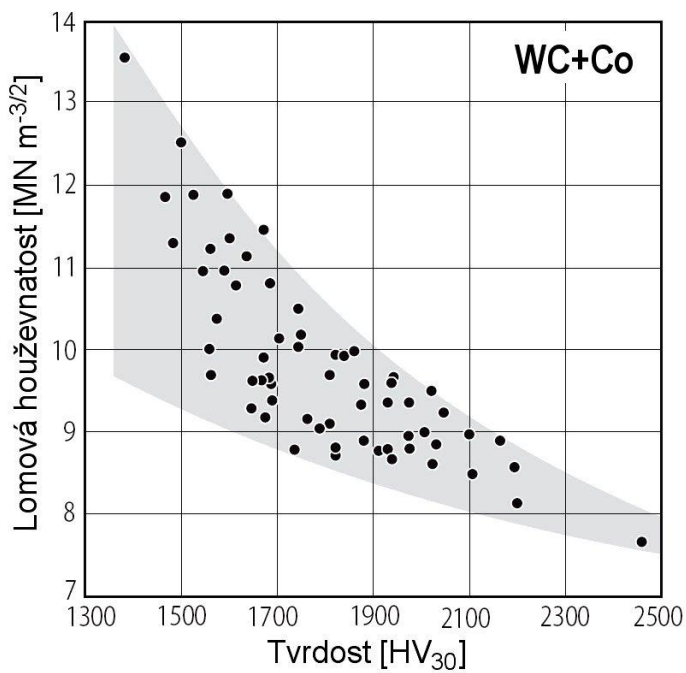
Pevnost v tahu klesá s rostoucím podílem pojiva a s použitím hrubozrnnějších materiálů. Obecně je mnohem vyšší než u jiných technických materiálů.

2.1.4. Modul pružnosti

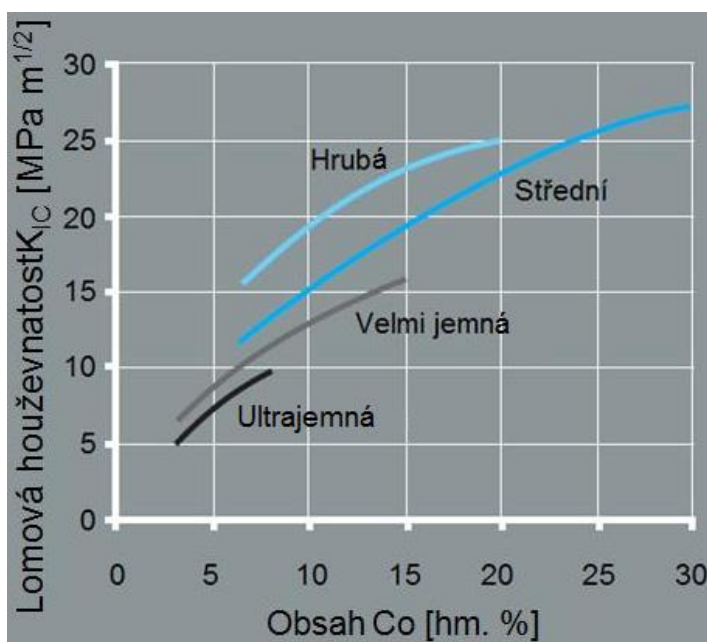
Modul pružnosti je pro WC-Co obvykle vysoký, téměř trojnásobný než u rychlořezných ocelí. S rostoucím obsahem kobaltu klesá. Vyšší hodnoty vykazují materiály s jemnozrnnou strukturou a s rostoucí teplotou modul pružnosti mírně klesá. Klesá také s obsahem TiC. [2]

2.1.5. Lomová houževnatost

S rostoucím obsahem kobaltu a s velikostí zrna roste i lomová houževnatost. Do teplot 500 až 700 °C je konstantní, při vyšších teplotách prudce narůstá. [2, 5]



Obr. 8 Vzájemná závislost lomové houževnatosti a tvrdosti pro slinuté karbidy [2]



Obr. 9 Orientační hodnoty lomové houževnatosti a obsahu kobaltu pro různé zrnitosti SK [19]

2.2. Korozní a tepelná odolnost

2.2.1. Odolnost proti teplotním šokům

Odolnost proti tepelným šokům je závislá na tepelné vodivosti tak, že nižší tepelná vodivost snižuje odolnost proti teplotním šokům. Ve slinutých karbidech tato odolnost stoupá s obsahem kobaltu a u slinutých karbidů s kobaltovým pojivem je vyšší než u srovnatelných slinutých karbidů s niklovým pojivem. [2]

U dvoufázových slinutých karbidů typu WV-Ti-Co je tato odolnost znatelně menší než u typu WC-Co. Odolnost u trojfázových slinutých karbidů typu WV-Ti-Co je nižší než u typu WC-Co se stejným obsahem kobaltu, ale znatelně vyšší než u dvoufázové varianty. [5]

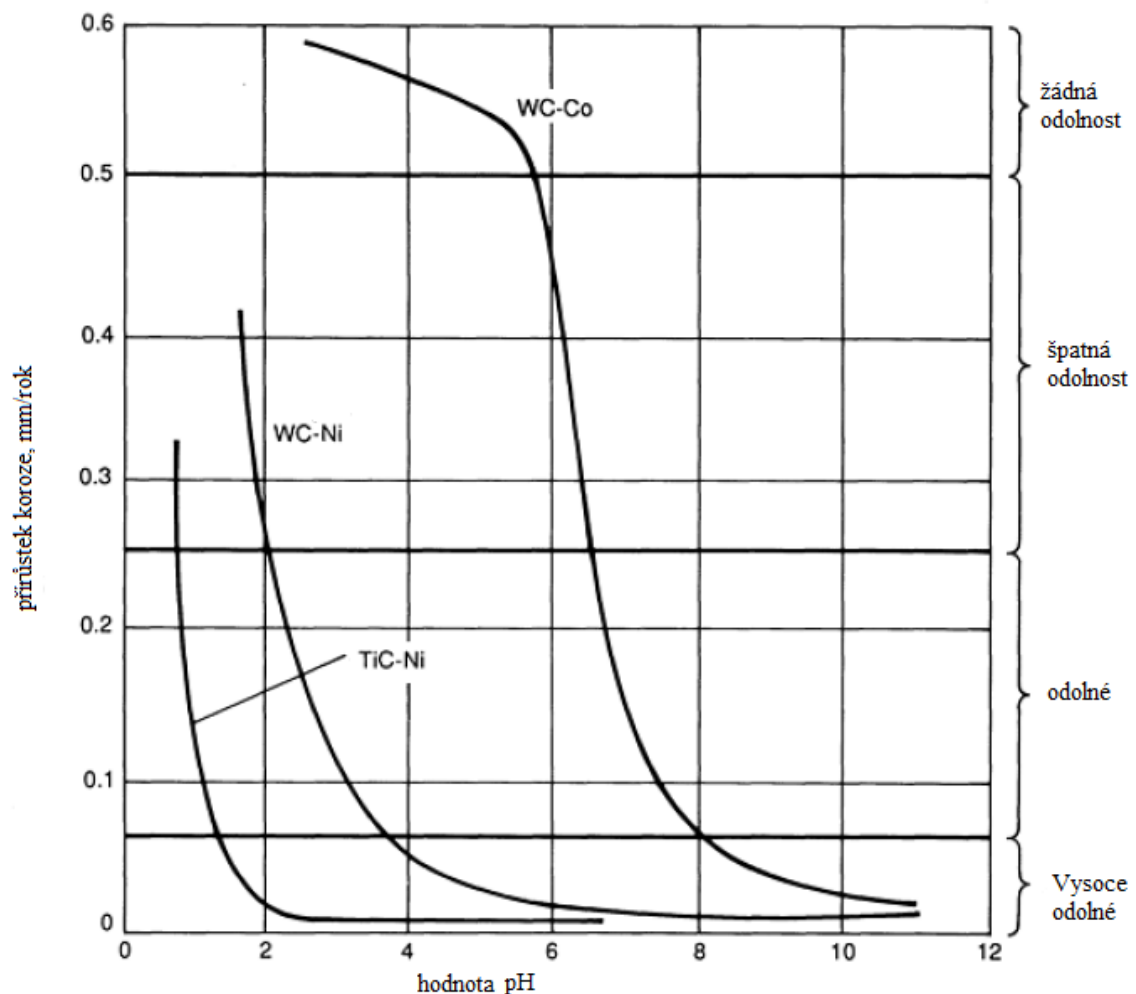
2.2.2. Creep

Ve většině aplikací dosahují slinuté karbidy teplot, u kterých se může projevit creep (tečení). Teplota špičky nástroje může překročit 1000°C a lokálně může být překročena mez kluzu. V těchto případech se může projevit otupení nástroje vlivem creepu. Vliv creepu stoupá s obsahem pojiva a u systému WC-Ni lze pozorovat vyšší odolnost proti creepu oproti systému s kobaltovým pojivem. [5]

2.2.3. Korozní odolnost

Tvrdé fáze slinutých karbidů nejsou ve srovnání s pojivem korozi ovlivněny. Výsledkem koroze je odhalení zrn karbidů, které způsobují hrubý povrch a tím zvyšují opotřebení a otěr nástroje.

Lepší korozní odolnost mají materiály s malou zrnitostí karbidické fáze a s nižším obsahem pojiva. Použití jemnějšího WC prášku vyústí v rozpuštění wolframu v pojivu v průběhu slinování s kapalnou fází. Přidáním malého množství chromu do kobaltových a niklových slinutých karbidů se znatelně zvýší korozní odolnost za současného snížení mechanické odolnosti. Niklové a Ni-Co pojivo je více korozivzdorné než srovnatelné kobaltové pojivo. Kubické karbidy (NbC a TaC) znatelně ovlivňují korozivzdornost od 20 % jejich obsahu výše. [5]



Obr. 10 Závislost korozivzdornosti na prostředí a materiálu dvou typů slinutých karbidů a cermetu TiC-Ni [3]

2.2.4. Oxidace

Vzhledem k používání nástrojů při teplotách mezi 600 a 1000 °C je oxidace významným faktorem v životnosti nástroje. Slinuté karbidy s kobaltovým pojivem jsou znatelně odolnější proti oxidaci než s niklovým. Bylo zjištěno, že přidáním TiC nebo TiN se odolnost nástrojů proti oxidaci zvýší. Pojivo Co-Ni vykazuje lehké zlepšení odolnosti proti oxidaci než čistě kobaltové pojivo, nezávisle na přidání TiC nebo TiN. [5]

2.3. Tenké vrstvy a vliv tenkých vrstev na vlastnosti systému tenká vrstva - substrát

2.3.1. Tenké vrstvy

Vývoj tenkých povrchových vrstev je velmi důležitý krok pro využití řezných nástrojů. První reálně použitelný vývoj tenkých vrstev proběhl v Německu mezi lety 1950 a 1959 a průmyslově se začaly ve velkém využívat od roku 1969, kdy se do výroby zavedly první

deponované výměnné břitové destičky. Deponování bylo prováděno pouze chemickým napařováním (CVD) až do 80. let, kdy se zavedla metoda fyzikálního napařování (PVD). Společnými znaky vývoje byla snaha snížit teploty tvorby vrstev a zlepšit jejich vlastnosti. [2]

Tab. 3 Časový vývoj tenkých vrstev a depozice [2]

Rok	Nový materiál, technologie
1965-1978	TiC, TiN, Ti(C,N), HfC, Al ₂ O ₃ , CVD depozice na SK typu WC-Co
1969	CVD metoda pro TiC na vyměnitelné břitové destičky
1971	Al ₂ O ₃ pomocí CVD
1973	Vícevrstvá tenká vrstva metodou CVD TiC+Ti(C,N)+TiN
1973-1978	Vícevrstvé vrstvy (jednoduché a vícenásobné karbidy, karbonitridy, nitridy)
1974-1977	Vrstvy polykrystalického diamantu na SK typu WC-Co
1978	TiCa TiN pomocí PVD
1981	Vícenásobné tenké vrstvy Al(O,N)
1987-1989	TiAlN pomocí PVD
1992-1996	CVD diamantové vrstvy
1995-1996	Vrstva kubického nitridu bóru pomocí CVD

V současné době se aplikují tenké vrstvy podle předpokládaných podmínek a způsobu obrábění. Sortiment firem po celém světě dosahuje velkého množství druhů tenkých vrstev se značně rozdílnými vlastnostmi.

2.3.2. Metody depozice

Existují dvě základní skupiny depozice, fyzikálním napařováním (PVD – Physical Vapour Deposition) a chemickým napařováním z plynné fáze (CVD – Chemical Vapour Deposition).

Metoda PVD je charakteristická nízkými pracovními teplotami, které se drží pod 500 °C. Původně byla tato metoda vyvinuta pro depozici rychlořezných ocelí, kde bylo potřeba zamezit tepelnému ovlivnění nástroje, poté došlo k rozšíření používání i na slinuté karbidy. Je zde několik možností vytváření vrstvy, například napařováním, napařováním nebo iontovou implantací. Vrstvy jsou vytvářeny kondenzací částic (atomů nebo jejich shluků) uvolňovaných ze zdroje fyzikálními metodami. Ty jsou poté ionizovány, reagují s atmosférou komory a jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde se usazují. Výhodou této metody je možnost deponování ostrých hran, nevýhodou je složitější zařízení a nutnost pohybovat deponovanými předměty. [2, 4]

Metoda CVD je hlavní metodou pro deponování tenkých vrstev na slinuté karbidy a probíhá za vysokých teplot, mezi 700 a 1050 °C. Existuje několik variant této metody, tepelně, fotonově (např. laserem) a elektronově indukovaná nebo plazmaticky aktivovaná. Jedná se o chemický proces, který je založen na reakci plynných sloučenin v plazmě a následném uložení produktů reakce na deponovaném povrchu. [2, 4]

Novější metody plazmaticky aktivovaných CVD (PCVD nebo PACVD) se od klasické metody CVD liší významně menšími pracovními teplotami pohybující se mezi 300 a 600 °C. Principy vytváření tenkých vrstev se oproti CVD metodě nemění, ale molekuly reaktivního plynu jsou ionizovány plazmovým výbojem. Metoda MTCVD používá teploty mezi

700 až 850 °C a této změny oproti CVD metodě se dosahuje použitím jiných vstupních sloučenin. [2, 4]

Nejdůležitější faktory ovlivňující strukturu a vlastnosti tenké vrstvy je způsob vytváření plasmu a hodnoty energie bombardujících částic. Ionty a rychlé neutrální částice, které bombardují tenkou vrstvu, mají různý účinek na její vytváření podle hodnoty své energie. K jejich účinkům patří tepelná aktivace kondenzujících složek, chemická aktivace pro vytvoření sloučen reakcí, desorpce a odprašování nečistot a iontová implantace. [2]

2.3.3. Vlastnosti tenkých vrstev a systému tenká vrstva - substrát

Nanesené tenké vrstvy mají vysokou tvrdost a vynikající odolnost vůči opotřebení. Tyto vlastnosti jsou mnohem lepší, než by měl stejný homogenní materiál v jiné formě. Výhodné vlastnosti tenkých vrstev vycházejí zejména z toho, že vrstvy neobsahují žádné pojivo, mají řádově a více jemnější zrnitost, mají méně strukturních defektů a tvoří bariéru proti difúznímu opotřebení nástroje. Také pomáhají zamezovat tvorbě nárůstku a deformace břitu nástroje. Mezi nejtvrďší tenké vrstvy patří diamantové vrstvy a vrstvy z kubického nitridu bóru. [4]

Tenké vrstvy snižují potřebné řezné síly, teploty a koeficient tření. Pokud dojde k porušení tenké vrstvy a k odkrytí podkladového slinutého karbidu, odolnost proti opotřebení si ještě určitou dobu udržuje svojí vysokou hodnotu. [2]

Hlavními faktory pro určení vlastností, a tím řezného výkonu, jsou druh a způsob depozice tenké vrstvy, její tloušťka a použitý substrát. Pro řezný výkon je důležitá drsnost povrchu a koeficient tření. Větší drsnost je obvykle způsobena mikročásticemi vzniklými při depozici. Obvykle se drsnost pohybuje v rozmezí Ra 0,05 μm až Ra 0,25 μm. V současné době se vyvíjejí tenké vrstvy s vynikajícími kluznými vlastnostmi. [2]

Při nižších řezných rychlostech převládá abrazivní opotřebení, je tedy výhodné používat nejtvrďší tenké vrstvy, u kterých tak dojde k nárůstu trvanlivosti. Při vysokých řezných rychlostech převládá tepelné opotřebení a pro vyšší trvanlivost je potřeba použít tenké vrstvy s vysokou termochemickou stabilitou. [4]

Tab. 4 Základní srovnání vlastností materiálů tenkých vrstev [2]

Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Nejlepší	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN
	TiN	TiN	TiCN	TiN
	TiCN	TiCN	Al ₂ O ₃	TiCN
Nejhorší	TiC	TiC	TiN	TiC

Chemická stabilita je schopnost odolávat chemickým reakcím s obráběným materiálem, zejména za vysokých teplot. Tato schopnost se může znatelně měnit vzhledem k obráběnému materiálu a použitým řezným podmínkám.

Tloušťka tenké vrstvy je většinou regulována mezi 2 až 10 μm, u větších tlouštěk dochází snáze k vydrolování vrstvy v důsledku kohezního poškození (vliv vysokých zbytkových napětí). Při použití, kde je nástroj vystaven rázům (např. při frézování) dochází u povrchu

k mikrovydrolování, je proto vhodnější používat vrstvy s menší tloušťkou, zejména vytvořené metodou PVD. Tyto tenké vrstvy díky nižší teplotě depozice nemají defekty a trhliny, které se objevují u CVD vrstev kvůli používaným teplotám kolem 1000 °C. Slinuté karbidy deponované metodou PVD mají tedy vyšší odolnost proti vydrolování než slinuté karbidy deponované metodou CVD. Vrstvy vniklé pomocí metody CVD mají naproti tomu lepší adhezi a odolnost proti opotřebení. [2]

Pokud je vrstva příliš tenká, je řezný výkon silně ovlivněn vlastnostmi podkladu. Opotřebení nástroje je urychlováno plastickou deformací, proto opotřebení nástroje klesá s rostoucí tvrdostí podkladu. U těžkých a těžkých přerušovaných řezů je vydrolování eliminováno výběrem vysoce houževnatého podkladu (i když běžné opotřebení bude vyšší než u tvrdého podkladu). Další možností je použít substrát s gradientní strukturou. [2]

Důležitým parametrem je soudržnost tenké vrstvy s podkladem. Některé slinuté karbidy se vyrábějí s ohledem na budoucí depozici a jsou pro ni optimalizované.

3. Teplotní a chemické degradace slinitých karbidů

Tato část se podrobně zaměřuje na procesy a jejich dopad, jejichž principem působení je přenos tepla a změny teploty, a procesy, které vyvolávají chemickou změnu.

3.1. Teplotní zatěžování

3.1.1. Výroba

Slinováním musí projít každý slinitý karbid, aby získal požadované vlastnosti. Teploty slinování se obecně pohybují mezi 1400 a 1600 °C, 1400°C se používá pro slinité karbidy typu WC-Co. Při izostatickém lisování za tepla se používají teploty 1360 až 1420 °C. Bod tání Co je udáván jako 1490 °C. [2]

3.1.2. Pájení

Přestože většina nástrojů ze slinitého karbidu se vyrábí jako výměnné a mechanicky upínatelné, lze se stále ještě setkat s pájením nástrojů ze slinitého karbidu na ocelové tělo. Tyto spoje by měly obstát v prostředí s teplotou vyšší než 400 °C a s erozivními a korozními podmínkami. Používají se tedy různé slitiny s teplotou tavení mezi 900 až 1000 °C.

Slinuté karbidy se dají i svařovat, ale pouze elektronovým paprskem ve vakuu.

3.1.3. Obrábění

Při obrábění se břit při vstupu do obrobku ohřívá, díky rozdílu teplot na povrchu a ve vnitřní části obrobku vzniká na povrchu tlakové napětí. V okamžiku, kdy nástroj vyjede ze záběru, dochází k rychlému ochlazení povrchu a pomalejšímu ochlazení vnitřních částí, čímž vzniká na povrchu tahové napětí. Tyto teplotní rázy jsou tedy příčinou cyklického namáhání, které s pomocí mechanických rázů může způsobit vznik trhlin a následné porušení nástroje. [8]

3.2. Chemická degradace

3.2.1. Koroze

Cílem běžné koroze je materiál pojiva, pouze některá vybraná média napadají karbidy. Koroze nejčastěji rozpouští pojivo ve struktuře a nechává zrna karbidů, která jsou poté lehce odstraňována pryč. Velikost koroze tedy závisí většinou na schopnosti pojiva odolat chemickému napadení.

Korozní opotřebení je degradací materiálu za současného vlivu koroze a otěru. Tento kombinovaný efekt je mnohem větší než vliv těchto procesů samostatně. [1]

3.2.2. Oxidace

Už působení teplot mezi 600 a 1000 °C, což jsou teploty dosahované během používání slinitých karbidů, může vést ke zvýšené oxidaci. Výsledkem oxidace je porézní zoxidovaná vrstva na povrchu substrátu. Bylo zjištěno, že oxidy tvoří jak pojivový materiál a kovy z karbidů, tak oba materiály dohromady. [5]

3.2.3. Naleptávání

Ve většině případů se jedná o naleptávání pojiva, poškození karbidů je málo časté. Příkladem takového poškození slinutých karbidů je stripping.

4. Degradace slinutých karbidů v procesu výroby

V této kapitole jsou uvedeny procesy, které probíhají při jeho výrobě. Už v této etapě mohou na slinutý karbid působit tyto procesy negativně, ať už zhoršením vlastností nebo vytvořením predispozice pro takové zhoršení v budoucnu.

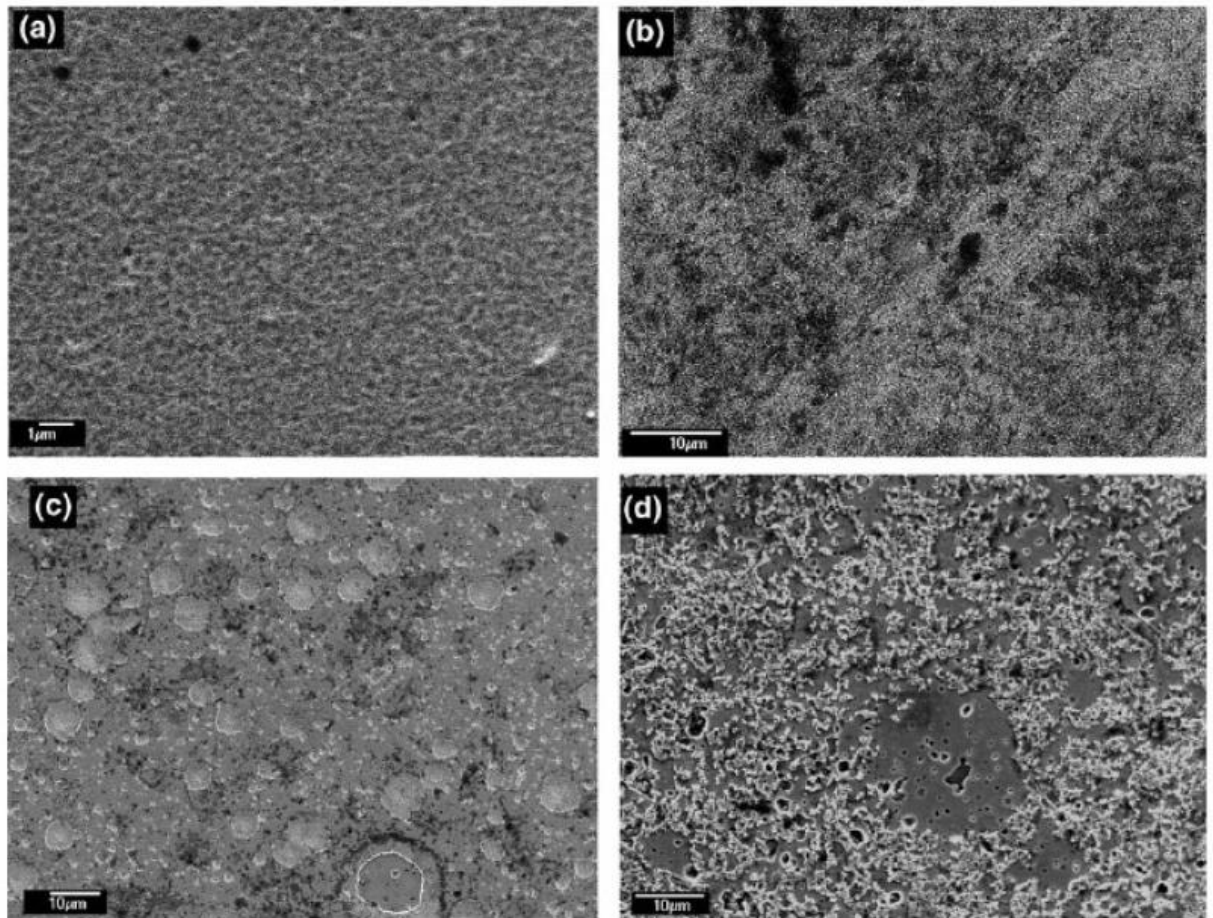
4.1. Mechanické úpravy

V průběhu slinování dochází v materiálu ke smrštění. Některé produkty ze slinutých karbidů již odpovídají požadavkům a lze je začít používat. U většiny slinutých karbidů jsou ale požadavky na přesnost a geometrii vysoké a je potřeba je upravit dle zadaných požadavků. Na to lze použít například elektroerozivní obrábění, soustružení nebo vrtání, ale nejdůležitější metodou úpravy je broušení. Tyto úpravy se dají rozdělit na finální, po kterých je slinutý karbid připraven k práci, a předdepozici, které se zaměřují na přípravu tvaru a povrchu nástroje na nanesení tenkých vrstev. [4]

4.2. Stripping

Strippingem se označuje renovace již dříve deponovaného nástroje. V mnoha případech je před novou depozicí potřeba odstranit předchozí vrstvy tenkých vrstev a následně musí slinutý karbid projít před dalším deponováním potřebnými úpravami povrchu. Základem strippingu je silné působení chemickou nebo elektrochemickou cestou, které rozpouští staré vrstvy. [4, 2]

Na rozdíl od strippingu nástrojů vyrobených z rychlořezných ocelí je stripping nástrojů ze slinutého karbidu zatím nevýhodný. Použité chemické látky, většinou nižší koncentrace peroxidu vodíku, totiž silně působí na kobaltové pojivo, které se rozpouští. Odleptání kobaltu do hloubky už 5 μm může způsobit vážné problémy při následném deponování a použití nástroje. Je tedy nutné tyto nástroje po strippingu přebrousit a naostřit a teprve poté je nechat projít předdepozici úpravami a depozicí. [4, 2]



Obr. 11 Stripping multivrstvy CrN [11]

- a) povrch před strippingem b) povrch po 800 s strippingu
c) povrch po 2000 s strippingu b) povrch po 3650 s strippingu

4.3. Předdepoziční procesy

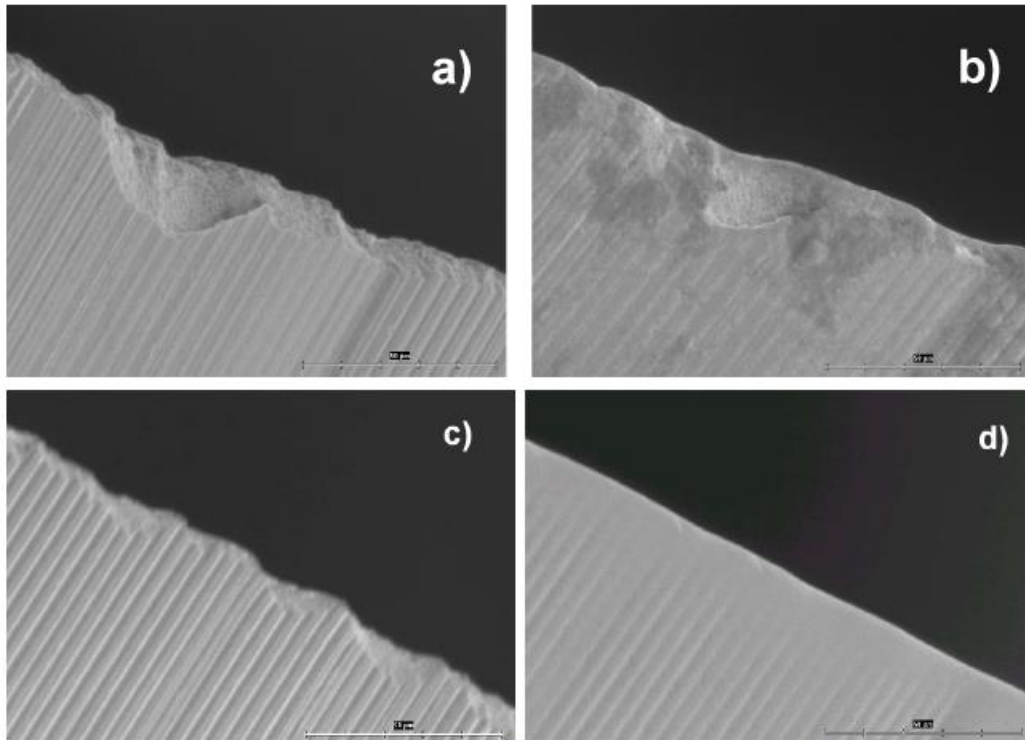
Předdepoziční procesy jsou obdobné jako finální úpravy u nedeponovaných slinutých karbidů, účelem je ale hlavně zlepšení adhezních vlastností povrchu. Jedná se o odstraňování nerovností, stop po broušení a nečistot. Na takovýchto místech by později docházelo k odlupování tenké vrstvy. Často se používá broušení jako základní úprava, následovaná jiným mechanickým procesem, jehož účelem je odstranit stopy po broušení a poté následuje chemické nebo iontové čištění jako finální úprava.

4.3.1. Mechanické procesy

Zde jde hlavně o zbavení se defektů, ořepů a ostrých hran. Ostré hrany by byly koncentrátoři napětí a mohly by poškodit deponovanou vrstvu.

Nejdůležitější je broušení, takzvaná rektifikace, protože je potřeba se zbavit ostrých nerovností. Významným faktorem pro výslednou adhezi je vhodný výběr brusiva a jeho nosiče. [2]

Otryskávání se provádí abrazivem, které je unášeno vzduchem o vysoké rychlosti. Jako abrazivo se používají syntetické nebo minerální tvrdé částice, popřípadě speciální mokré elastické částice. [4]



a) Hrana řezného nástroje ze slinutého karbidu před opracováním
b) Tatáž hrana po opracování proudem tvrdých částic
c) Broušená hrana řezného nástroje ze slinutého karbidu před opracováním
d) Tatáž hrana po otryskání kompozitními elastickými částicemi s abrazivem

Obr. 12 Výsledky otryskávání [4]

Při kartáčování, a někdy i při vlečném omílání, se používají ocelová nebo polymerní vlákna impregnovaná abrazivem. [4]

Zmenšení nerovností po broušení a zlepšení adheze lze také dosáhnout omíláním v nádobách naplněných granulátem a abrazivem. [2] Nejvíce intenzivní metodou je zde vlečné omílání, které se díky tomu využívá pro nástroje ze slinutých karbidů. V nádobě s granulátem rotuje centrální vřeteno, na kterém jsou rotační držáky na omílané předměty. Ty se tedy pohybují planetovým způsobem, což zajistí rovnoměrné omletí. [20]

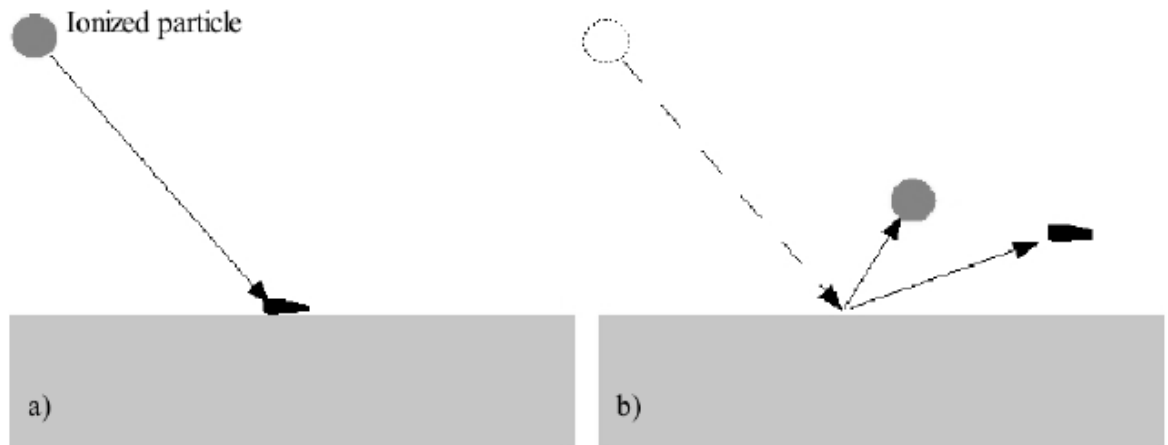
Alternativně lze také použít honování. [10]

Pro sériovou výrobu je vhodné pískování, které odstraňuje nečistoty ulpěné na povrchu i uchycené v mírně pórovitém povrchu. Používá se tvrdé abrazivo se zrnitostí mezi 20 až 100 μm . K negativním vlivům může patřit nevhodné zaoblení hran nebo odstranění měkčích fází u pájených nástrojů. [2]

4.3.2. „Nemechanické“ procesy

Chemické čištění se zaměřuje na odstranění organických nečistot a mastnoty, ale také na odstranění malých pevných částic. Toto čištění má několik kroků a pro zlepšení účinků se používá v kombinaci s ultrazvukem. Je důležité, aby se nástroje při procesu nedotýkaly sebe navzájem ani jiných tvrdých předmětů, aby nedošlo k poškození nástroje. Poté je nutné povrchy rychle a kvalitně vysušit. [4, 10]

Iontové čištění využívá kinetickou energii iontů, urychlených proti povrchu. Při špatně zvolených parametrech, vyšších energiích nebo delších časech je znatelné odprašování pojiva z povrchu a odkrývání karbidů. To může vyústit v rozvoj trhlin a narušení soudržnosti substrátu. [4, 10]



Obr. 13 Princip iontového čištění [10]

4.4. Depozice

Při depozici na slinutý karbid působí hlavně teplo, a to po delší časový úsek. Teploty se mohou při různých způsobech pohybovat mezi 300 až 1050 °C, kde nejníže se drží PVD a PACVD metody, které většinou probíhají pod 500 °C. U různých procesů se také liší doba vystavení této teplotě i doby ohřevu a chladnutí.

5. Experimentální program

Experimentální část bakalářské práce je zaměřena na porovnávání vlastností slinutého karbidu zjištěných pomocí laboratorních testů mezi vzorky s různými úpravami povrchu. Korelace těchto výsledků mezi sebou a také jejich porovnávání se známými hodnotami, ať už tabulkovými nebo získanými od výrobce slinutých karbidů, může určit vliv jednoduchých úprav vzorků na zásadní vlastnosti slinutého karbidu a také může přinést určitá doporučení pro praxi a pro praktické zkoušky. Zde se vychází z rozporu, kdy laboratorní testy a zkoušky se provádějí na vyleštěných vzorcích, zatímco v praxi se používají jiné úpravy. Jde hlavně o použití v hromadné výrobě, kde se výrobky nechávají strojově opracovat.

Cílem tohoto experimentu je zjistit, jak se mohou stejné vlastnosti lišit mezi sebou při jednoduchých změnách stavu povrchu použitých vzorků, tj. při změnách základních vlastností povrchu, které jdou zjistit podle nekomplikovaných laboratorních testů.

5.1. Materiál a vzorky

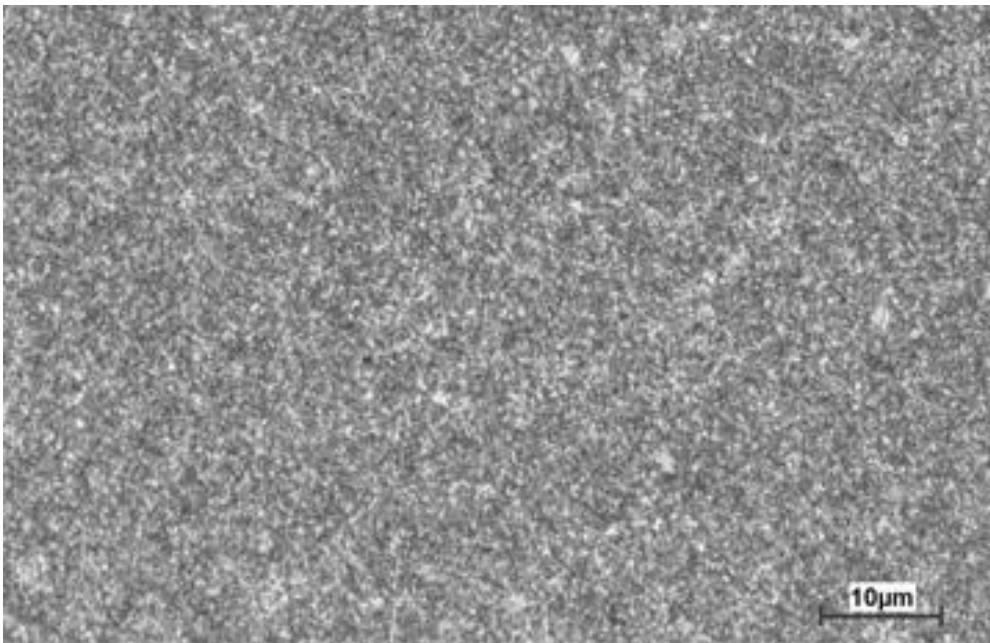
5.1.1. Materiál

Všechny vzorky použité při těchto experimentech jsou vyrobené ze slinutého karbidu, TSF 22 od firmy Ceratizit. Jedná se o ultrajemný (ultrafine) slinutý karbid s velikostí jednotlivých částic 0,2 až 0,5 μm . Podle výrobce je určen pro vysokorychlostní obrábění a obrábění tvrdých a velmi tvrdých materiálů s tvrdostí větší jak 60 HRC. V kombinaci s použitím tenkých vrstev se používá k obrábění a zpracování nejtvrdějších ocelí, kalených a těžko obrobitelných materiálů. Vyrábí se z něj například stopkové frézy pro obrábění nahrubo a načisto a výměnné břitové destičky na obrábění. Tyto nástroje jsou většinou dotvarovány broušením a například následným omíláním. U povrchu nástrojů je žádoucí mít co nejmenší drsnost. [11, 12]

Zkušební vzorky byly odděleny z tyče o průměru 14 mm a délce 310 mm.

Tab. 5 Základní informace dle výrobce [11]

Označení CERATIZIT	Označení ISO	Označení U.S.	Pojivo [m %]	Hustota [g/cm^3]	Tvrdost HV	Tvrdost HRA	K_{IC} [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]
TSF22	K10-K20	C-2	8,2 Co	14,55	1930	93,7	7,5



Obr. 14 Struktura ultrajemného SK od firmy Ceratizit [11]

5.1.2. Vzorky

Základem pro všechny typy zkušebních vzorků jsou části původní tyčoviny $\varnothing 14$ mm, které byly oddělené od tyčoviny na tloušťku materiálu 5 mm. Pro následné zkoušky se používají 3 různé úpravy povrchů tohoto slinutého karbidu.

První vzorek se po oddělení dále nijak neupravoval, má tedy hrubý povrch se znatelnými stopami po oddělování a neupravované boky.

Druhý vzorek byl následně po oddělení 1 hodinu omílán, při omílání byl první polovinu času upevněn za jedno čelo a druhou polovinu času za druhé čelo, a to pomocí média „HSC 1/300“ od firmy OTEC GmbH. Jedná se o médium vyrobené z drcených ořechových skořápek, které jsou impregnované práškovým SiC. Jeho požití je určeno právě pro nástroje vyrobené ze slinutých karbidů [14]. Otáčení středního rotoru probíhalo pravotočivě s rychlostí 50 ot/min a jednotlivé držáky rotovaly kolem své osy pravotočivě rychlostí 60 ot/min. Výsledkem je vyrovnanější povrch, než byl po oddělení z tyče, a také došlo k opracování bočních stěn. Stopy po oddělování jsou však pořád vizuálně znatelné.

Třetí typ vzorků byl po svém oddělení leštěn pomocí přípravku s 9 μm zrní diamantu pro zbavení povrchu veškerých viditelných stop po řezání. Následně byl ještě leštěn pomocí přípravků s 3 μm a 1 μm velkými diamantovými zrní. Boky vzorků zůstaly neopracované.

5.2. Zjištění zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakce

Jedná o použití rentgenové difrakce pro zjištění zbytkových napětí ve zkoumaných vzorcích. Jde o využití monochromatického rentgenového záření, kde při průchodu materiálem dochází k difrakci paprsku.

Měření byla provedena ve dvou na sebe kolmých směrech, transversálním (σ_T) a longitudinálním (σ_L).

Tab. 6 Hodnoty zbytkového napětí

Vzorek	$\sigma_L \pm \Delta\sigma_L$ [MPa]	$\sigma_T \pm \Delta\sigma_T$ [MPa]
Neopracovaný	-1581 ± 76	-1885 ± 66
Omílaný	-2105 ± 43	-2246 ± 65
Leštěný	-73 ± 64	-6 ± 25

Z dosažených výsledků vyplývá, že veškerá zbytková napětí uložená ve vzorcích jsou tlaková. Nejmenší hodnoty byly zjištěny u leštěného vzorku. To je způsobeno odstraněním mechanicky deformované vrstvy z povrchu vzorku. Jedná se o zbytková napětí uložená ve vnitřním objemu materiálu. Hodnoty zbytkových napětí u zbylých dvou vzorků jsou více než řádově větší než u leštěného vzorku, navíc je zde poměrově velká odchylka měření, která značně zneprůhledňuje toto měření. Hodnoty zbytkového napětí se u leštěného vzorku blíží k nule.

Největších hodnot zbytkového napětí dosahuje omílaný vzorek, kde se v mechanicky ovlivněné povrchové vrstvě ke zbytkovému napětí vzniklému při oddělování přidává ještě zbytkové napětí vzniklé omíláním. Napětí vzniklé omíláním je znatelně menší než to, které vzniklo při oddělování vzorků z původního materiálu.

Vzhledem k tomu, že se mezi měřeními v různých směrech objevují znatelné rozdíly, lze říci, že velký vliv na zbytkové napětí má i směr vzniku deformací na vzorku. Zde se jedná o viditelné stopy po oddělování vzorků z původního materiálu. Tyto stopy jsou zřetelné na neopracovaném i omílaném vzorku. Z výsledků je vidět, že je tímto ovlivněn i leštěný vzorek, i když u něj už jsou veškeré stopy odstraněny tak, že nejsou zřetelné ani pod mikroskopem.

5.3. Tvrdość dle Vickerse

Na všech třech typech vzorků byla změřena tvrdość dle Vickerse. Pro každý vzorek byly provedeny 3 měření, umístěné dostatečně daleko od sebe a také dostatečně daleko od okrajů. To je důležité, aby se vzájemně neovlivňovaly výsledky měření tvrdości a výsledky lomové houževnatosti, využívající tyto vtisky.

Jedná se o vnikací zkoušku, u které je jako indektor použitý diamantový jehlan o čtvercové podstavě a s vrcholovým úhlem $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Indektor je vlačován do povrchu materiálu kolmo, přesně danou silou a to bez rázů a chvění. V tomto případě bylo měřeno HV30, velikost zátěžné síly je tedy rovna 294,2 N. Výsledkem je čtvercový vtisk v materiálu, u kterého jsou důležité délky obou úhlopříček. Jejich průměrná hodnota z jednoho vtisku se spolu se zátěžnou silou dosadí do vzorce, ze kterého poté dostaneme hledanou hodnotu tvrdości HV. [15, 20]

Tab. 7 Hodnoty naměřené tvrdosti HV

Nepracovaný	Omílaný	Leštěný
1930	1950	1924
1941	1992	1952
1956	1917	1931

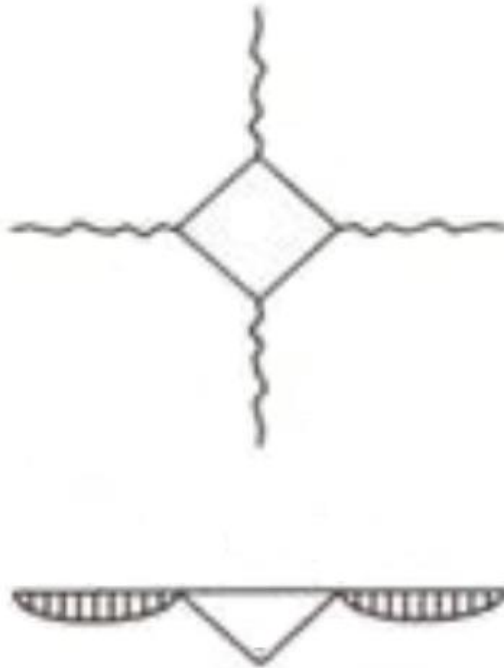
Tab. 8 Průměrné hodnoty HV

Nepracovaný	1942 ± 8
Omílaný	1953 ± 22
Leštěný	1936 ± 8

Ze zjištěných informací lze vypořádat, že výsledné hodnoty měření i jejich průměrné výsledky se od sebe liší pouze zanedbatelně. Při porovnání s tabulkovou hodnotou HV 1930 získanou od výrobce lze vidět, že jednotlivá měření vycházejí většinou lehce vyšší, tyto rozdíly jsou ale kvůli odchylce měření zanedbatelné. Z výsledků vyplývá, že žádná z těchto úprav nemění tvrdost tohoto slinutého karbidu.

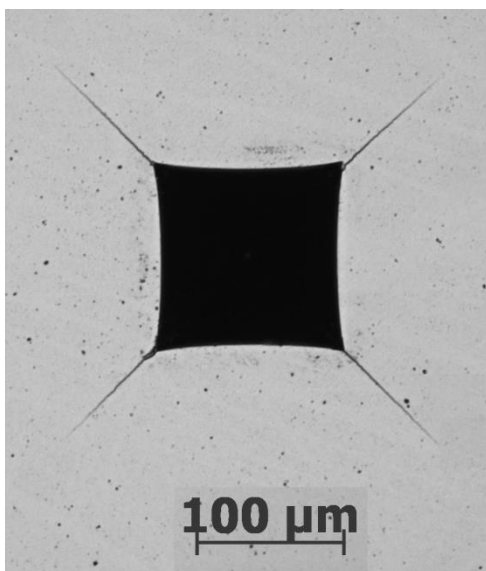
5.4. Lomová houževnatost K_{IC}

U všech tří vzorků byly zjištěny hodnoty lomové houževnatosti materiálu K_{IC} . Vzhledem k obtížné aplikovatelnosti standardních metod, vedoucích k vyšetření lomové houževnatosti pomocí přerušení materiálu, bylo v tomto případě využito metod, které vychází z hodnot délek trhlin vzniklých po zkoušce tvrdosti dle Vickerse. Existuje několik výpočtových vztahů, které se mohou použít, pro jejich výběr je nutné znát charakter vzniklých trhlin. Tyto trhliny mohou být mělké (Palmquistovi) nebo mediánní (hluboké). V tomto případě (a obecně pro slinuté karbidy) používáme metody pro mělké trhliny, a to pomocí Palmquista a pomocí Shettyho. [20]



Obr. 15 Palmquistova (mělká) trhlina [20]

Hodnoty lomové houževnatosti by měly být platné pro celý objem materiálu, můžeme tedy předpokládat, že čím intenzivnější povrchové úpravy jsou u vzorku použity, tím se vlivem vnesených pnutí budou výsledky získané z povrchu odlišovat. Nejpřesnější výsledky se díky tomu předpokládají u leštěného vzorku, kde je z povrchu odstraněna mechanicky deformovaná vrstva. [20]



Obr. 16 Ilustrační snímek vtisku s trhlinami [19]

5.4.1. Výpočet lomové houževnatosti dle Palmquista [20]

Zde je pro výpočet nutné znát změřenou hodnotu HV, zátěžnou sílu tohoto měření a součet délek trhlin daného vtisku.

$$W_k = 0,028 * \sqrt{HV} * \sqrt{W_g}$$

$$W_g = \sqrt{\frac{F}{\Sigma L}}$$

Lomová houževnatost dle Palmquista – W_k [MN*m^{-3/2}]

Palmquistova houževnatost – W_g [N/mm]

Tvrдость dle Vickerse – HV [-]

Zatížení – F [N]

Součet délek trhlin – ΣL [mm]

Tab. 9 Hodnoty K_{IC} podle Palmquista [MN*m^{-3/2}]

Nepracovaný	Omílaný	Leštěný
6,7	7,2	6
7	7	6,1
6,6	6,9	6

Tab. 10 Průměrné hodnoty K_{IC} podle Palmquista [MN*m^{-3/2}]

Nepracovaný	6,79 ± 0,11
Omílaný	7,01 ± 0,07
Leštěný	6,03 ± 0,04

Ze zjištěných hodnot je na první pohled patrné, že leštěný povrch vykazuje nižší lomovou houževnatost než další dva vzorky. To je způsobeno odstraněním mechanicky ovlivněné vrstvy a jedná se tedy o lomovou houževnatost, která by měla být platná v celém vnitřním objemu materiálu. Omílaný vzorek vykazuje lehce (zanedbatelně) vyšší hodnoty než

neupravovaný. Je zde vidět, že čím více je mechanicky ovlivněna povrchová vrstva, tj. čím větší jsou hodnoty zbytkového napětí, tím vyšší jsou hodnoty lomové houževnatosti.

Hodnota lomové houževnatosti udávaná pro tento slinutý karbid výrobcem je $7,5 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$, je tedy jasně vidět, že výsledek výpočtů se liší a že výsledná lomová houževnatost vychází menší, než by měla být. Nicméně tyto hodnoty se neliší tak drasticky, aby se dalo předpokládat chybné měření. Je pravděpodobné, že všechny tyto úpravy, tj. i oddělování materiálu, které mají vzorky společné, vedlo ke snížení hodnot lomové houževnatosti.

Vzhledem k tomu, že tyto metody měří hodnoty lomové houževnatosti povrchu, je vidět, že v případě mechanicky ovlivněných povrchů budou vycházet vyšší hodnoty lomové houževnatosti, které mohou být v některých případech zavádějící. Pro zjištění hodnot platících v celém objemu materiálu je tedy potřeba tuto vrstvu odstranit.

5.4.2. Výpočet lomové houževnatosti dle Shettyho [20]

Při počítání lomové houževnatosti pomocí této metody stačí znát pouze změřenou tvrdost dle Vickerse a součet délek trhlin vtisku.

$$K_{IC} = 0,150449 * \sqrt{\frac{HV}{\Sigma L}}$$

Lomová houževnatost – K_{IC} [$\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$]

Tvrdost dle Vickerse – HV [-]

Součet délek trhlin – ΣL [mm]

Tab. 11 Hodnoty K_{IC} podle Shettyho [$\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$]

Nepracovaný	Omílaný	Leštěný
11,5	12,8	9,2
12,4	12,3	9,4
11,2	12,2	9,1

Tab. 12 Průměrné hodnoty K_{IC} podle Shettyho [$\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$]

Nepracovaný	$11,7 \pm 0,3$
Omílaný	$12,4 \pm 0,2$
Leštěný	$9,25 \pm 0,09$

Výsledky získané pomocí vzorce podle Shettyho se na první pohled liší od výsledků získaných výpočtem podle Palmquista i od hodnoty udávané výrobcem.

Lze zde vyzorovat stejnou závislost na délce trhlin jako u přechodí metody, je zde jasně vidět, že leštěný vzorek má výslednou lomovou houževnatost výrazně menší než oba další vzorky a z nich omílaný vzorek má vyšší hodnotu lomové houževnatosti. Toto bylo viditelné už před použitím výpočtových metod, když trhliny na leštěném vzorku byly jednoznačně delší.

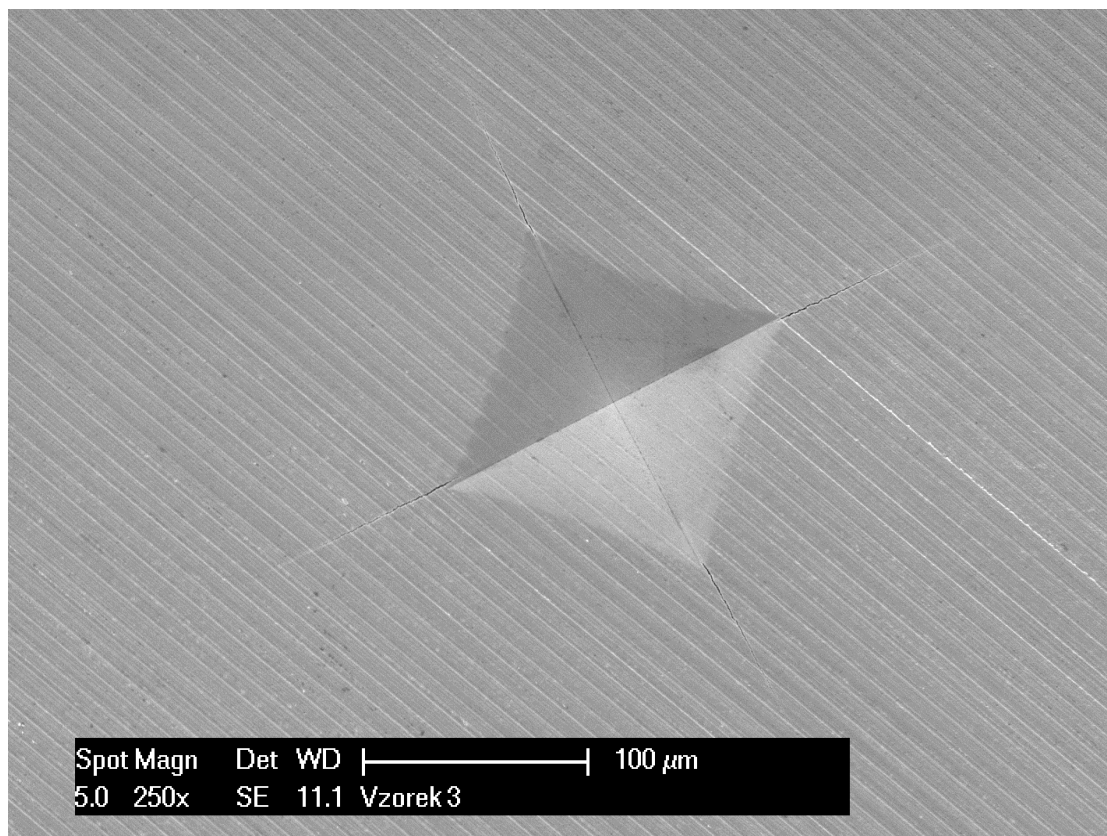
Omílaný vzorek v obou případech vykazuje nejvyšší hodnoty lomové houževnatosti, to je způsobeno vnesením dalšího napětí do povrchové vrstvy, navíc oproti neupravenému i leštěnému vzorku, kde je tato vrstva odstraněna.

Obecně zde platí vše, uvedené u metody dle Palmquista.

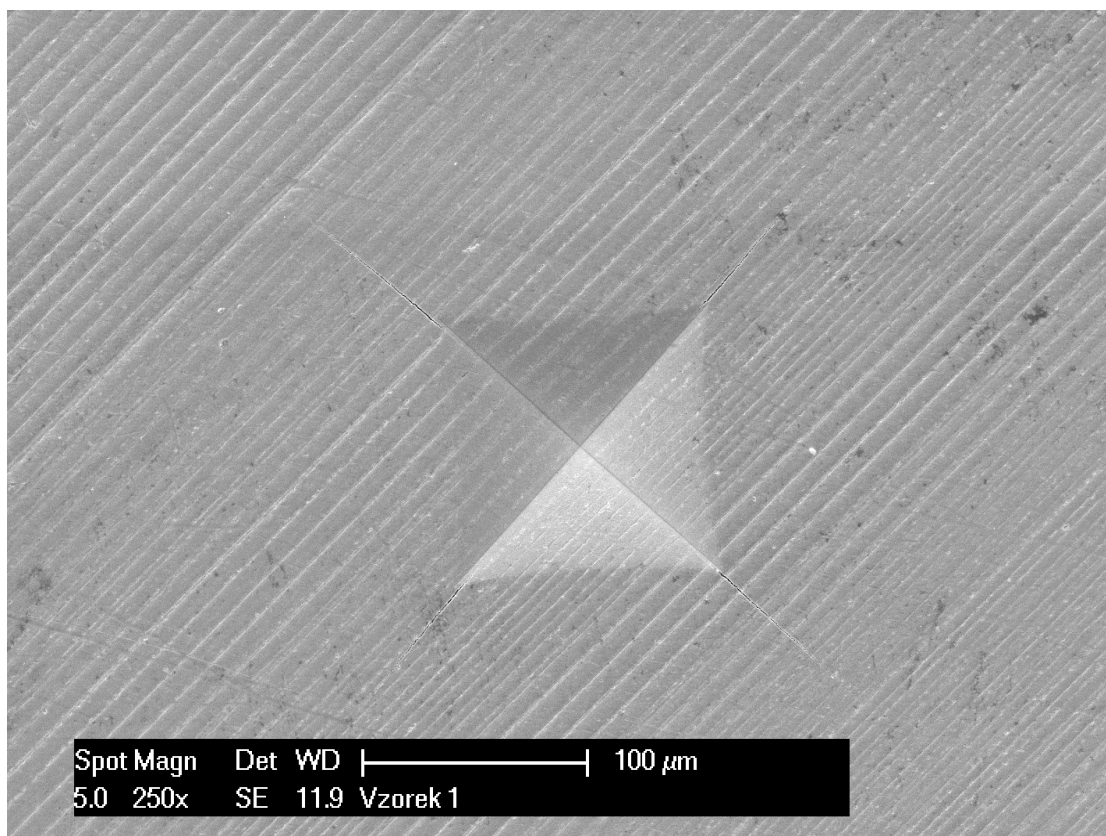
5.5. Pozorování vtisků a trhlin pomocí REM

Na řádkovacím elektronovém mikroskopu byla provedena focení jednotlivých vtisků a trhlin vzniklých při měření tvrdosti dle Vickerse. Zvětšení pro tato snímání jsou 250x a 1000x.

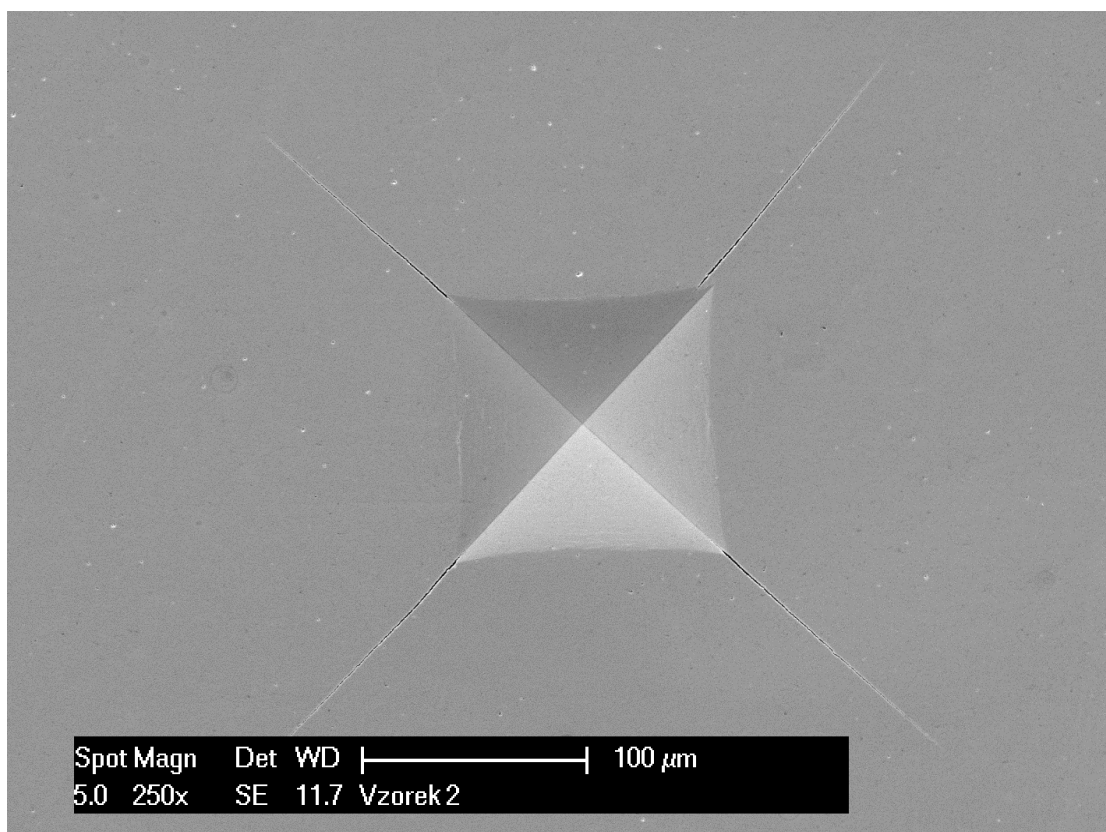
5.5.1. Dokumentace vtisků



Obr. 17 Snímek vtisku na neopracovaném vzorku



Obr. 18 Snímek vtisku na omílaném vzorku

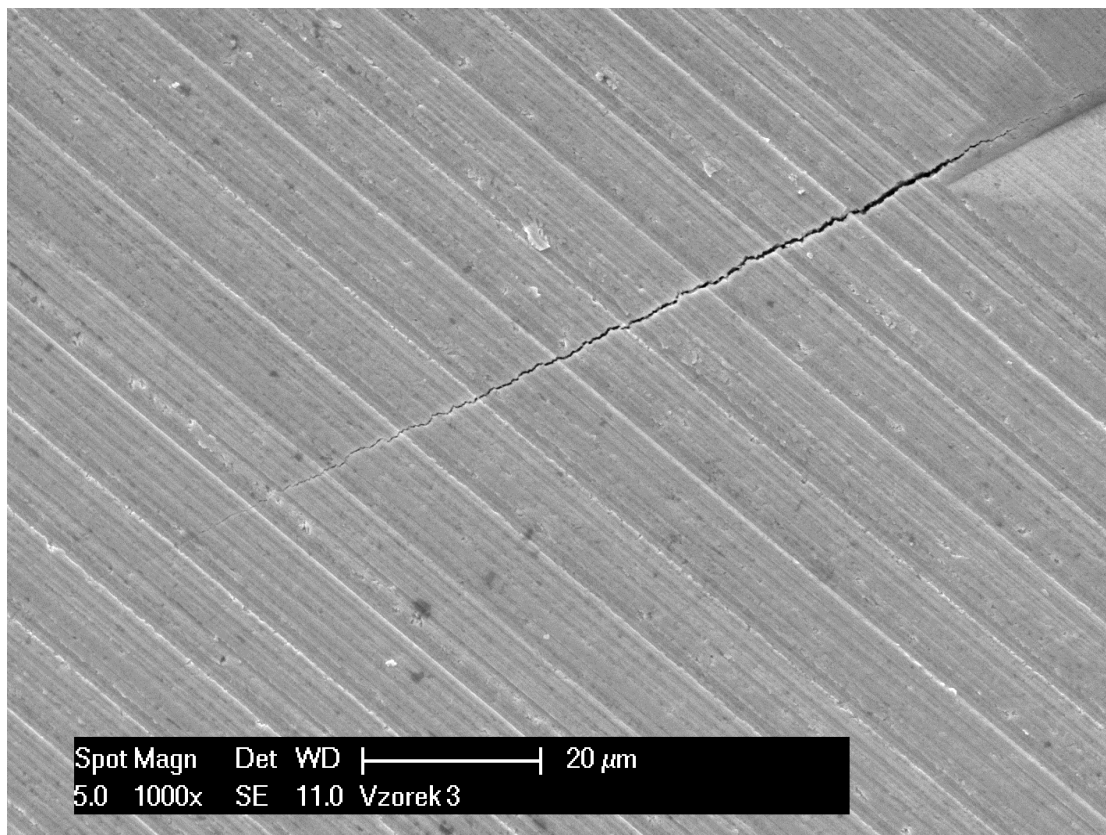


Obr. 19 Snímek vtisku na leštěném vzorku

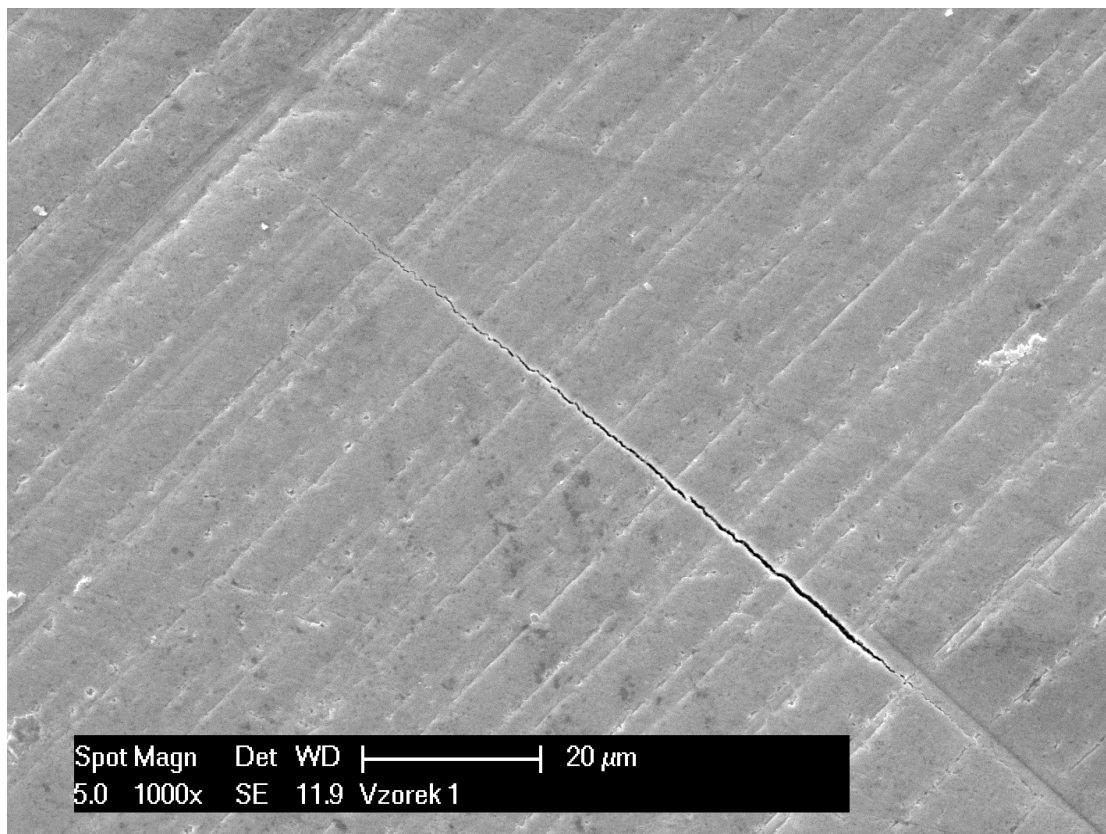
Na těchto snímcích se dají pozorovat 2 body zájmu. První je vizuální podoba povrchu. Leštěný vzorek je na první pohled rozlišitelný od zbylých dvou a je vidět, že jeho povrch má menší drsnost. Na obou dalších vzorcích můžeme pozorovat na povrchu stopy po oddělování vzorků z tyčoviny. Vliv omílání není vizuálně příliš znatelný.

Druhým pozorovaným bodem je vizuální délka trhlin. Ty jsou u leštěného vzorku znatelně delší, u zbylých dvou jsou vizuálně srovnatelné. To naznačuje, že hodnota lomové houževnatosti u leštěného vzorku bude nejmenší a že rozdíly mezi dvěma zbylými vzorky budou menší než oproti leštěnému vzorku.

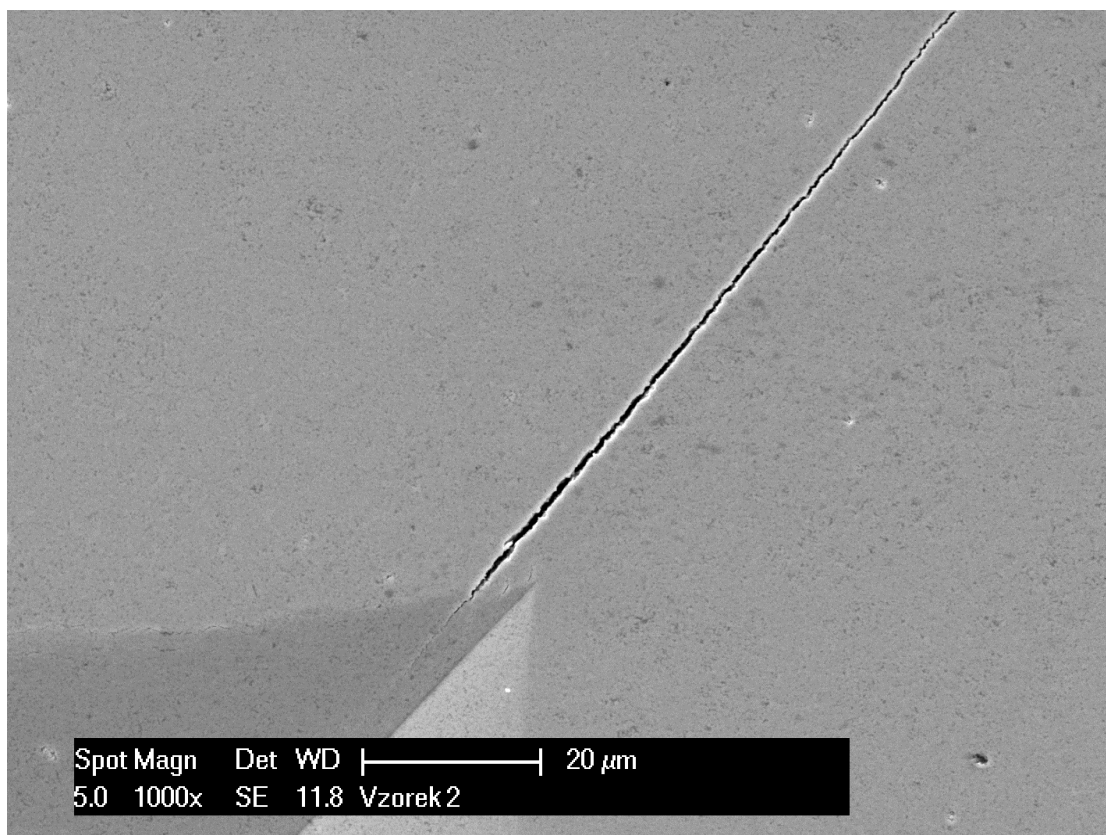
5.5.2. Dokumentace trhlin iniciovaných vtiskem



Obr. 20 Snímek trhlin na neopracovaném vzorku



Obr. 21 Snímek trhlin na omílaném vzorku

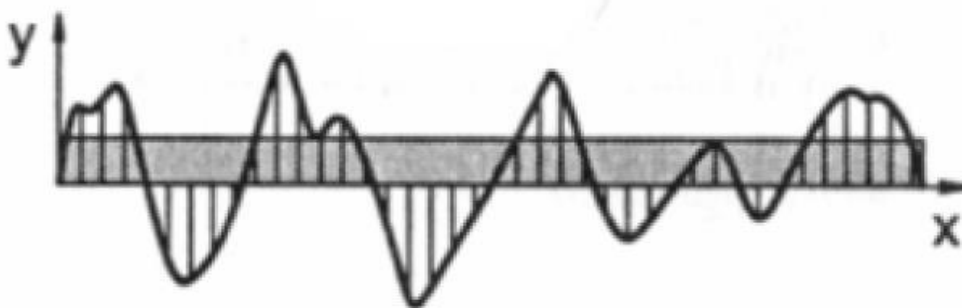


Obr. 22 Snímek trhlin na leštěném vzorku

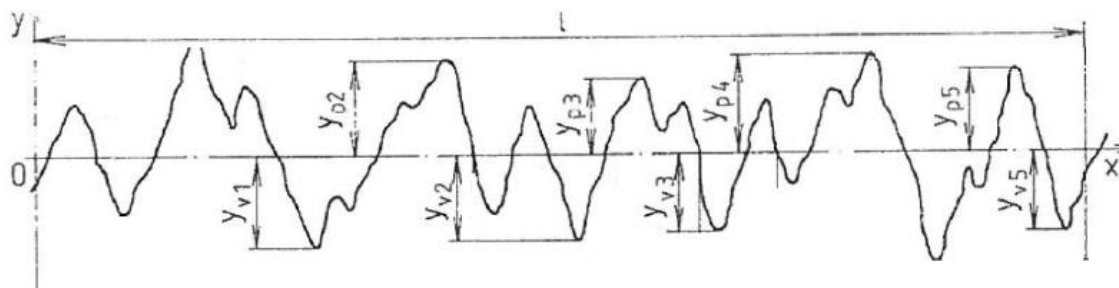
Z těchto snímků je zřejmé, že počátek vzniku trhlin se nenachází přesně v rohu vtisku, tj. nevychází z bodu s největší místní koncentrací napětí. Dále můžeme konstatovat, že trhliny mají přímý tvar a nevětví se. Také už je při tomto přiblížení znatelný vizuální rozdíl mezi neopracovaným a omílaným povrchem, u omílaného lze pozorovat vyhlazení povrchu.

5.6. Drsnost povrchu

U každého ze tří vzorků byla změřena drsnost povrchu. Měření probíhalo zkoumáním pěti povrchových čar dlouhých 1,5 mm na každém měřeném vzorku s posuvovou rychlostí 0,15 mm/s. Výsledkem těchto měření je drsnost R_a , tj. střední aritmetická úchylka povrchu a drsnost R_z nebo-li střední vzdálenost mezi pěti nejvyššími a pěti nejnižšími body zjištěného profilu od jeho střední čáry. [16]

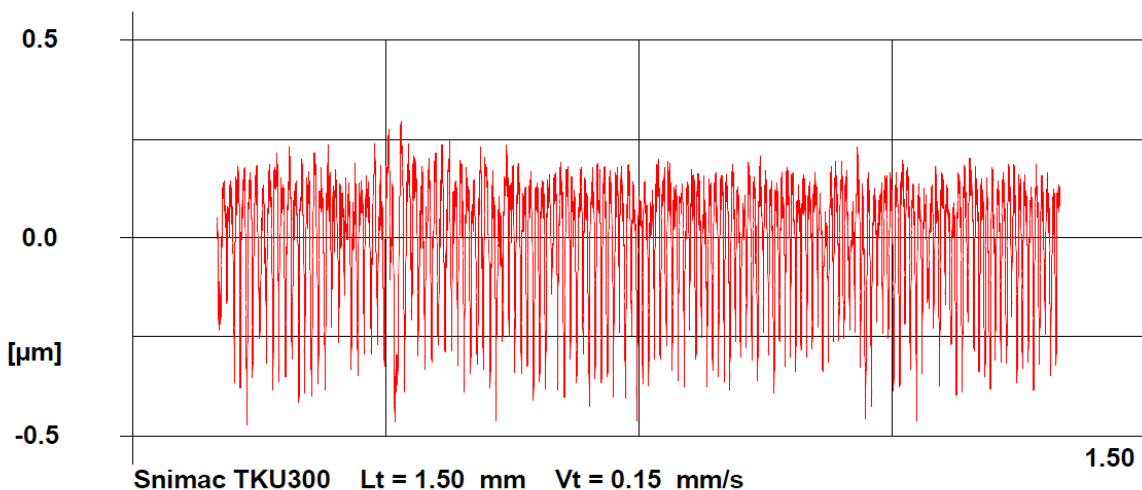


Obr. 23 Schéma profilu pro měření drsnosti R_a [16]

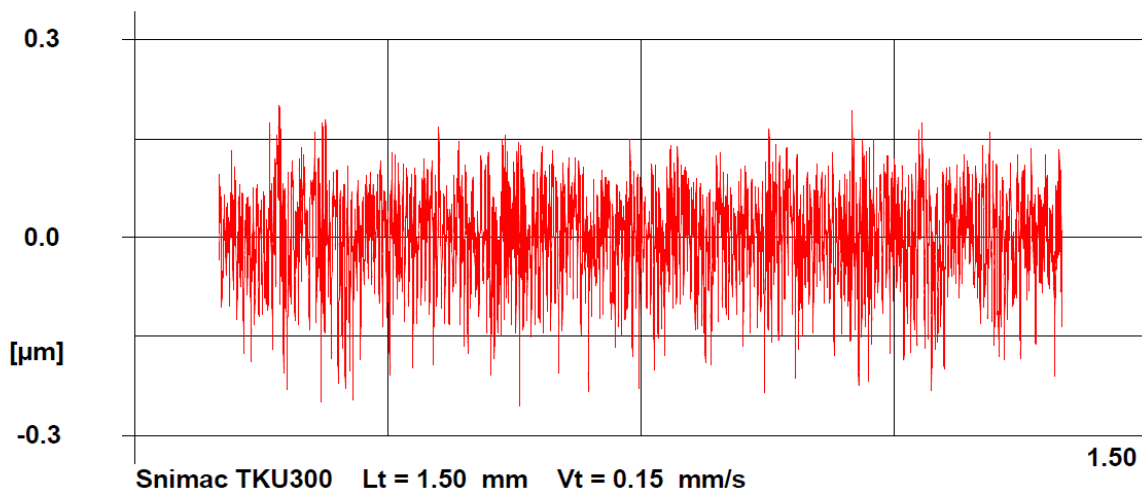


Obr. 24 Schéma profilu pro měření drsnosti R_z [16]

R- Profil vyrovnan Filtr ISO 11562 Lc = 0.080 mm



R- Profil vyrovnan Filtr ISO 11562 Lc = 0.080 mm



Obr. 25 Porovnání získaných profilů s největší a nejmenší drsností (Ra i Rz)

Tab. 13 Hodnoty drsnosti Ra [μm]

Nepracovaný	Omílaný	Leštěný
0,08	0,08	0,04
0,08	0,06	0,05
0,06	0,06	0,06
0,09	0,06	0,07
0,12	0,06	0,07

Tab. 14 Průměrné hodnoty drsnosti Ra [μm]

Nepracovaný	0,0860 \pm 0,0098
Omílaný	0,064 \pm 0,004
Leštěný	0,058 \pm 0,006

Číselné hodnoty drsností Ra se od sebe neliší nijak extrémně, nejvyšších hodnot dosahuje očekávaně neupravený vzorek. Leštěný vzorek má sice ve výsledku hodnoty drsnosti nejnižší, ale pravděpodobně kvůli ručnímu leštění mají jednotlivá měření větší rozptyl než strojově omílaný vzorek, který má díky tomu průměrnou hodnotu drsnosti jen o málo vyšší než leštěný vzorek.

Tyto výsledky lze aplikovat i na výsledky drsnosti Rz, díky většímu absolutnímu rozdílu jsou tyto odlišnosti více patrné.

Tab. 15 Hodnoty drsnosti Rz [μm]

Nepracovaný	Omílaný	Leštěný
0,51	0,53	0,35
0,52	0,44	0,38
0,45	0,44	0,39
0,58	0,44	0,48
0,70	0,42	0,49

Tab. 16 Průměrné hodnoty drsnosti Rz [μm]

Nepracovaný	0,55 \pm 0,04
Omílaný	0,45 \pm 0,02
Leštěný	0,42 \pm 0,03

5.7. Měření odolnosti vůči opotřebení pomocí tribologického testu

Tribologie se obecně zabývá chováním dotýkajících se povrchů při vzájemném pohybu, jde zde hlavně o tření, opotřebení a mazání. Existuje více zkušebních metod, které lze použít, volí se podle znalosti reálných podmínek. Většinou se jedná o technologické zkoušky, které nejsou mezi sebou porovnatelné a platí pro určitou kombinaci (technologických) podmínek. Získané hodnoty je tedy potřeba porovnávat s hodnotami získanými za stejných podmínek a při stejných parametrech zkoušky. [13]

V tomto případě se postupovalo dle normy ASTM G99, testovaný vzorek byl upevněn na rotační stolek a pomocí kuličky z Al_2O_3 , působící přítláčnou silou při rotaci stolku, bylo vytvořeno opotřebení v dráze kuličky. Parametry zkoušky se volí takové, aby vzniklé opotřebení bylo dobře znatelné, tj. tvrdost kuličky musí být vyšší než tvrdost vzorku, zatížení a počet cyklů musí být dostatečně velké. Výslednou hodnotou opotřebení je vypočítaná ztráta objemu vzorku (disk volume loss). [21]

$$\text{Ztráta objemu [mm}^3\text{]} = \frac{\pi * R * W^3}{6 * r}$$

Poloměr opotřebené kružnice – R [mm]

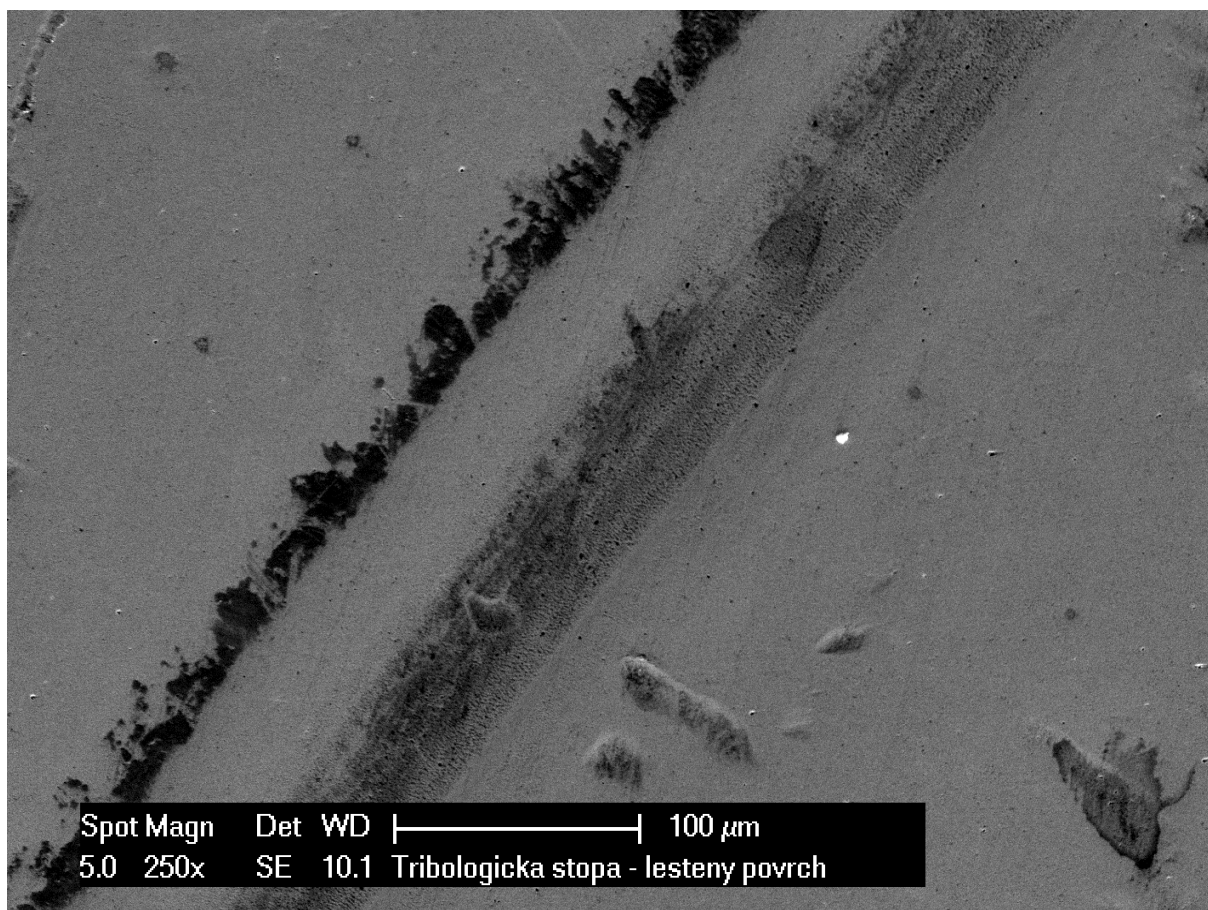
Šířka opotřebené stopy – W [mm]

Poloměr kuličky – r [mm]

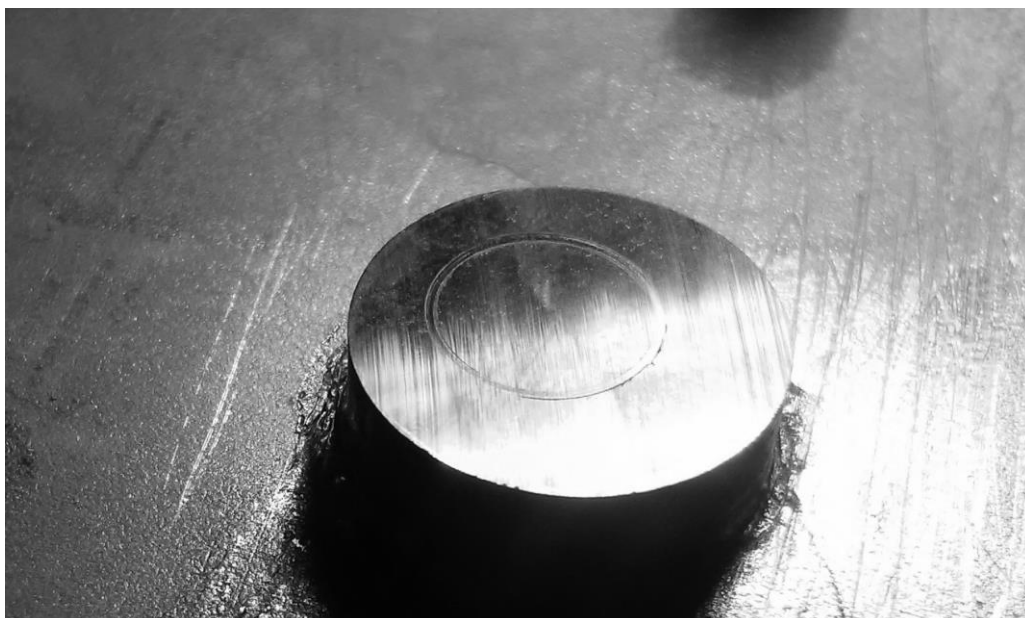
Tab. 17 Parametry zkoušky

Přítláčná síla [N]	10
Počet cyklů	15000
Otáčky stolku [ot/min]	252

Pomocí pozorování povrchu pomocí REM bylo zjištěno, že stopa opotřebení není u omílaného a neopracovaného vzorku viditelná, protože ji překrývá vrstva tvořená adhezně uchyceným materiálem kuličky o větší šířce. Šířka stopy byla tedy změřena značně nepřesně a získané hodnoty jsou jen orientační. U leštěného povrchu je šířka stopy dobře zřetelná, i zde se však objevuje stopa uchyceného materiálu kuličky. Pro další zkoušky by bylo potřeba použít kuličku s lepšími vlastnostmi oproti testovanému vzorku, popřípadě také zvýšit parametry zkoušky pro získání více znatelné stopy u prvních dvou vzorků.



Obr. 26 Tribologická stopa (vpravo) a stopa materiálu kuličky (vlevo) na povrchu leštěného vzorku



Obr. 27 Stopa na vzorku

Tab. 18 Orientační hodnoty odstraněného objemu [mm³]

Nepracovaný	0,000079958
Omílaný	0,000079085
Leštěný	0,000108892

Obecně platí, že čím je větší objem materiálu, který se oddělil od vzorku, tím je jeho odolnost proti opotřebení a ošetrivost menší. Zde vychází nejhůře leštěný vzorek, oba další vzorky mají výsledky lepší. Získané hodnoty jsou sice pouze orientační, ale korelovaly by s podobnými výsledky získanými při měření lomové houževnatosti.

5.8. Zjištění korozních vlastností pomocí potenciometru

Obecně se jedná o stanovení korozní rychlosti elektrochemickými polarizačními metodami, kde se v tomto případě bude postupovat pomocí zjišťování velikosti polarizačního odporu R_p . Tyto metody jsou podstatně rychlejší než například měření pomocí hmotnostních úbytků. [18]

Principem této metody je sledování závislosti mezi potenciálem kovu a procházejícím proudem, pomocí které se stanoví rychlost rovnoměrné koroze. Metoda měření polarizačního odporu dovoluje stanovit rychle okamžitou korozní rychlost, aniž by byl vzorek výrazněji polarizován. [18]

$$R_p = \frac{\Delta E}{j}$$

$$\Delta E = (E - E_{kor})$$

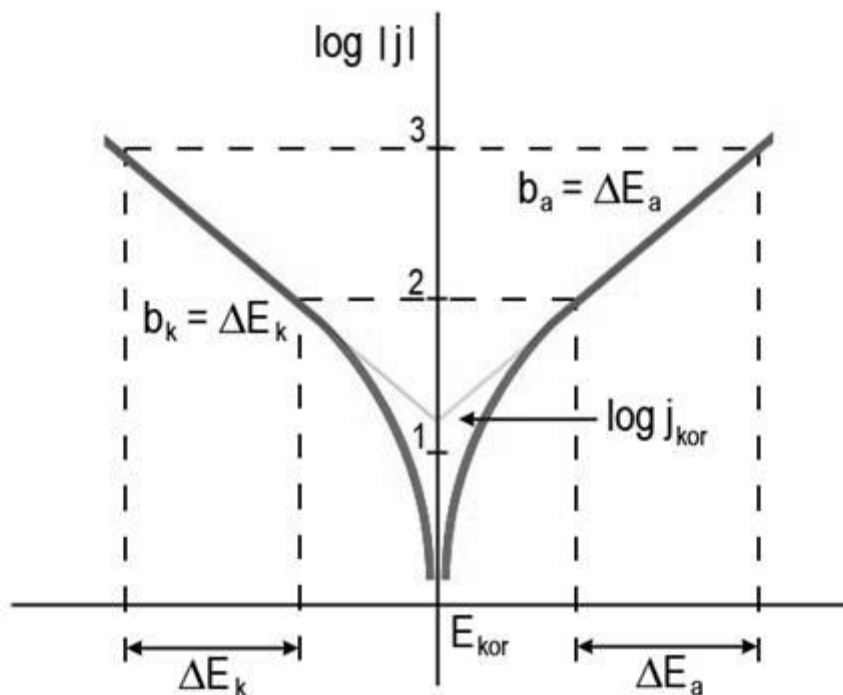
Polarizační odpor – R_p

Proudová hustota – j

Polarizace – ΔE

Potenciál – E

Korozní potenciál – E_{kor}

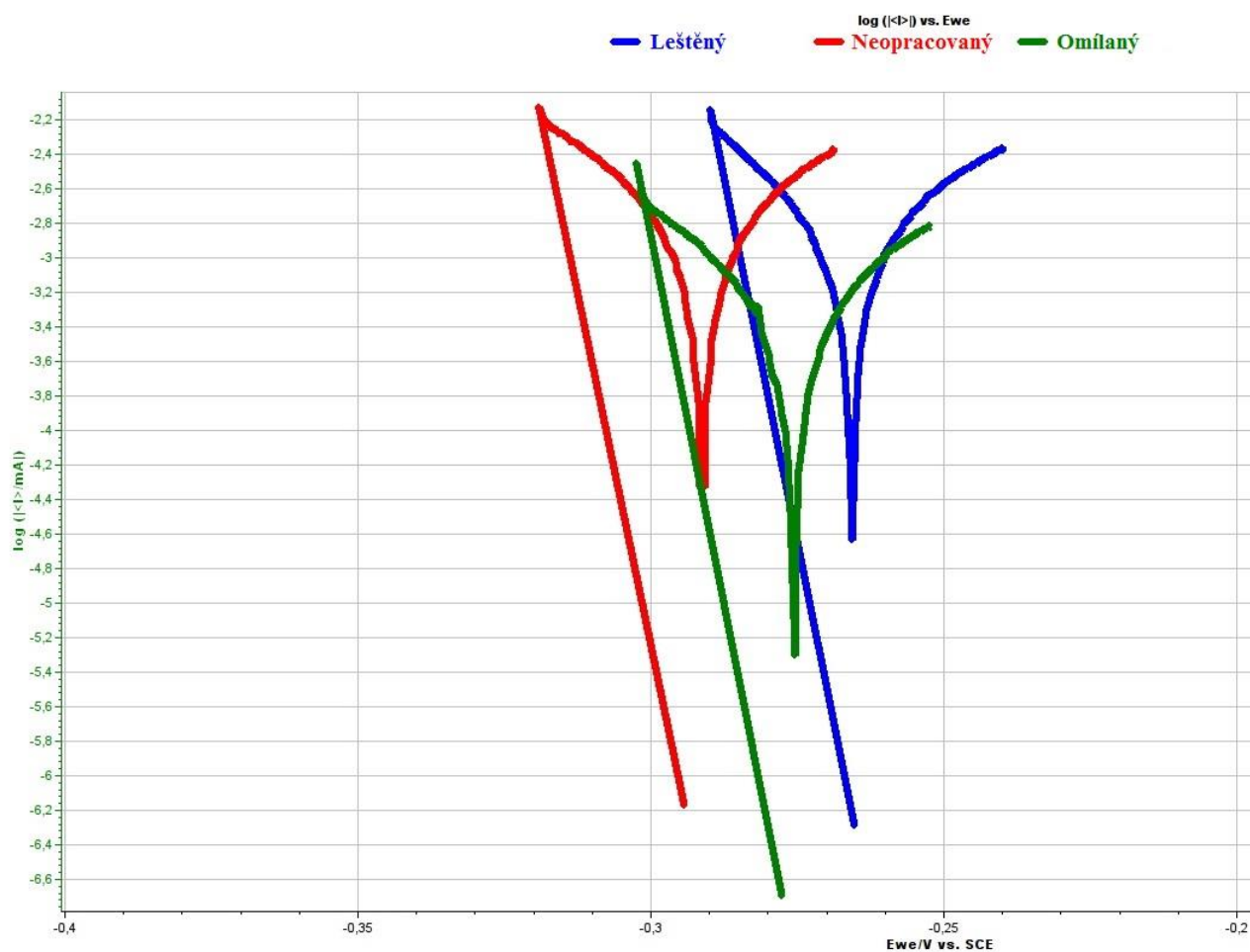


Obr. 28 Extrapolace korozní proudové hustoty za závislosti mezi potenciálem a proudovou hustotou

Měření probíhá při zapojení vzorku jako elektrody, E_{kor} je stanoven vůči nasycené kalomelové elektrodě (SCE). Jako korozní prostředí byl použit 1M roztok NaOH. Jeho Ph je 13, je tedy agresivnější než prostředí normálně se vyskytující při obrábění (řezné kapaliny mají Ph mezi 8,8 a 9,3). Byl použit Potenciostat BioLogic SP-150, který obecně umožňuje měření pomocí celé řady elektrochemických metod. Jeho výhodou je také realizace zrychlené korozní zkoušky.



Obr. 29 Potenciostat BioLogic SP-150 pro měření polarizačního odporu



Obr. 30 Srovnání křivek získaných pomocí měření

Tab. 19 Výsledné hodnoty odolnosti vůči korozi

Vzorek	E_{kor} [mV/SCE]	R_p [Ohm]	I_{corr} [mikroA]	Corr rate [mmpy]
Neopracovaný	-291	5055	5,16	0,0039
Omílaný	-275	5059	5,1	0,0048
Leštěný	-265	5414	4,818	0,0039

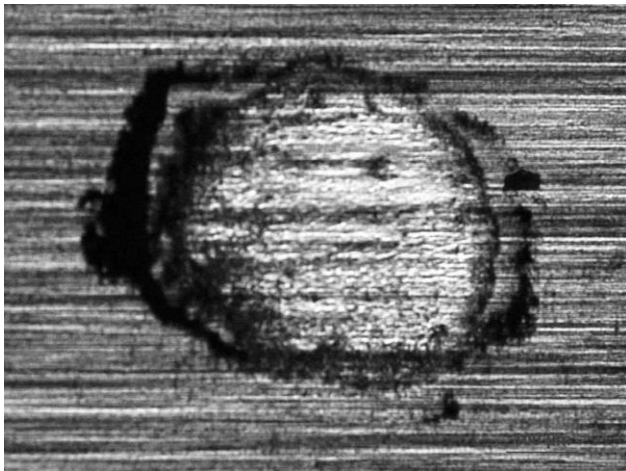
Při porovnání výsledků je vidět, že v rámci změřených veličin má leštěný vzorek nejlepší výsledky, rozdíly jsou ale tak malé, že lze považovat korozní vlastnosti jednotlivých vzorků za srovnatelné. Očekává se, že při praktickém použití nebudou zjištěné rozdíly. Obecně to znamená, že korozní odolnost stejného materiálu je nezávislá na vloženém zbytkovém napětí a stavu povrchu.

5.9. Impact test

Účelem podrobení vzorků tomuto testu bylo zjištění odolnosti slinutého karbidu v závislosti na úpravě povrchu proti rázovému namáhání (rázovému dynamickému kontaktnímu zatížení). Aby se zvýšil vliv upraveného povrchu zkušebních vzorků, bylo pro tento experiment zvoleno využití nižších sil za delšího působení (větší množství úderů).

Princip této metody spočívá ve vystavení povrchu velkému počtu úderů impactovým indentorem (v tomto případě kuličkou), který naráží do jednoho přesně stanoveného místa. V tomto místě vzniká intenzivně zatížená oblast s lokálním poškozením povrchu, impactový kráter. Impact test dobře simuluje reálné situace a lze ho použít i na měření odolnosti povrchů a tenkých vrstev. Také je využitelný pro zjišťování rázové kontaktní únavy. Podle svého principu fungování a frekvence úderů lze rozdělit impact testery na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. [17, 19]

Výsledkem tohoto měření je hlavně morfologie povrchu. V kráteru vznikají povrchové degradační jevy, jako jsou trhliny, praskliny a odtrhávání částecek a v ideálních případech lze na kráteru rozeznat 3 oblasti, které se liší mechanismem porušení. [19]



Obr. 31 Ilustrační snímek ideálního impactového kráteru [19]



Obr. 32 Obvyklé degradační jevy v impact kráteru

Měření probíhalo na elektronicky řízeném impact testeru, který experimentu pracuje na následujícím principu: Vzorek je pevně připevněn ke stolu. Nad vzorkem je umístěno rameno na konci s indentorem, v tomto případě s karbidovou kuličkou o průměru 6 mm. Rameno je střídavě přitahováno elektromagnetem a po úderu je hnací síla vypnuta a rameno se vrací do původní polohy pomocí pružin. Přítlačná síla je regulována pomocí omezovače proudu a pomocí vzduchové mezery mezi elektromagnetem a kotvou. Pod vzorkem je umístěn piezoelektrický tenzometrický snímač Kistler, který zaznamenává zatížení s frekvencí 17 kHz. Signál je posléze zpracován pomocí počítačového programu LabView. Vzhledem k tomu, že se jedná o měření dynamických veličin, měření síly je tedy zatíženo chybou, kterou není možno jednoduše stanovit, pro měřenou veličinu je užívána jednotka daN – dynamický Newton. Přístroj je kalibrován na statickou zátěž pomocí závaží.

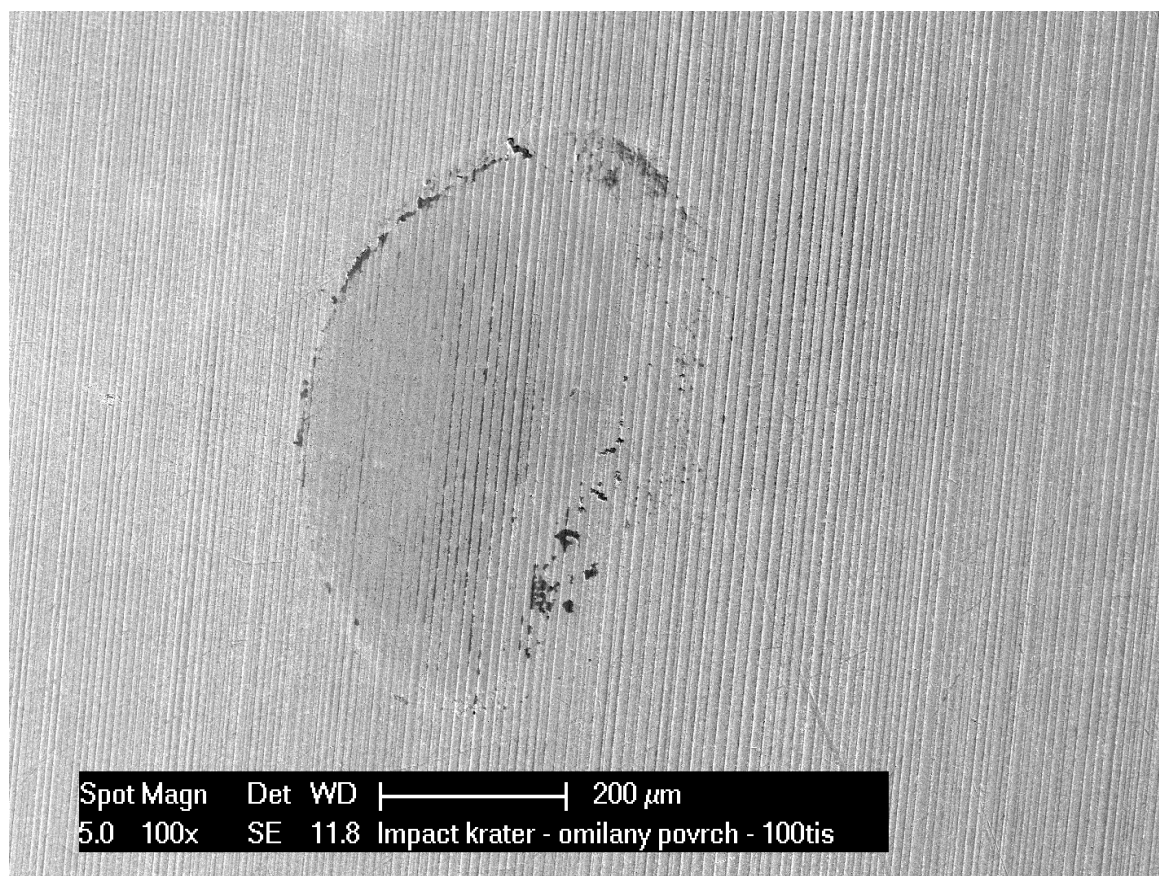
Tab. 20 Parametry zkoušky

	1. test	2. test
Síla dopadu [daN]	300	500
Počet dopadů	50 000	100 000
Frekvence zatěžování [Hz]	8	8

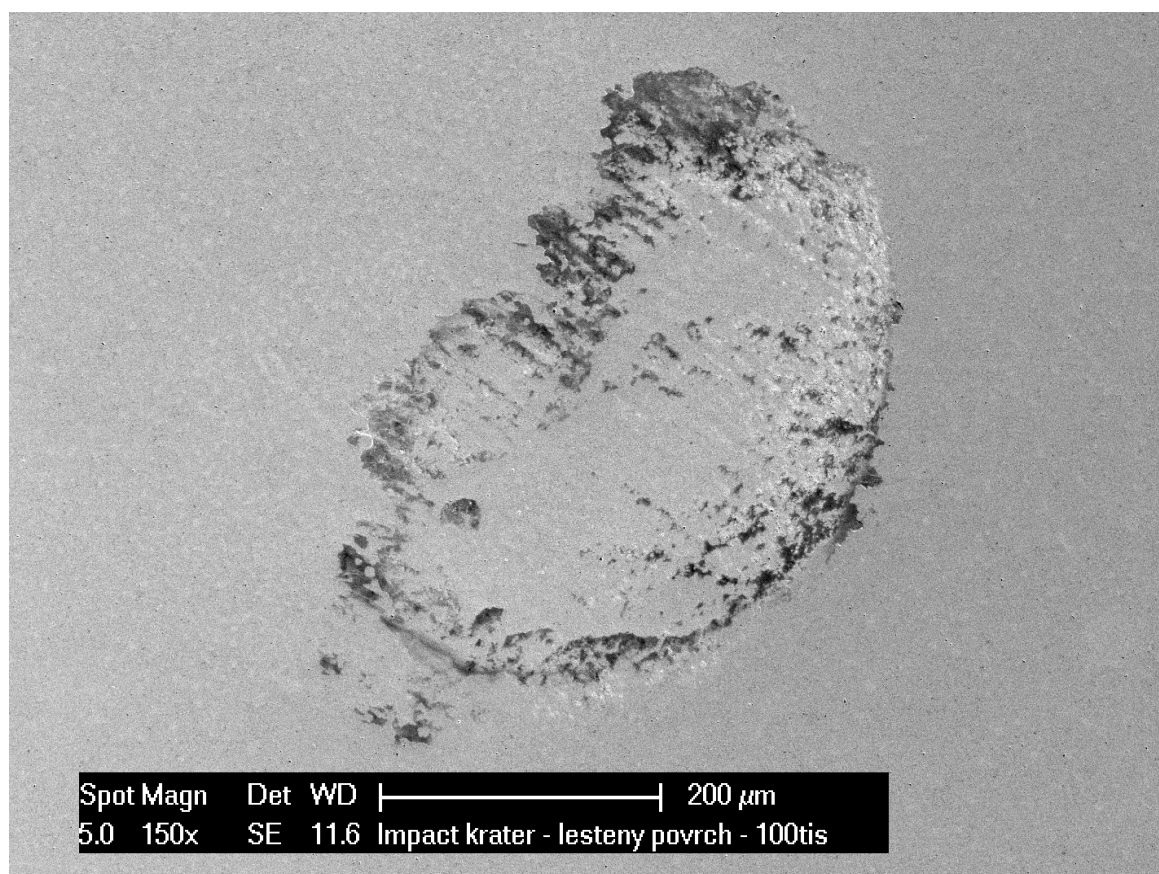


Obr. 33 Elektronicky řízený impact tester

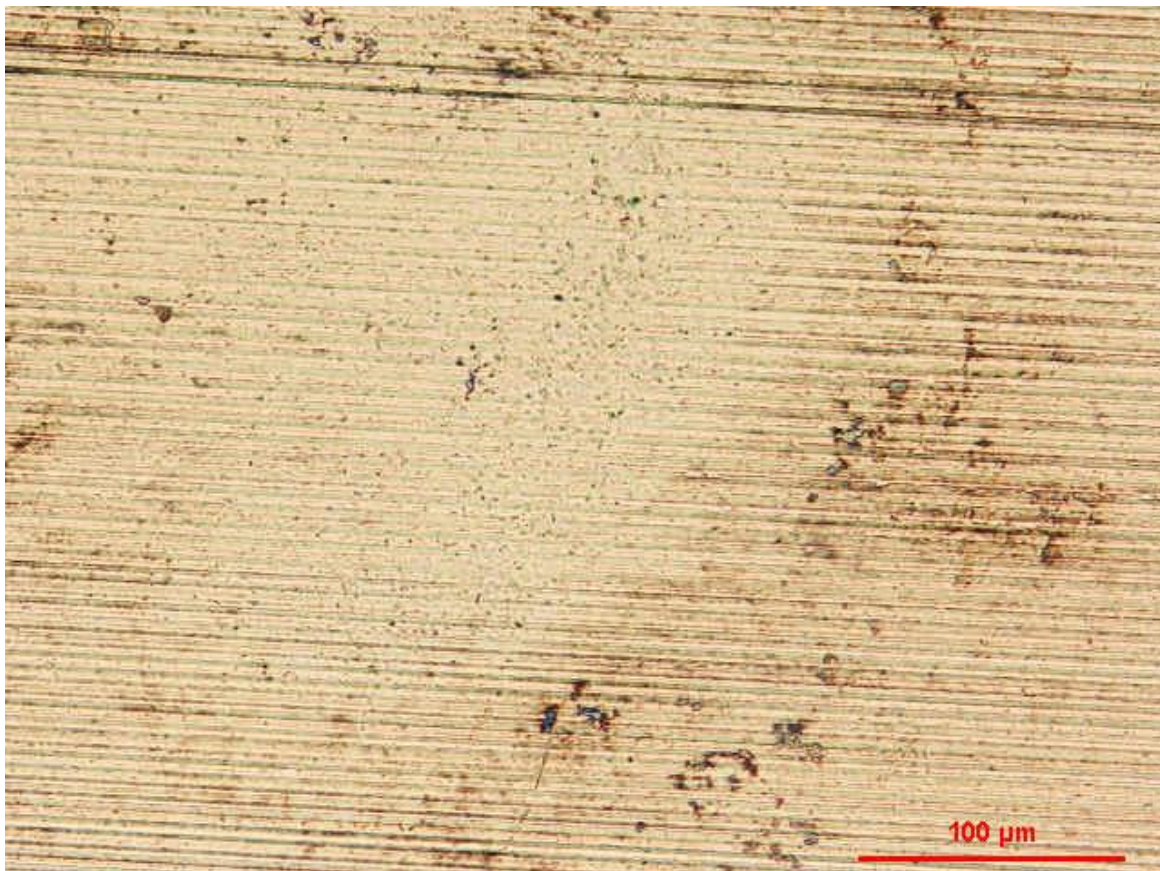
Výsledné krátery a jejich okolí byly zkoumány pomocí REM a světelného mikroskopu.



Obr. 34 Snímek impactového kráteru na omílaném povrchu



Obr. 35 Snímek impactového kráteru na leštěném povrchu



Obr. 36 Snímek impactového kráteru na nepracovaném povrchu

Tab. 21 Velikost největších a nejmenších úhlopříček kráterů [μm]

Parametry testu	300 x 50 000	500 x 100 000
Nepracovaný	544 x 377	750 x 414
Omílaný	504 x 285	624 x 403
Leštěný	360 x 258	452 x 320

Ze zjištěných velikostí kráterů je vidět, že leštěný vzorek má nejmenší velikost kráterů, dosahuje tedy lehce lepších hodnot odolnosti než zbylé dva vzorky. Při porovnání těchto vzorků vychází lépe omílaný vzorek, rozdíl velikostí, a tedy odolností, jsou však velmi malé.

Důležitý je i tvar impactových kráterů. Místo ideálního kruhového tvaru jsou krátery eliptické. To naznačuje, že impactová kulička po povrchu vzorku klouzala a nebyla schopna působit na povrch tak, jak se očekávalo. Pravděpodobně byla měkkí než by bylo pro zkoušky na tomto druhu slinutého karbidu potřeba.

Při zkoumání morfologie povrchu je vidět, že krátery u vzorků neodpovídají ideálnímu impactovému kráteru. U leštěného vzorku dochází k největšímu poškození povrchu na

okrajích kráteru, jeho vnitřek ale vypadá pouze deformován (stlačen). U omílaného a neopracovaného vzorku došlo primárně k deformaci stop po oddělování vzorků a vyhlazení tohoto povrchu. Pro získání lepších výsledků by pravděpodobně bylo potřeba změnit parametry zkoušky (zvýšit sílu a počet úderů), to by ale také snižovalo vliv upraveného povrchu na výsledky zkoušek. Použití lepšího materiálu pro kuličku by pravděpodobně vedlo k lepším (přesnějším) výsledkům i zde.

6. Diskuze výsledků

Cílem této experimentální práce bylo zjistit, jaké jsou rozdíly mezi vlastnostmi zjištěnými pomocí laboratorních testů na obecně pro tyto účely používaných vzorcích s leštěným povrchem a vlastnostmi, které by byly naměřeny na reálně používaných nástrojích, zpracovávaných pomocí hromadných průmyslových metod. Tyto nástroje byly suplovány vzorky s hrubým povrchem po ořezu a povrchem upraveným pomocí vlečného omílání.

Některé vlastnosti byly touto změnou povrchu ovlivněny minimálně. Při měření korozní odolnosti povrchu vyšlo najevo, že zjištěné hodnoty se mezi vzorky liší jen minimálně, prakticky by tedy koroze všech těchto povrchů probíhala srovnatelně. Tento poznatek pravděpodobně můžeme rozšířit na více druhů mechanických povrchových úprav a říci, že korozní odolnost povrchu stejného materiálu pro různé mechanické povrchové úpravy bude v praxi srovnatelná. Podobný trend by se pravděpodobně dal prokázat u více druhů odolností proti chemicky působícím metodám degradace, to by ale vyžadovalo další experimentování

Druhým takovým testem bylo měření tvrdosti, kde se prokázalo, že ani intenzivně mechanicky ovlivněná vrstva nemění zjištěnou tvrdost materiálu. Zjistitelné změny by se mohli projevit u měření mikrotvrdosti povrchu, celkově ale můžeme považovat tvrdost za konstantní. To je důležitý poznatek, protože při vyhodnocování rozdílných výsledků následných mechanických testů nemusíme brát tvrdost jako jeden z faktorů ovlivňujících výsledky.

Výsledky měření drsnosti vyšly v očekávaném pořadí, rozdíly mezi leštěným a omílaným povrchem ale byly malé a tyto hodnoty byly znatelně menší než u neopracovaného hrubého povrchu. Vzhledem k tomu, že další experimenty ukazují, že vlastnosti neopracovaného a omílaného povrchu jsou podobné a liší se od leštěného povrchu, není pravděpodobně drsnost povrchu tak důležitým faktorem.

Měření zbytkových napětí v povrchu ukazuje veliké rozdíly hodnot mezi leštěným povrchem a dvojicí omílaný a nepracovaný povrch. Zatímco hodnoty u leštěného povrchu se blíží nule, hodnoty tlakových zbytkových napětí v mechanicky ovlivněném povrchu dosahují jednotek tisíců MPa. Toto je pravděpodobně faktor, který se na vlastnostech nástroje a jejich rozdílu vůči leštěnému laboratornímu vzorku projeví nejvíce.

Podobných výsledků dosahují hodnoty získané při měření lomové houževnatosti, odolnosti proti opotřebení a odolnosti proti rázovému namáhání. Vždy se zde vlastnosti leštěného povrchu znatelně liší od zbylé dvojice, jejichž výsledky jsou srovnatelné.

Obecným závěrem tedy je, že mechanické úpravy povrchu znatelně změní některé vlastnosti. Výsledky změřené na leštěných laboratorních vzorcích se tedy budou lišit od hodnot vlastností v praxi používaných nástrojů, a tedy mohou být zavádějící. Jak hodně se liší a jak hodně jsou tedy zavádějící je ale jiná otázka. Nicméně použití laboratorních vzorků s povrchovou úpravou odpovídající povrchovým úpravám v praxi používaného nástroje by mělo zpřesnit výsledky, které by měly odpovídat vlastnostem nástroje.

7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou slinutých karbidů. Rešeršní část byla zaměřena hlavně na popis vlastností tohoto materiálu, způsoby a mechanismy, které tyto vlastnosti zhoršují, a na popis působení těchto mechanismů v celém průběhu života slinutého karbidu. Tyto mechanismy působí na slinutý karbid vlastně už od chvíle přípravy jednotlivých komponent pro výrobu slinutého karbidu a tento postupný proces končí až na konci životnosti konečného výrobku z tohoto materiálu. Součástí této části bylo také obecné představení slinutých karbidů, jejich historie, vývoj a nastínění jejich současné a předpokládané budoucí situace. Obsahuje dále základní seznámení s tenkými vrstvami, jejich aplikací na slinutých karbidech a vlastnosti systému tenká vrstva – substrát.

Experimentální část obsahuje zkoumání rozdílů vlastností jednoho konkrétního slinutého karbidu v závislosti na mechanických povrchových úpravách, to celé pomocí rozsáhlé škály laboratorních experimentů. Používaly se jak jednoduché testy, tak takové náročné na technické zázemí.

Hlavní myšlenkou bylo odpovědět na otázku, zda je vhodné zjišťovat vlastnosti prakticky používaného nástroje, který má svůj povrch většinou upravován jednou či více z hromadných průmyslově používaných metod, pouze pomocí laboratorních zkoušek „standardního“ leštěného laboratorního vzorku ze stejného materiálu. Podle výsledků můžeme říci, že hodnoty vlastností získaných z leštěného povrchu (tedy z povrchu s odstraněnou mechanicky ovlivněnou vrstvou) se budou lišit od hodnot vlastností reálného nástroje. Je tedy vhodnější používat laboratorní vzorky, které se budou reálném nástroji přibližovat co nejvíce, v tomto případě použitím stejné úpravy povrchu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ASM Handbook Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications, 1998 ASM International
- [2] Humár, A.: Materiály pro řezné nástroje, Vysoké Učení Technické V Brně
- [3] ASM Handbook Volume 18: Friction, lubrication and wear technology, 1992 ASM International
- [4] DEMBEK, Jiří. Slinuté karbidy a jejich efektivní využití: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010, Vedoucí práce: doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [5] UPADHYAY, Gopal S. Cemented Tungsten Carbides. New Jersey: Noyes Publications, 1998, 403 s. ISBN 08-155-1417-4.
- [6] Snahou výzkumu je přiblížit se k ideálnímu řeznému nástroji, MM Průmyslové spektrum, 2007 / 4, Strana 18
- [7] Slinuté karbidy pro nejnáročnější použití, MM Průmyslové spektrum, 2010 / 10, Strana 66
- [8] Odolnost slinutých karbidů proti teplotním a mechanickým rázům, MM Průmyslové spektrum, 2004 / 4, Strana 22
- [9] Základní rozdělení slinutých karbidů dle ISO, Tumlikovo metal cutting technologies, dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-slinutych-karbidu-dle-iso> [vid. 5.12 2014]
- [10] Podaný P., Kříž A., Předdepoziční procesy při výrobě tenkých vrstev, 2006, dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/podany_metal06.pdf [vid. 5.12 2014]
- [11] Web výrobce materiálu, dostupné z: <http://www.ceratzit.com/products/rods-preforms/carbide-grades/> [vid. 12.5 2015]
- [12] Web prodejce nástrojů, dostupné z: <http://www.zjp.cz/> [vid. 12.5 2015]
- [13] Materiály o tribologii, Katedra strojírenské technologie TU v Liberci, dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf [vid. 12.5 2015]
- [14] Web výrobce, dostupné z: <http://www.otecusa.com> [vid. 12.5 2015]
- [15] MACHÁČ, Miroslav. Měření tvrdosti materiálů a zpracování zjištěných hodnot: Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010, Vedoucí práce: Ing. Kalivoda
- [16] Studijní materiály o drsnosti, dostupné z: <http://www.eduka.spaco.cz> [vid. 12.5 2015]
- [17] Kříž Antonín, Beneš Petr, Kontaktní cyklické testování materiálu pomocí IMPACT testeru, dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Interantikor_Kriz.pdf [vid. 12.5 2015]
- [18] Stanovení korozní rychlosti elektrochemickými polarizačními metodami, dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/koroze_polarizacni_odpor/index.htm [vid. 12.5 2015]
- [19] ŠPIRIT, Zbyněk. Vybrané vlastnosti slinutých karbidů a jejich využití na řezné nástroje: Diplomová práce, ZČU, Fakulta strojní, 2013, Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. Antonín KŘÍŽ
- [20] JANOUŠEK, Antonín. Vlastnosti slinutých karbidů a jejich aplikace na řezné nástroje: Diplomová práce, ZČU, Fakulta strojní, 2014, Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. Antonín KŘÍŽ
- [21] Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, Active Standard ASTM G99