

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301      Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3911T016      Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vybrané vlastnosti slinutých karbidů a jejich využití na řezné nástroje

Autor:                      **Bc. Zbyněk Špirit**  
Vedoucí práce:        **Doc. Dr. Ing. Antonín KŘÍŽ**

Akademický rok 2012/2013

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Špirit	<b>Jméno</b> Zbyněk	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
<b>VEDOUČÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Dr. Ing. Kříž	<b>Jméno</b> Antonín	
<b>PRACOVISTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vybrané vlastnosti slinutých karbidů a jejich využití na řezné nástroje		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN

<b>CELKEM</b>	90	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	52	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	38
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	<p>Cílem diplomové práce je uvést všeobecný přehled o slinutých karbidech, které se používají pro výrobu řezných nástrojů. Pomocí vybraných testů bude určen typ slinutého karbidu, který je vhodný pro daný zvolený nástroj dle jeho specifik např. řezných podmínek, obráběného materiálu, obráběcího stroje apod. Diplomová práce je podrobně zaměřena na aplikaci slinutých karbidů k výrobě monolitních vrtáků a fréz. Dalšími cíli je zvyšování užitečných vlastností slinutých karbidů, přehled normativních zkoušení slinutých karbidů a teplotní degradace slinutých karbidů.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	<p>Slinutý karbid, klasifikace slinutého karbidu, normativní zkoušky, lomová houževnatost, vnikací zkoušky <math>K_{Ic}</math>, tepelné zatěžování, tvrdost, tepelná degradace slinutého karbidu</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Špirit	Name Zbyněk	
<b>FIELD OF STUDY</b>	3911T016 “ Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Dr. Ing. KRÍŽ	Name Antonín	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Selected Properties and Cutting Tool Applications of Sintered Carbides		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2012
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES

<b>TOTALLY</b>	90	<b>TEXT PART</b>	52	<b>GRAPHICAL PART</b>	38
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	<p>The aim of the thesis is to give a general overview of cemented carbides, which are used for the manufacture of cutting tools. , The type of cemented carbide will be determined by using of selected tests, which is appropriate for the selected tool by its specifics such as cutting conditions, workpiece material, machine, etc. The thesis is closely focused on the application of cemented carbides to produce monolithic drills and cutters. Other goals are to increase the utility properties of sintered carbides, overview of normative testing cemented carbides and tungsten carbides thermal degradation.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>Cemented carbide, classification sl, normative tests, fracture toughness, <math>K_{Ic}</math> indentation tests, thermal loading, hardness, thermal degradation cemented carbide</p>

## Poděkování

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektů ESF OP VpK. Realizace projektu „Systém vzdělávání pro personální zabezpečení výzkumu a vývoje v oblasti moderního trendu povrchového inženýrství - integrity povrchu - CZ.1.07/2.3.00/20.0037“ umožnila konzultace s předními odborníky z oblasti povrchového inženýrství. Projekt „Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavami a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji - CZ.1.07/2.4.00/17.0052“ napomohl při propojení výstupů diplomové práce s aplikačním a akademickým prostředím. Diplomová práce byla realizována na základě řešeného studentského projektu SGS – 2012-044 „Aplikace progresivních vrstev na řezné nástroje s důrazem na integritu obrobeného povrchu a řezné hrany“

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Dr. Ing. Antonínu Křížovi za podporu, vedení i za čas, který mi věnoval. Dále mé poděkování patří Ing. Petru Benešovi, PhD, Ing. Petru Flašarovi za jejich ochotu a cenné rady. Poté chci rovněž poděkovat společnosti CERATIZIT a panu Václavovi Štípákovi za spolupráci při dodání nového druhu slinutého karbidu. V neposlední řadě chci poděkovat rodině a přátelům za jejich podporu.

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	9
Úvod .....	10
1. Současný stav materiálů určených k výrobě řezných nástrojů .....	10
2. Základní rozdělení slinutých karbidů a jejich výroba .....	11
2.1. Trendy ve výrobě slinutých karbidů .....	13
2.1.1. Moderní výroba prášků .....	14
2.1.2. Slinování.....	16
2.2. Základní suroviny pro výrobu slinutých karbidů.....	16
3. Rozdílná aplikace slinutých karbidů při soustružení, frézování a vrtání.....	19
3.1. Kinematika obrábění.....	20
3.2. Soustružení.....	20
3.3. Frézování .....	21
3.4. Vrtání šroubovitým vrtákem.....	21
4. Základní parametry slinutých karbidů, ovlivňující aplikaci u řezných nástrojů .....	22
4.1. Tvrdost.....	22
4.2. Pevnost v ohybu (transverse rupture strenght - TRS).....	22
4.3. Lomová houževnatost .....	23
4.4. Stanovení lomové houževnatosti pomocí vnikací zkoušky tvrdosti .....	25
4.5. Magnetické vlastnosti slinutých karbidů .....	29
4.6. Brousitelnost řezného nástroje.....	30
5. Zvyšování užitečných vlastností slinutých karbidů pro použití na řezné nástroje.....	32
6. Vlivy působící na trvanlivost nástroje .....	33
6.1. Tvorba tepla při obrábění.....	33
7. Odolnost slinutých karbidů proti tepelným a mechanickým rázům .....	33
7.1. Teplota v místě řezu.....	34
7.2. Tepelná vodivost slinutých karbidů .....	34
7.3. Tepelná degradace slinutých karbidů .....	35
7.4. Tepelné trhliny .....	36
7.5. Odolnost slinutých karbidů proti tepelným šokům (Thermal Shock Resistance) .....	38
8. Opotřebení řezných nástrojů.....	38
8.1. Poškození povrchu trhlinami .....	40
8.2. Povrchové poškození s transportem částic materiálu .....	40

8.3.	Povrchové poškození způsobené adhezivními silami.....	40
8.3.1.	Abrazivní opotřebení.....	41
8.4.	Erozivní odolnost.....	44
8.5.	Odolnost proti korozi.....	44
9.	Základní mechanické vlastnosti dvoufázových slinutých karbidů.....	46
9.1.	Vliv velikosti zrna karbidické fáze slinutých karbidů na výrobu šroubovitého vrtáku . .....	46
9.2.	Vliv množství a druhu pojiva slinutých karbidů na výrobu šroubovitého vrtáku .....	47
10.	Recyklace slinutých karbidů.....	47
11.	Závěr teoretické části.....	50
12.	Experimentální část .....	51
13.	Druhy testovaných slinutých karbidů.....	51
14.	Použité přístrojové vybavení .....	52
15.	Měření tvrdosti podle Vickerse .....	53
15.1.	Požadavky na zkušební těleso .....	53
15.2.	Postup při měření tvrdosti HV .....	54
15.3.	Vyhodnocení výsledku.....	54
15.4.	Výsledné hodnoty tvrdosti HV u slinutých karbidů.....	55
16.	Měření lomové houževnatosti indentační metodou.....	56
16.1.	Požadavky na zkušební těleso .....	56
16.2.	Postup provedení zkoušky.....	56
16.3.	Výsledné hodnoty.....	58
16.4.	Porovnání výpočtových modelů pro TSM33 .....	59
17.	Tepelné zatěžování slinutých karbidů .....	61
18.	Pozvolné ohřívání a rychlé ochlazení vzorků pod tekoucí vodou.....	62
18.1.	Požadavky na zkušební těleso .....	62
18.2.	Postup provedení zkoušky.....	62
18.3.	Výsledné hodnoty.....	63
19.	Cyklické tepelné zatěžování slinutých karbidů .....	64
19.1.	Požadavky na zkušební těleso .....	64
19.2.	Postup provedení zkoušky.....	65
19.3.	Výsledné hodnoty.....	66
19.4.	Impact test .....	67
19.5.	Postup provedení zkoušky.....	68

19.5.1.	Výsledné hodnoty .....	68
20.	Zkouška lomové houževnatosti .....	70
20.1.	Požadavky na zkušební těleso .....	71
20.2.	Postup provedení zkoušky.....	71
20.3.	Vyhodnocení naměřených hodnot.....	74
21.	Vyhodnocení velikosti zrn karbidické fáze .....	75
21.1.	Požadavky na zkušební těleso .....	75
21.2.	Postup provedení zkoušky.....	75
21.3.	Výsledné hodnoty.....	76
22.	Zkouška tříbodovým ohybem (TRS).....	78
22.1.	Požadavky na zkušební těleso .....	78
22.2.	Postup provedení zkoušky.....	78
22.3.	Vyhodnocení naměřených hodnot.....	79
23.	Diskuze výsledků.....	81
	Závěr.....	87
	Použitá literatura.....	88
	Internetové zdroje .....	89
	Seznam příloh.....	90



## Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/Symbol	Jednotka []	Popis
SK		Slinutý karbid
HV		Tvrдость dle Vickerse
d	mm	Průměrná délka úhlopříček
F	N	Zkušební zatížení
$\alpha$	°	Vrcholový úhel indentoru
l	mm	Délka trhliny
$K_{Ic}$	$MN \cdot m^{-3/2}$ ; $MPa \cdot m^{1/2}$	Statická lomová houževnatost
HSS		Rychlořezné ocele
HRC		HSS
TRS	MPa	Pevnost v ohybu
hcp		Hexagonální mřížka
u	m	Délka úhlopříčky vtisku
c, T	m	Celková délka centrální trhliny
K		Konstanta funkce Youngova modulu
P	kgf	Velikost zatěžovací síly na indentor
$\zeta$		Nezávislá materiálová konstanta
E	MPa	Modul pružnosti v tahu
$W_k$	$MN \cdot m^{-3/2}$	Lomová houževnatost dle Palmqvista
$W_s$	$N \cdot mm^{-1} = J \cdot m^{-2}$	Houževnatost dle Palmqvista
$\eta$		Eta-fáze kobaltu
$v_c$	$m \cdot s^{-1}$	Řezná rychlost (obvodová rychlost brousícího kotouče)
$F_Q$	N	Lomová síla
g1		Tvarová funkce
PVD		Physical vapour deposition - vrstva nadeponována fyzikálním principem
PACVD		Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition - vrstva nadeponovaná chemickým principem, při nižší teplotě
CVD		Chemical Vapour deposition – vrstva nadeponovaná chemickým způsobem
$v_f$	$m \cdot min^{-1}$	Rychlost posuvu
$F_n$	daN	Dynamický newton

## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá sledováním vlastností slinutých karbidů (slinuté karbidy budou značeny - SK), které se aplikují na výrobu řezných nástrojů. Základní sledované vlastnosti: tvrdost, lomová houževnatost, pevnost v ohybu, tepelná odolnost, tepelná stabilita a odolnost proti rázovému kontaktnímu namáhání.

SK existují v mnoha specifikacích a lze je poměrně dobře díky práškové metalurgii a depozicí tenkých vrstev upravovat a měnit jejich mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti. SK lze obrábět téměř každý druh materiálu, avšak tato diplomová práce se zaměřuje zejména na návrh vhodného SK, ze kterého se bude vyrábět monolitní vrták pro vrtání děr 8d do austenitické oceli AISI 304.

Austenitická ocel je typ materiálu, který se při obrábění několikanásobně zpevňuje a způsobuje při obrábění nežádoucí dynamické rázy. Další faktor, který znesnadňuje obrábění této oceli, je její velice špatná tepelná vodivost, díky které se velké množství tepla vytvořené obráběním neodebírá třískou, ale je přenášeno do řezného nástroje a obrobku. Všechny tyto jevy při obrábění zvyšují nároky na slinuté karbidy použité na řezné nástroje. Tato diplomová práce proto bude sledovat výše uvedené vlastnosti slinutých karbidů, které jsou v této aplikaci rozhodující.

Cílem této diplomové práce je na základě rešeršní a experimentální části zjistit základní vlastnosti osmi vybraných typů SK a určit vhodnost jednotlivých SK k výrobě řezných nástrojů. Pro velké nároky na tepelnou stabilitu nástroje byla rešeršní i experimentální část zaměřena na chování SK tepelným namáháním. Největší pozornost byla zaměřena na lomovou houževnatost SK po exploataci definovaným tepelným namáháním. Na SK byly také provedeny testy pro zjištění tvrdosti dle Vickerse, zjištění lomové houževnatosti indentační metodou (optimalizace výpočtových modelů) na vybraném SK lomovou mechanikou, pevnost v ohybu, průměrné velikosti karbidických zrn. U vybraných slinutých karbidů byly provedeny, tepelné zkoušky, impact test. Výsledky jednotlivých testů jsou shrnuty a vzájemně porovnány.

## 1. Současný stav materiálů určených k výrobě řezných nástrojů

V současné době existuje široké spektrum materiálů, které se používají pro výrobu řezných nástrojů. Neexistuje typ materiálu, který by mohl být aplikován na všechny typy řezných nástrojů. Největší problémem při výběru vhodného materiálu je kombinace dvou rozdílných vlastností tvrdosti a houževnatosti. Materiál, který by měl vysokou hodnotu tvrdosti a houževnatosti, je materiál budoucnosti. Proto je důležité co nejvíce využít potenciál současných materiálů v kombinaci s povrchovými vrstvami. Správně zvolený typ materiálu se správným typem vrstvy může zohospodárnit a zefektivnit celý proces obrábění až o 90%[1]. Základními materiály pro výrobu řezných nástrojů jsou: rychlořezné oceli (HSS), slinuté karbidy, cermety, řezná keramika, kubický nitrid bóru a polykrystalický diamant. Tato diplomová práce se věnuje pouze SK se zaměřením na výrobu monolitních nástrojů.

SK je kompozitní materiál vyrobený práškovou metalurgií, který je tvořen min. dvěma fázemi, a to karbidy a pojivem. SK patří mezi nejrozšířenější typy materiálů pro výrobu řezných nástrojů. Slinuté karbidy se velmi dobře optimalizují pro různé druhy řezných podmínek a nástrojů. Největším problémem při optimalizaci SK pro jednotlivé aplikace je vytvoření pokud možno synergického efektu mezi zvolenými typy karbidů, velikostí zrn, množstvím, druhem pojiva a správnou technologií výroby SK (lisování, slinování, atd.). Při návrhu SK na daný typ nástroje se musí navrhovatel velmi dobře seznámit s celou kinematikou obrábění, hlavními typy namáhání, druhem opotřebení a způsobem odvodu tepla.

Typů SK je celá řada. Proto vznikla norma ČSN ISO 513, která popisuje SK a dává je do skupin podle obráběného materiálu.

## 2. Základní rozdělení slinutých karbidů a jejich výroba

V dnešní době jsou slinuté karbidy rozšířeny pro své rozmanité a specifické vlastnosti, které lze poměrně snadno přizpůsobit viz. obr. 2-1. Slinuté karbidy určené pro řezné nástroje jsou rozděleny do dvou základních skupin: nadeponované a nenadeponované. Nenadeponované SK se označují dle ČSN ISO 513 symboly HW a HF (HW a HF určuje střední velikost zrna v  $\mu\text{m}$ ) viz. tab. 2-1 [1].

Materiál		Symbol
Nepovlakované slinuté karbidy s obsahem primárního WC	Zrnitost $\geq 1 \mu\text{m}$	HW
	Zrnitost $\leq 1 \mu\text{m}$	HF
Nepovlakované cermety s obsahem TiC nebo TiN případně obou		HT
Povlakované slinuté karbidy a cermety		HC
Řezná keramika	Oxidová ŘK s obsahem primárního $\text{Al}_2\text{O}_3$	CA
	Směsná ŘK na bázi $\text{Al}_2\text{O}_3$ s neoxidovými přísadami	CM
	Neoxidová ŘK s obsahem primárního $\text{Si}_3\text{N}_4$	CN
	Povlakovaná ŘK	CC
Supertvrdé materiály	Polykrystalický diamant	DP
	Polykrystalický kubický nitrid boru	BN

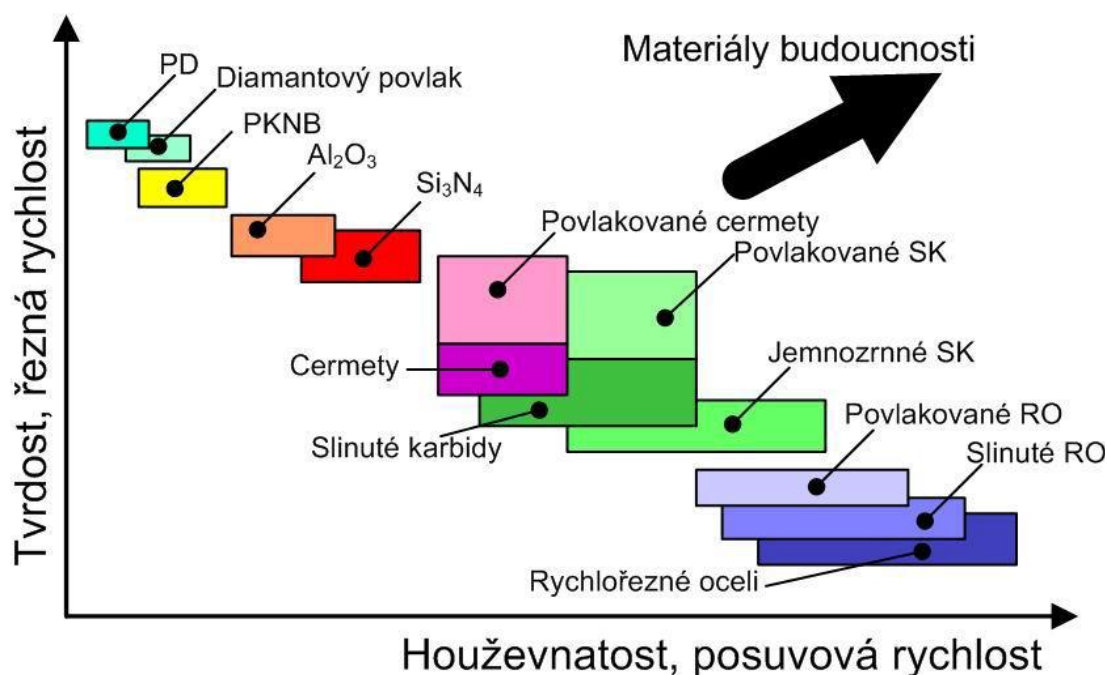
Tab. 2-1 Značení nástrojových materiálů dle normy ČSN ISO 513 [1]

Norma ČSN ISO 513 rozděluje SK pro řezné aplikace nástroje do 6 základních skupin (P, M, K, N, S, H) viz.obr. 2-1.



Obr. 2-1 Rozdělení SK do skupin dle ČSN ISO 513 [1]

Každá skupina má podskupiny, které jsou značeny arabským číslem. S rostoucím číslem podskupiny se zvyšuje obsah pojícího kovu, roste houževnatost a pevnost v ohybu, klesá tvrdost a otěrovzdornost. Z hlediska doporučených řezných podmínek klesá řezná rychlost a roste rychlost posuvu a průřez odebírané třísky. Proto jsou druhy s vyšším číselným označením obvykle používány pro střední až těžké obrábění, hrubovací operace a přerušované řezy. Naopak SK s nižším číselným označením jsou vhodné pro nepřerušované řezy a mají lepší řezivost vzhledem k větší odolnosti proti plastické deformaci [2].



Obr. 2-2 Porovnání řezných materiálů s ohledem na řezné podmínky [1]

Hlavní skupiny podle ČSN ISO 513 se rozdělují podle obráběného materiálu tak, že v jednotlivých skupinách jsou soustředěny materiály obrobku, které vyvolávají kvalitativně stejný typ zatížení (namáhání) břitu a tudíž vyvolávají i podobný typ opotřebení. Každá aplikační skupina je určena písmenem hlavní skupiny a klasifikačním číslem. Rozdělení aplikačních skupin dle ČSN ISO 513 [1]:

### Skupina P

Skupina P je označována modrou barvou, je tvořena dvěma typy karbidů (WC a TiC) a kobaltovým pojivem. Obsah WC je (30÷82%), TiC (8÷64%) a kobaltu (5÷17%). Tato skupina je určena pro obrábění polotovarů, které tvoří dlouhou třísku, např. uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli. Při řezném procesu dochází k vysokému zatížení břitu nástroje řeznými silami a opotřebení na čele (výmol). Pro zlepšení otěruvzdornosti nástroje jsou ve SK použity karbidy TiC a TaC, které zlepšují odolnost proti vymílání na čele nástroje. TiC zaručuje vysokou odolnost proti difúzi za vysokých teplot, která patří mezi hlavní příčiny tvoření výmolů. Nevýhodou TiC je vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazivnímu opotřebení. [1].

### Skupina M

Skupina M je označována žlutou barvou, je tvořena více jak třemi karbidy a pojivem. Tato skupina SK se řadí mezi univerzální typy SK, kterými lze obrábět materiály, které tvoří dlouho a střední třísku, např. austenitické korozivzdorné oceli, lité oceli, tvárné litiny. Tato skupina SK má vyšší houževnatost, a tak se často používá pro hrubovací operace s přerušovaným řezem [1].

### Skupina K

Skupina K je označována červenou barvou. Je tvořena pouze jedním typem karbidu (WC) a kobaltovým pojivem. Obsah WC je 87÷92% a kobaltu 4÷12%. Tato skupina se používá pro obrábění materiálů, které tvoří krátkou a drobnou třísku, např. nelegované a legované šedé litiny, tvárné a temperované litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály. Řezné síly by měly být nižší a převládá abrazivní a adhezivní opotřebení nástroje [1].

## Skupina N

Skupina N je označována zelenou barvou. Tato skupina SK se používá pro obrábění neželezných slitin na bázi hliníku, hořčíku nebo mědi, plastů a atd.

## Skupina S

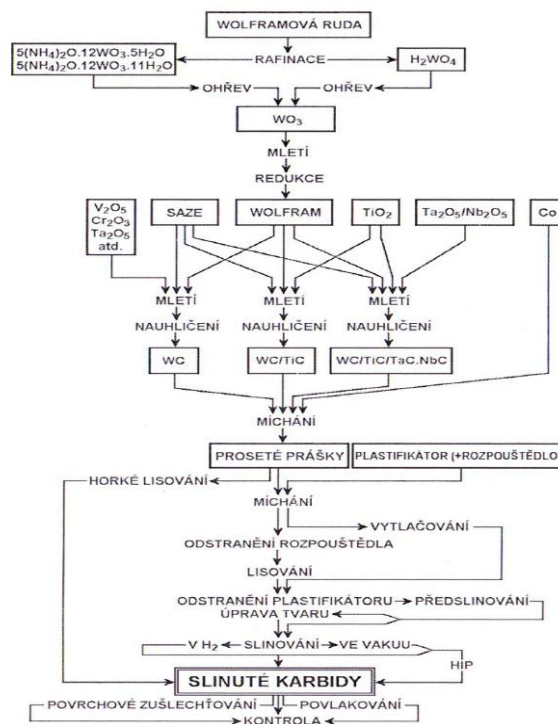
Skupina S je označována hnědou barvou. Používá se na obrábění tepelně odolných slitin na bázi železa, niklu a kobaltu, titanu a titanových těžce obrobitelných slitin [2].

## Skupina H

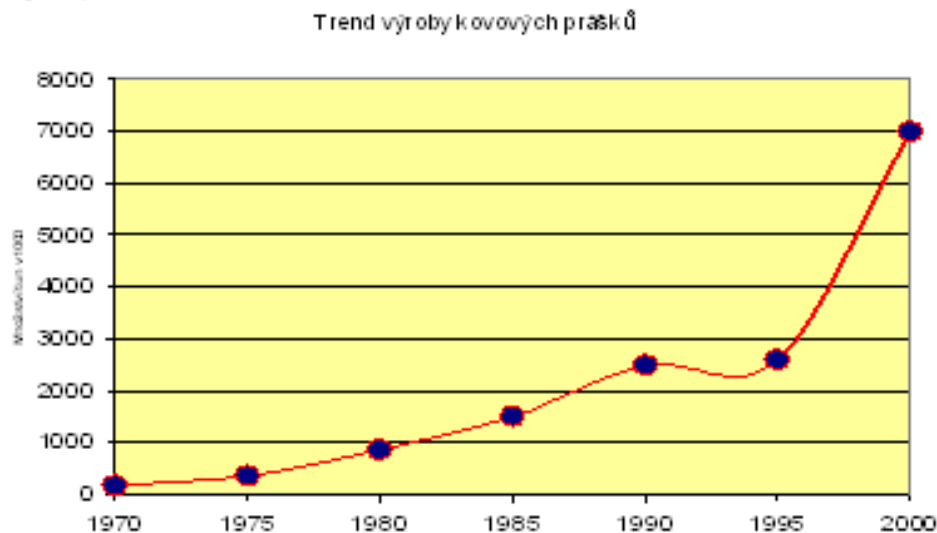
Skupina H je označována tmavošedou barvou. Tato třída je určena pro obrábění kalených a zušlechťených ocelí, které mají tvrdost 48 - 60 HRC a tvrzených litin.

### 2.1. Trendy ve výrobě slinutých karbidů

Slinutý karbid, jak již bylo řečeno, je druh materiálu, který je vyroben ze dvou základních složek, kterými jsou samotné karbidy (WC, TiC, TaC, atd), pojivo nejčastěji kobalt. Výrobou SK se zabývá prášková metalurgie. Ta popisuje výrobu prášků, pojiva, míchaní obou složek, lisování a slinování (sintrování) viz. obr. 2-3. [1]. Prášková metalurgie zaznamenává od roku 1995 velký nárůst ve výrobě, obr. 2-4, a od roku 2000 je tento růst ještě strmější a přetrvává až do dnešní doby.



Obr. 2-3 Postup výroby výchozích prášků a slinutých karbidů [1]



Obr. 2-4 Trend ve výrobě kovového prášku [3]

Pomocí práškové metalurgie lze docílit spojení těžkovitých karbidů s pojivem a získat kompozitní materiál ve formě SK. Tento kompozit využívá synergického efektu jednotlivých fází, které se spojí pomocí slinování. Slinování je tepelné zpracování, které zvětšuje soudržnost výlisku zvětšením styčných ploch mezi částicemi, vytvořením slitin (popř. sloučenin) v místě styku a odstraněním deformačního zpevnění z výroby prášků i zhutňování [4]. Slinování patří k posledním fázím ve výrobě SK.

Nejnovější trendy ve výrobě SK se ubírají tvorbou ultrajemných karbidických prášků, zlepšením prolisovatelnosti celého objemu směsi, optimalizací tvaru částic karbidů a alternativními druhy pojiva.

### 2.1.1. Moderní výroba prášků

Výroba prášků má zásadní vliv na celkové vlastnosti SK. Samotné karbidy jsou vyráběny několika možnými procesy:

- litím
- karbidizací práškových kovů, hydridů, nebo oxidů kovů pomocí uhlíku v pevném nebo plynném skupenství
- chemickým vylučováním z nauhličených feroslitin
- usazováním z plynné fáze
- usazováním při elektrolýze roztoků odpovídajících solí

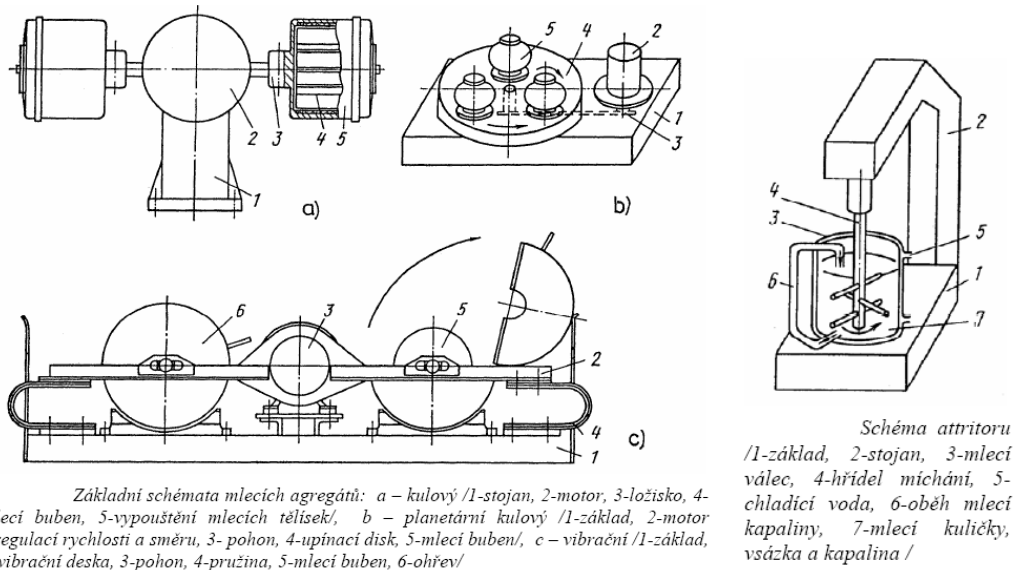
Vlastní prášek pro výrobu slinutého karbidu se může vyrábět několika způsoby :

- fyzikálně mechanickým
- chemickým
- elektrochemickým

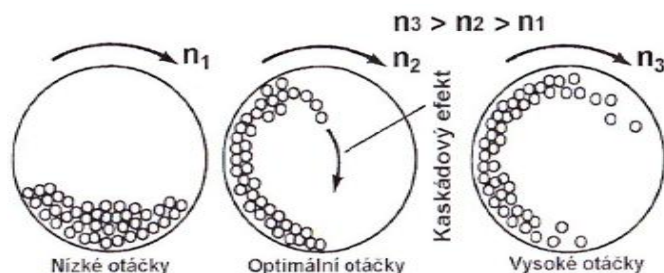


Mezi nejdůležitější faktory při výrobě prášků patří technologické vlastnosti (lisovatelnost, slinovatelnost, tekutost a sypaná hmotnost). Zmenšením průměrné velikosti částic prášku se zvyšuje jeho měrný povrch, snižuje se i povrchová drsnost. Toto vede ke zvýšení kapilárních sil v objemu prášku a označuje se jako geometrická aktivita. U částic prášků je povrchová oblast silně narušena a obsahuje mnoho prvků, které nejsou tak silně svázané s krystalickou mřížkou základu. Vysoká zbytková energie povrchu vzhledem ke kompaktnímu tělesu způsobuje i zvýšenou reakční schopnost označovanou jako strukturní aktivitu prášku [1], [4]. Zlepšení soudržnosti a slinovatelnosti lze dosáhnout i samotnou přípravou prášku (mletím - mechanická aktivace). Správnou technologií mletí lze zvětšit volný povrch částic i hustotu poruch. Nevýhodou částic s větším volným povrchem je horší lisovatelnost, jelikož směs prášku vykazuje vyšší odpor proti plastické deformaci [4].

Většina prášků pro výrobu SK je vyráběna mechanickým způsobem. Při mechanickém způsobu mletí je podstatné, aby směs karbidů a pojícího kovu měla požadovanou granulometrii a jednotlivé částice byly rovnoměrně rozmístěny v celém objemu směsi. Další důležitou podmínkou je, aby každá karbidická částice byla dokonale obalena práškem pojícího kovu [1]. Celý proces mechanické výroby prášku probíhá v kulových mlýnech a attritorech - obr. 2-5. Kulový mlýn koná rotační pohyb kolem horizontální osy a obsahuje kuličky, které konají kaskádovitý pohyb obr. 2-6. Pomocí kaskádovitého pohybu kuliček dochází ke střetu kuliček se směsí karbidů a pojiva, a tím pádem k deformaci či k rozdělení částic. Při střetu kuličky s částicemi dochází ke tření, které má významný vliv na rovnoměrné rozmíchání směsi. [1]. Attritor je mlecí zařízení, ve kterém se otáčí okolo svislé osy hřídel s mlecími rameny, která promíchávají směs prášků. Směs je v průběhu mletí přečerpávána, aby bylo docíleno stejnoměrného mletí.



Obr. 2-5 Schéma kulového mlýnu (vlevo), attritoru (vpravo) [4]



Obr. 2-6 Schéma kaskádovitého pohybu kuliček v kulovém mlýně [1]

Proces mechanického mletí lze rozdělit na dva základní druhy:

- suché mletí
- mokré mletí

Suché mletí se používá zejména v kulových mlýnech, kde směs může reagovat s okolní atmosférou a vytvářet nežádoucí oxidy.

Mokré mletí se používá zejména v attritorech, kde kapalně medium může být: interní organická kapalina - etylalkohol, metylalkohol, dichloretylen, aceton, benzin, či voda. Mokré mletí je účinnější než suché, jelikož pracovní kapalina napomáhá disperzi jednotlivých částic. Inertní kapalina zajišťuje stálé chlazení a ochranný účinek směsi. Nevýhodou je nutnost dokonalého vysušení směsi po mlecím procesu [1].

### 2.1.2. Slinování

Slinování patří k posledním etapám výroby slinutého karbidu, kdy dochází k pevnému spojení jednotlivých částic směsi. Slinování je tepelné zpracování, při kterém částice vytvářejí slitiny v místě styku. Celý proces slinování probíhá pod teplotou tavení prášku a realizuje se difuzní cestou [4].

Slinování SK probíhá v redukční atmosféře vodíku, v interní atmosféře argonu nebo ve vakuu. Proces slinování způsobí nižší pórovitost výrobku a docílí kompaktnějšího tvaru výrobku [1].

SK po procesu slinování získává, díky pojivému kovu (Co) a částečně rozpuštěnému wolframu, houževnatou a kompaktní kostru, která spojuje jednotlivá zrna tvrdé karbidické fáze. Nad teplotou 418°C má kobalt stabilní strukturu, tvořenou plošně středěnou kubickou mřížkou (K12). Pod touto teplotou má těsně uspořádanou hexagonální mřížku (hcp). V důsledku rozpuštěného wolframu je však kubická mřížka kobaltu stabilizována a nezmění se ani po ochlazení slinovaného tělesa, což vede k tvorbě četných vrstevných chyb [1].

## 2.2. Základní suroviny pro výrobu slinutých karbidů

Pro získání homogenní a kompaktní struktury s dostatečnými mechanickými hodnotami SK nestačí pouze moderní technologie výroby prášků, slinování, lisování, atd., Podstatný vliv na výsledný SK mají vybrané suroviny a prvky.

Kombinací různých druhů prvků (W, Ta, Nb, Co, Ni, Ti, ...) lze výrazně měnit všechny vlastnosti SK. Základním prvkem, který je téměř ve všech typech SK, je wolfram karbidu (WC). Dalšími karbidy jsou karbid titanu, vanadu, hafnia, zirkonia, niobu, chromu, atd. Jako pojivo pro výrobu obráběcích nástrojů se z 90% používá kobalt, jelikož má lepší smáčivost a vyšší teplenou vodivost než nikl. Základní složky SK jsou zobrazeny i se svými základními vlastnostmi v tab. 2-2.



Materiál	Tvrdost HV (50 kg)	Krystalografická mřížka	Teplota tavení		Hustota g/cm <sup>3</sup>	Modul pružnosti		Tepelná rotažnost μm/m · K
			°C	°F		GPa	10 <sup>6</sup> psi	
<b>Carbide</b>								
TiC	3000	Cubic	3100	5600	4.94	451	65.4	7.7
VC	2900	Cubic	2700	4900	5.71	422	61.2	7.2
HfC	2600	Cubic	3900	7050	12.76	352	51.1	6.6
ZrC	2700	Cubic	3400	6150	6.56	348	50.5	6.7
NbC	2000	Cubic	3600	6500	7.80	338	49.0	6.7
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	1400	Orthorhombic	1800	3250	6.66	373	54.1	10.3
WC	(0001) 2200 (1010) 1300	Hexagonal	2800	5050	15.63	696	101.0	(0001) 5.2 (1010) 7.3
Mo <sub>2</sub> C	1500	Hexagonal	2500	4550	9.18	533	77.3	7.8
TaC	1800	Cubic	3800	6850	14.50	285	41.3	6.3
<b>Binders</b>								
Co	<100	Cubic/hexagonal	1495	2725	8.9	207	30.0	16.0
Ni	<100	Cubic	1455	2650	8.9	207	30.0	15.0

Tab. 2-2 Základní složky SK a jejich vlastnosti [5]

### Karbid wolframu (WC)

Nejčastěji se karbid wolframu vyrábí redukcí oxidu wolframu a následným nauhličením při teplotě 1400 až 1500°C. Velikost částic se pohybuje od 0,5 - 30 μm. Směs oxidů wolframu je někdy dopována (< 1hm%) vanadem, chromem, tantalem či niobem, které zde působí jako růstové inhibitory velikosti zrna. Dopování prvky se provádí před nauhličováním pro dosažení ultrajemných zrn [5].

### Karbid tantalu, titanu a niobu (TaC/TiC/NbC)

Karbidy (TaC, TiC a NbC) jsou nejčastěji vyráběny na stejném principu jako WC. TaC a NbC sou velmi často vyráběny dohromady, jelikož v oxidu tantalečném (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) se vždy vyskytuje oxid niobičitý (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) [1]. Tyto karbidy se používají zejména při výrobě zápuštěk určených ke kování, jelikož snižují jejich zadírání.

### Karbid chromu (CrC)

Je druh karbidu, který je přidáván do směsi prášku z důvodu zvýšení tepelné a korozní odolnosti SK. Karbid chromu působí také jako dobrý inhibitor růstu zrn a má lepší účinky než NbC a TaC. Díky dopování karbidem chromu (<5% hm) lze snížit střední velikost zrn z 0,67 μm až na 0,13 μm, což způsobuje zvýšení tvrdosti SK a tím zlepšení otěruvzdornosti [1], [5].

### Růstový inhibitor

Inhibitor je látka, která zpomaluje či zastavuje reakci (1). U SK se používají inhibitory růstu zrn (NbC, TaC, CrC, atd). Tyto karbidy způsobují zastavení či zpomalení růstu zrn při slinování. Karbidická zrna se během procesu slinování (1100 - 1400°C) snaží snížit volnou energii systému a zaplnit póry ve směsi prášku pomocí zvýšení velikosti svého zrna. A současně zmenšit volný povrch zrna hlavní karbidické fáze. Inhibitory růstu zrn jsou drobné karbidy, které tvoří bodový kontakt mezi jednotlivými zrny hlavní karbidické fáze. Bodový kontakt mezi karbidickými zrny má za následek zpomalení růstu hlavní karbidické fáze [1].

### Pojivá fáze

Pojivá fáze ve SK má za hlavní úkol zvýšit soudržnost jednotlivých zrn karbidické fáze. Pojivo při slinování dokonale obklopí celý povrch karbidických zrn a docílí mnohonásobného zvýšení houževnatosti a snížení pórovitosti v celé struktuře SK. Pojivá fáze rovněž zpomaluje šíření trhliny v SK.

### Kobalt (Co)

Kobalt patří mezi nejčastěji používaná pojiva při výrobě SK, jelikož má výborné adhezivní a smáčivé vlastnosti, které jsou při výrobě SK velmi důležité [5]. Kobalt je vyráběn z oxidu kobaltu redukcí uhlíkem ve vodíkové atmosféře při teplotách 350 - 500°C [1].



Fyzikální vlastnosti	
Krystalová struktura	Šesterečná
Hustota	8,90 kg/dm <sup>3</sup>
Magnetické chování	Feromagnetický
Teplota tání	1495 °C (1768 K)
Měrná tepelná kapacita	421 Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Tepelná vodivost	100 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>

Tab. 2-3 Fyzikální vlastnosti kobaltu (2)

### Nikl (Ni)

Tento prvek se používá rovněž jako pojivo ve výrobě SK. Používá se především ve výrobě SK, které mají mít vyšší korozní odolnost. Pro nižší smáčivost dosahují SK horších mechanických vlastností. Horší mechanické hodnoty způsobují nižší tvrdost a houževnatost SK. Nikl má také nižší tepelnou vodivost oproti kobaltu. Pro výrobu obráběcích nástrojů se používá velmi zřídka nebo kombinaci s kobaltovým pojivem [5].

Fyzikální vlastnosti	
Krystalová struktura	Krychlová, plošne centrovaná
Hustota	8,908 kg/dm <sup>3</sup>
Magnetické chování	Feromagnetický
Teplota tání	1455 °C (1728 K)
Měrná tepelná kapacita	26,07 Jmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Tepelná vodivost	90,9 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>

Tab. 2-4 Fyzikální vlastnosti niklu (2)

### Železo (Fe)

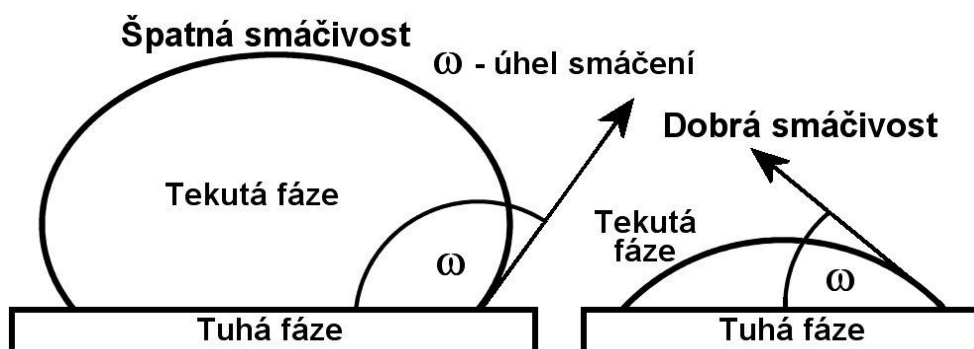
Železo je prvek, který se rovněž používá jako pojivo SK, ale v podstatně menší míře než kobalt. Používá se většinou jako pojivo ve spojení s niklem. Pojivo na bázi Fe-Ni se používalo pro výrobu SK, které měly vyplnit mezeru v nabídce řezných materiálů mezi rychlořeznou ocelí a SK s kobaltovým pojivem. Firma Sandvik Asia Ltd. dokázala nahradit SK s kobaltovým pojivem za SK se železoniklovým pojivem. Tento SK patří do skupiny P25, P30 a P40 a používal se pro soustružení a frézování [6].

Fyzikální vlastnosti	
Krystalová struktura	Prostorově centrovaná krychlová mřížka (0-1179 K; 1674-1811 K), plošně centrovaná krychlová mřížka (1179-1674 K)
Hustota	7,86 kg/dm <sup>3</sup>
Magnetické chování	Feromagnetický
Teplota tání	1538 °C (1728 K)
Měrná tepelná kapacita	107,7 Jmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Tepelná vodivost	80,2 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>

Tab. 2-5 Fyzikální vlastnosti železa (2)

### Smáčivost

Smáčivost je fyzikální vlastnost, která definuje schopnost přilnutí kapaliny na pevné těleso. Při výrobě SK je smáčivost pojiva (Co, Ni) velmi důležitá, jelikož je nutné, aby každé karbidické zrno bylo dokonale obaleno pojivem a vytvořilo tak kompaktní a pevný skelet. SK, který není dostatečně kompaktní, je křehký a má nízkou tvrdost a pevnost. Z tohoto důvodu se u SK určených k výrobě obráběcích nástrojů doporučuje použít kobaltové pojivo, které má vyšší hodnotu smáčivosti než nikl.



Obr. 2-7 Princip smáčivosti [1]

### Hodnocení pojiv

V aplikacích SK na řezné nástroje jednoznačně dominuje pojivo na bázi kobaltu. Většinou se používá čistý kobalt bez příměsí niklu či železa. Kobalt jako pojivo je vhodný zejména díky výborné smáčivosti, která zajišťuje dokonalé pokrytí povrchu karbidických zrn. V současné době se odborníci snaží nahradit kobaltové pojivo pojivem na bázi Ni-Fe, které by mělo zajistit lepší soudržnost karbidů na hranách břitu.

## 3. Rozdílná aplikace slinutých karbidů při soustružení, frézování a vrtání

V následujících podkapitolách je uveden popis třech rozdílných obráběcích operací, které se liší druhem řezného nástroje a druhem namáhání. Řezné nástroje jsou zatěžovány rozdílnými typy namáhání a působí na ně odlišné řezné síly. Pro rozdílné typy namáhání se proto volí také různé druhy SK.

### 3.1. Kinematika obrábění

Kinematiku obrábění charakterizuje tzv. řezný pohyb, který popisuje vzájemný pohyb nástroje a obrobku. Řezný pohyb charakterizují dva základní parametry: relativní rychlost a pohyb po určité dráze [7]. Nejčastěji lze řezný pohyb rozdělit do dvou základních složek:

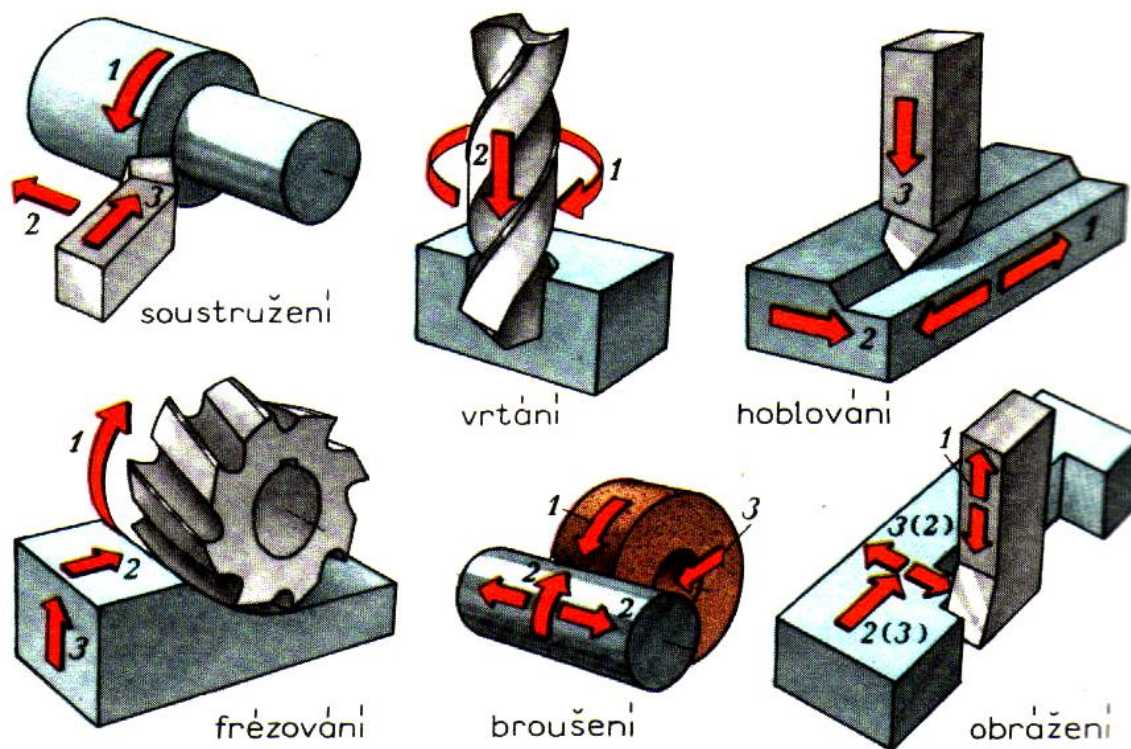
**Hlavní řezný pohyb** - shoduje se základním pohybem nástroje či obrobku.

**Vedlejší řezný pohyb** - nazývá se posuv a je kolmý k hlavnímu řeznému pohybu.

Posuvy lze rozlišovat dle způsobu obrábění na příčný, podélný, krokový, plynulý a přerušovaný. Obousměrný pohyb mezi nástrojem a obrobkem je přísuv, který obvykle koná kolmý pohyb na obráběnou plochu.

Tímto pohybem se zpravidla nastavuje hloubka řezu, tj. velikost třísky [7].

Kombinací jednotlivých pohybů nástroje a obrobku vzniká výsledný řezný pohyb, který má významný vliv na celý proces obrábění. Na obr. 3-1 jsou znázorněny základní kinematické pohyby obrobku a nástroje [7].



Obr. 3-1 Základní kinematické pohyby obrobku a nástroje [6]

### 3.2. Soustružení

Soustružení je druh obráběcí operace, při které nedochází k přerušovanému řezu, a proto není řezný nástroj rázovitě zatěžován. Při soustružení je problematický odvod tepla z místa řezu, jelikož chladicí kapalina se mnohdy nedostává k místu samotného oddělování třísky od polotovaru. Špatným odvodem tepla dochází k přehřívání samotného substrátu.

U soustružení houževnatých a zpevňujících materiálů, jako jsou austenitické oceli, dochází často k tvorbě nárůstku, který způsobuje změnu geometrie nástroje, zvýšení řezných sil a teploty v místě řezu. Tvorba nárůstku u soustružení patří mezi hlavní problémy při

obrábění austenitických ocelí. Tvorbě nárůstku lze předejít správně navrženou geometrií nástroje, správnými řeznými rychlostmi a správnými povrchovými vrstvami. U návrhu SK pro výrobu soustružnického nože či destičky je podstatné, pro jaké soustružnické operace se bude používat: hrubování, dokončování nebo jejich kombinace. Dalším kritériem je druh obráběného materiálu: tvrdý, houževnatý, zpevňující, atd. Jeden z posledních faktorů je, zdali se bude při obrábění používat provozní kapalina.

Při soustružení austenitických ocelí se doporučuje volit spíše houževnatější SK, avšak méně houževnatější než u vrtání, jelikož břit soustružnického nože není tak konstrukčně komplikovaný a má vyšší tuhost než břit šroubovitého vrtáku. Pro soustružení se doporučuje spíše tvrdší a jemnozrnnější typ SK např. TSF 22 od firmy CERATIZIT, který má průměrnou velikost zrn 0,2 až 0,5 $\mu\text{m}$ , dosahuje tvrdosti 1930 HV a hodnotu součinitele lomové houževnatosti  $K_{1c} = 7,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

### 3.3. Frézování

Patří mezi druhy obrábění, při kterých dochází vlivem přerušovaného řezu k velkým tepelným a mechanickým rázům. Tepelné rázy způsobují vznik tepelných trhlin, které snižují životnost obráběcího nástroje.

Při frézování austenitických ocelí je problematické chlazení, jelikož při přívodu řezné kapaliny dochází vlivem přerušovaného řezu k velkým tepelným rázům na břitech nástroje. Bez použití chladicího média dochází vlivem špatného odvodu tepla přes obrobek k přehřátí řezného nástroje i obrobku. Chladicí kapalina pro frézování austenitických se volí na bázi olejů, které mají nižší chladicí účinek. U frézování jsou oproti vrtání a soustružení podstatně nižší řezné síly. Tím pádem lze volit SK s vyšší tvrdostí než u vrtání. Např. TSF44 od firmy CERATIZIT, který má průměrnou velikost zrn 0,2 až 0,5 $\mu\text{m}$ , dosahuje tvrdosti 1730 HV a hodnoty součinitele lomové houževnatosti  $K_{1c} = 7,8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

### 3.4. Vrtání šroubovitým vrtákem

Vrtání je obráběcí operace, při které jsou dosahovány vysoké řezné síly, které namáhají vrták na krut, vzpěr a tlak. Vrták má velmi složitou geometrii ostří, která snižuje tuhost celého nástroje, patří mezi nejproblematictější způsoby obrábění. Při vrtání dochází k tvorbě velkého množství tepla, které se bez vnitřního chlazení velmi špatně odvádí. Vrtání bez přerušování řezu do hloubek 8D je problematické z důvodu odvodu třísek z místa řezu a vyššímu namáhání vrtáku na vzpěr. Při vytlačování třísek šroubovicí dochází ke tření, které způsobuje abrazivní opotřebení nástroje a zvýšení jeho teploty.

U návrhu vrtáku je velmi důležité dbát na dostatečnou houževnatost a tuhost substrátu. Při vrtání austenitické oceli se musí dbát na dostatečné chlazení, dostatečný odvod třísek z místa řezu a správnou volbu povrchové vrstvy, která má zmírnit vysoké adhezivní namáhání vrtáku. Monolitní vrtáky ze SK se vyrábí z nejhouževnatějších druhů SK, které mají vysoký obsah Co cca. 10%, a mají středně velká karbidická zrna (submicron - fine, 0,5 - 1 $\mu\text{m}$ ). Např. TSM33 od firmy CERATIZIT, který má průměrnou velikost zrn 0,5 až 0,9 $\mu\text{m}$ , dosahuje tvrdosti 1590 HV a hodnoty součinitele lomové houževnatosti  $K_{1c} = 9,4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

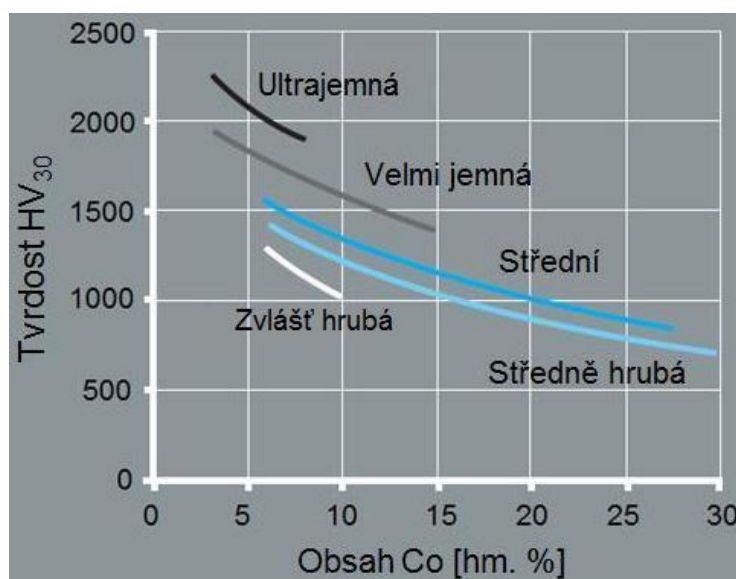


## 4. Základní parametry slinutých karbidů, ovlivňující aplikaci u řezných nástrojů

Při výrobě a navrhování slinutých karbidů je nutné si uvědomit, že SK je druh kompozitu, který obsahuje rozdílné složky s různými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Při návrhu je ideální využít tzv. synergie jednotlivých složek a docílit optimální vlastnosti SK. Základní vlastnosti SK jsou: tvrdost, houževnatost, lomová houževnatost, velikost zrna karbidické fáze, tepelná stabilita, třecí vlastnosti, množství Co, brousitelnost, atd..

### 4.1. Tvrdost

Tvrdost je mechanická vlastnost, definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. U SK je tato mechanická vlastnost velmi podstatná, jelikož podává informaci o tom, o jaký SK se jedná a jakou má strukturu. Tvrdost SK je závislá především na poměru karbidů, pojiva a na velikosti zrn karbidické fáze. Obecně platí, že se zvyšujícím procentem pojiva klesá tvrdost SK. Nejvyšších hodnot tvrdosti je dosahováno u ultrajemných karbidických zrn s minimálním množstvím kobaltu, viz. obr. 4-1 [1].

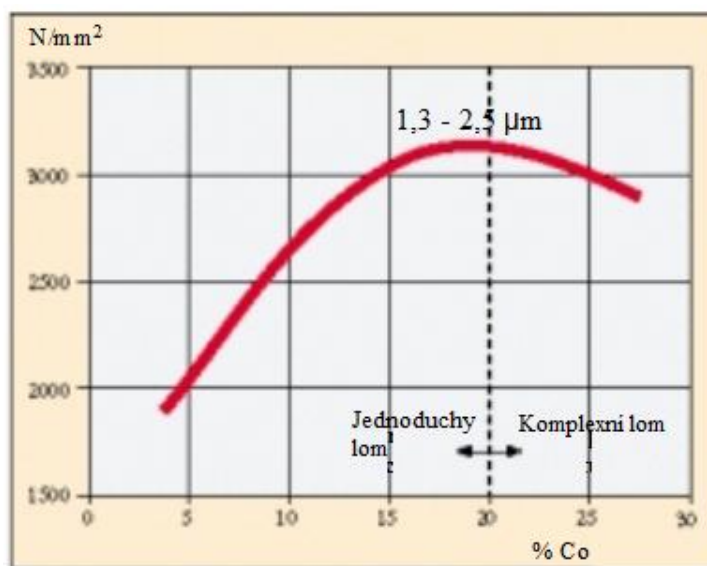


Obr. 4-1 Závislost tvrdosti na obsahu Co a velikosti zrn WC [8]

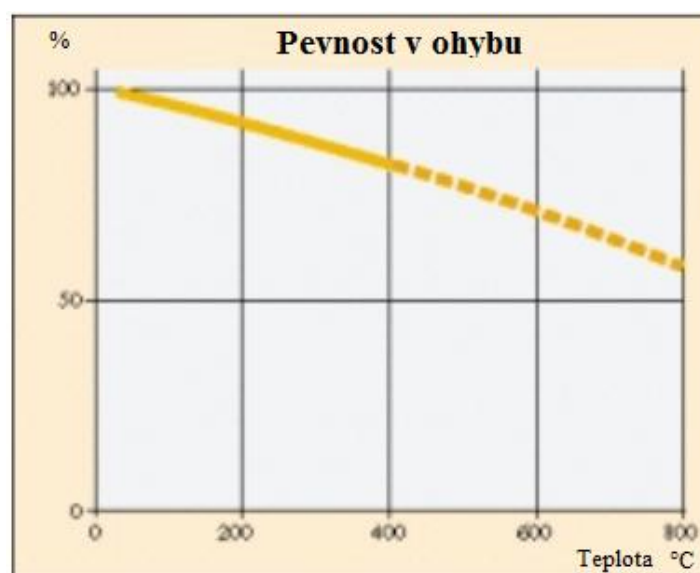
Tvrdost je veličina, která značně ovlivňuje odolnost a trvanlivost nástroje proti poškození. Proto je snaha při navrhování SK o co možná nejvyšší tvrdost. Negativním vlivem vysoké tvrdosti je pokles lomové houževnatosti.

### 4.2. Pevnost v ohybu (transverse rupture strenght - TRS)

Pevnost v ohybu patří mezi základní mechanické vlastnosti SK. Jelikož SK patří mezi křehké materiály. U SK se určuje místo meze pevnosti v tahu. Dále se u zkoušek TRS částečně eliminuje vliv vrubů či jiných povrchových vad na výslednou mez pevnosti. Na obr. 4-2 je znázorněna závislost množství kobaltu na pevnost v ohybu s vyznačenou hranicí 20% Co, kde přechází jednoduchý lom na komplexní (složitý) lom [23].



Obr. 4-3 Závislost množství kobaltu na pevnosti v ohybu pro velikost zrna 1,3 - 2,5  $\mu\text{m}$  [23]



Obr. 4-4 Vliv teploty SK na pevnost v ohybu [3]

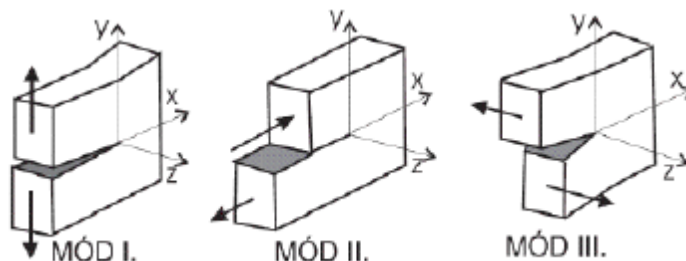
### 4.3. Lomová houževnatost

Houževnatost charakterizuje schopnost materiálu absorbovat určitou velikost energie před porušením materiálu. Lomová houževnatost je materiálová charakteristika vycházející z lomové mechaniky, pomocí které lze definovat, jaké zatížení vydrží strojní součást s trhlinou. Je definována jako kritická hodnota součinitele intenzity napětí v okamžiku nestabilní iniciace trhliny a je mírou odolnosti tělesa proti křehkému porušení [1]. Pro SK zatím nebyla vyvinuta mezinárodní norma, která by přesně definovala postup a vyhodnocování naměřených hodnot lomové houževnatosti  $K_{Ic}$ . Z energetického hlediska lze rozdělit lomy na nízkoenergetické - křehké a na vysokoenergetické - houževnaté. Na hodnotu lomové houževnatosti má zásadní vliv teplota materiálu, rychlost zatěžování, typ napjatosti (přítomnost vrubů) a částečně velikost a tvar zkoušeného vzorku. V technické praxi je nejhorší nízkoenergetický - křehký lom, který se šíří rychlostí až 5 km/s, a k jeho iniciaci stačí napětí pod mezí kluzu. Pro zabránění vzniku křehkého lomu lze použít dva přístupy: **koncepce tranzitních teplot** - vyžaduje tranzitní chování materiálu; **koncepce zabránění iniciace lomu**, která je

popisována v lomové mechanice - částečně ji charakterizuje lomová houževnatost. Lomová houževnatost se nejčastěji popisuje kritickým součinitelem intenzity napětí  $K_{Ic}$ , ke kterému se přiřazují dolní indexy.

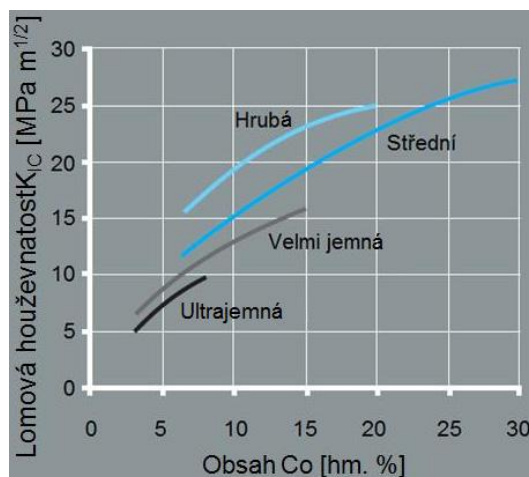
$K_{Ic}$  - kritický součinitel intenzity napětí

$K_{(Ic, IIc, IIIc)}$  - indexy I, II, III označují typy zatěžování stroj.součásti viz.obr. 5-1



Obr. 4-5 Typy zatěžování strojní součásti [23]

U houževnatých materiálů se lomová houževnatost určuje zejména na kmitacích strojích. U velmi tvrdých materiálů je mnohdy problém vytvořit únavovou trhlinu, a proto se určuje lomová houževnatost pomocí speciálních zkoušek používaných pro keramické materiály nebo vnikacích zkoušek podle dosažené tvrdosti. Hodnota lomové houževnatosti roste u SK s vyšším podílem kobaltu a zvětšující se velikostí zrn karbidické fáze viz. obr. 4-6.



Obr. 4-6 Závislost lomové houževnatosti na obsahu Co a velikosti zrn [8]

SK mají podstatně nižší hodnoty lomové houževnatosti ( $8 - 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) než oceli (konstrukční ocel ( $30 - 140 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )) [1].

Únavové trhliny se v SK šíří preferenčně po hranicích zrn karbidické fáze a dále po fázových hranicích zrno - pojivo. S rostoucí velikostí zrna roste střední tloušťka vrstvy kobaltové fáze a klesá rychlost šíření trhlin, protože v houževnatém pojivu se trhliny šíří pomaleji. V jednotlivých velkých zrnech karbidů se mohou objevit i transkrystalické trhliny [1].

Měření lomové houževnatosti se v případě SK obvykle provádí dvěma základními způsoby.

**První způsob** je podobný jako testování oceli a vychází z normy ČSN ISO 12737, kde se trhlinka iniciuje ze speciálního Chevronového vrubu, který se zpravidla vyrábí



elektrojiskrovým obráběním. Po vytvoření trhliny o délce cca. půlky šířky testovaného vzorku se zkušební těleso dolomí tříbodovým ohybem. Po dolomení se změří skutečná délka trhliny. Rozměry vzorků, lomová síla, délka trhliny a tvarová funkce se dosadí do vztahu (5-1) a vypočte se hodnota  $K_{Ic}$  [10].

$$K_{Ic} = F_Q \frac{S}{BW^2} f(g1) = [MPa * m^{1/2}] \quad (4-1)$$

$F_Q$ [kN]	- lomová síla
$S$ [cm]	- rozteč mezi vnějšími podporami při zatěžování vzorku
$B$ [cm]	- tloušťka vzorku
$W$ [cm]	- šířka vzorku
$a$ [cm]	- délka trhliny
$g1$	- tvarová funkce

**Druhý způsob** vychází z určování lomové houževnatosti dle normy ČSN EN 14425-3 pro keramiku. Tento způsob opět využívá Chevronova vrubu pro iniciaci a růst trhliny. Testování se provádí na tělesech určených pro čtyřbodový ohyb, která se zatěžují na klasických trhacích strojích při malé zatěžovací rychlosti pod 0,05 mm/min. Celý proces testování se provádí na tělesech, která nemají trhlínu, ale pouze Chevronový vrub. Tato metoda je vhodná pro ultrajemné typy SK s nízkým obsahem pojiva a nízkou hodnotou  $K_{Ic}$ .

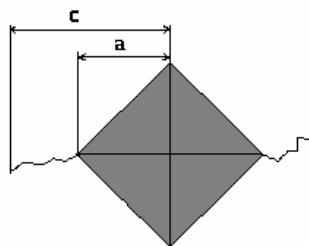
#### 4.4. Stanovení lomové houževnatosti pomocí vnikací zkoušky tvrdosti

Tento přístup pro zjišťování lomové houževnatosti nepatří mezi přesné metody stanovení lomové houževnatosti, ale slouží jako orientační a porovnávací metoda pro stanovení lomové houževnatosti SK. Celá zkouška se provádí podobně jako zkouška dle Vickerse, kde vnikací těleso má tvar čtyřbokého jehlanu. Princip metody spočívá v měření délky trhliny od vtisku, které způsobilo vnikací těleso. Poté se pomocí empirického vztahu vypočítá lomová houževnatost [4], [11].

$$K_{Ic} = \frac{0,203 * HV * (u / 2)^{1/2}}{(c / u)^{3/2}} = [MPa * m^{1/2}] \quad (4-2)$$

$HV$ [MPa]	- tvrdost
$u$ [m]	- délka úhlopříčky vtisku
$c$ [m]	- celková délka trhliny
$a = 1/2 * u$	

(4-3)



Obr. 4-7 Schéma Vickersova vtisku s trhlinami

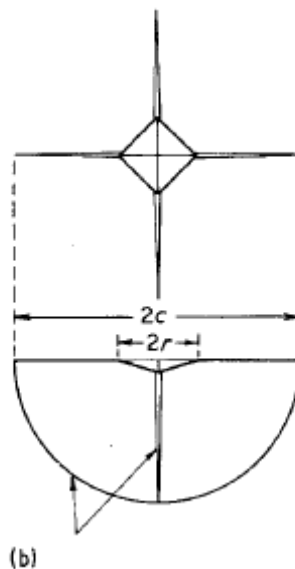
Pro určení lomové houževnatosti lze použít i vztah (4-4), kde suma L je celková délka všech trhlin.

$$K_{Ic} = 6,2 * \left( \frac{HV_{50}}{\sum L} \right)^{1/2} = [MN / m^{3/2}] \quad (4-4)$$

### Určení lomové houževnatosti podle Nihary

Tato metoda je založena rovněž na vnikací metodě pomocí měření tvrdosti dle Vickerse. Neměří se délky trhlin, ale poloměr hloubky trhlin (c), viz. obr. 4-8. Poloměr hloubky trhliny lze také vypočítat pomocí vztahu (4-5) [12]. Poloměr hloubky trhlin se dosadí do vztahu

(4-6) a vypočítá se hodnota lomové houževnatosti.



Obr. 4-8 Řez vtisku vzniklý Vickersovým indentorem [12]

$$c = k * P^{2/3} \quad (4-5)$$

k - konstanta funkce Youngova modulu  
P [kgf] - vtiskové zatížení (metoda tvrdosti dle Vickerse)

$$K_{Ic} = \xi \left( \frac{E}{H} \right)^{1/2} P c^{-3/2} = [MPa * m^{1/2}] \quad (4-6)$$

$\xi$  - nezávislá materiálová konstanta  
E [Mpa] - modul pružnosti v tahu  
H - tvrdost podle Vickerse

### Stanovení lomové houževnatosti podle Palmqvista

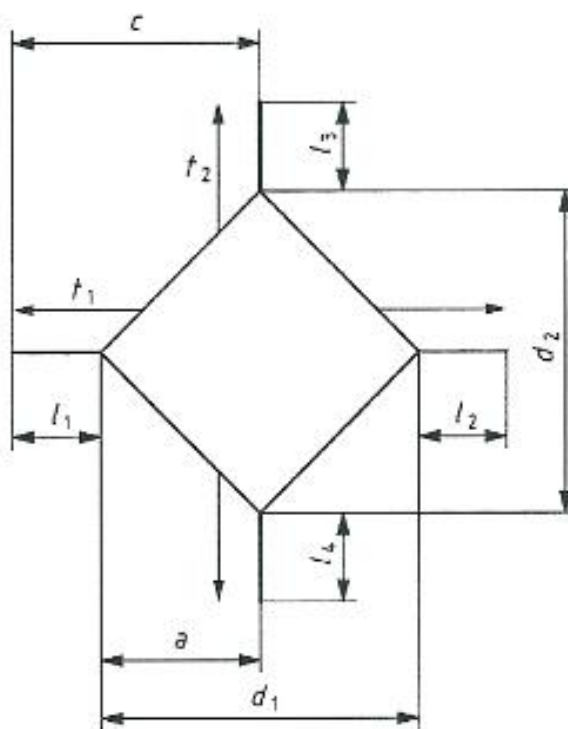
Lomová houževnatost podle Palmqvista,  $W$ , je hodnota získaná měřením délek trhliny v rozích vtisku tvrdosti podle Vickerse. Vtisky se mohou hodnotit buď při jednom zatížení, obvykle 294 N, nebo z inverzní hodnoty směrnice závislosti délky trhliny na zatížení v rozsahu použitých zatížení. U SK je profil hloubky trhliny normálním Palmqvistovým typem, to znamená, že je tvořen samostatnými mělkými oblouky, které vycházející z každého rohu vtisku. Pro relevantní hodnoty lomové houževnatosti je nutné pečlivě připravit povrch zkoušeného vzorku [13].

Zkouška podle Palmqvista nepatří svým způsobem do lomové mechaniky, a to vzhledem k nejistotám spojeným se zbytkovými napětími vzniklými

v důsledku indentace. Výhodou této zkoušky je relativně snadné provedení, získání hodnoty lomové houževnatosti a hodnoty tvrdosti. První články, které popisovaly tento způsob zkoušení, vznikly v roce 1998 a byly publikovány UK National Physical Laboratory [13].

### Postup při provádění zkoušky

Před samotným provedením vtisku je důležité, aby byl správně připraven povrch SK. Povrch vzorku musí být co nejméně ovlivněn zbytkovým napětím, aby co nejméně zkreslilo výsledek zkoušky. Příprava vzorku probíhá dle normy ČSN ISO 28079. Při provádění vtisku je doporučeno použít zatížení indentoru 294 N. Pokud se nevytvoří trhliny, zatížení se zvýší až na hodnotu 981 N. Nad zatížení 981 N nemusí být výsledky platné. Při měření délek trhlin lze použít dvě metody. V první metodě se měří vzdálenost  $c$  od čela ke konci trhliny v obou diagonálních směrech. Celková délka trhliny je sumou obou těchto hodnot, od které se odečte součet úhlopříček vtisku. U druhé metody se měří délka každé vytvořené trhliny okolo vtisku. Délka se měří z rohu vtisku k jejich čelům. Součet jednotlivých délek trhlin udává celkovou délku trhliny. Pokud se kořen trhliny neshoduje s koncem úhlopříčky vtisku, měří se délka trhliny u okraje vtisku z místa jejího vzniku viz. obr. 4-9 [20]. Lomová houževnatost dle Palmqvista ( $W_k$ ) vychází z houževnatosti dle Palmqvista ( $W_g$ ), která je definována dle vztahu (4-7). Lomová houževnatost dle Palmqvista je definována dle vztahu (4-8) [13].



Obr. 4-9 Schématický diagram vtiskových charakteristik podle Palmqvista [13]

$$W_g = \frac{P}{T} = [N * mm^{-1} = J * m^{-2}] \quad (4-7)$$

P [kgf] - vtiskové zatížení (metoda tvrdosti dle Vickerse)  
T [mm] - celková délka trhliny

$$W_k = A\sqrt{HV} * \sqrt{W_g} = [MN * m^{-3/2}] \quad (4-8)$$

A - konstanta o hodnotě 0,0028  
HV - tvrdost podle Vickerse

#### Určení lomové houževnatosti podle Shettyho

Shettyho model zjišťování  $K_{Ic}$  je velice jednoduchý a počítá pouze se vstupními hodnotami HV a sumou délek viz. vztah (4-9). Avšak poměrně dobře charakterizuje daný SK [14].

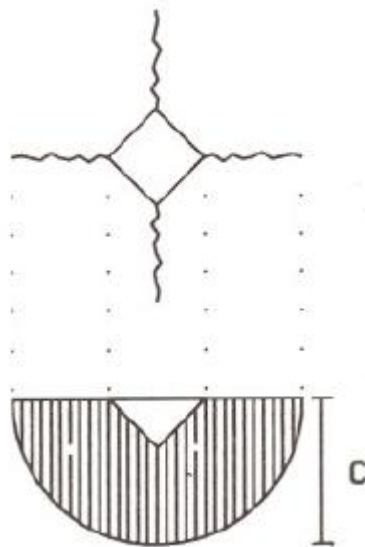
$$K_{Ic} = 0,150449 * \left( \frac{HV_{30}}{\sum L} \right)^{1/2} = [MN / m^{3/2}] \quad (4-9)$$

#### Určení lomové houževnatosti podle Evans & Charles

Evans & Charlesův model je založen na výpočtu lomové houževnatosti pomocí tzv. mediálních trhliny C viz. obr. 4-10 Jestliže neznáme velikost mediánu trhliny, lze ji dopočítat pomocí vztahu (4-11). Výsledný výpočetový vztah pro určení  $K_{Ic}$  je uveden viz. (4-1) [14].

$$c = l+a \quad (4-10)$$

$$K_{Ic} = 0,16 * Ha^{1/2} (c/a)^{-3/2} \quad (4-11)$$



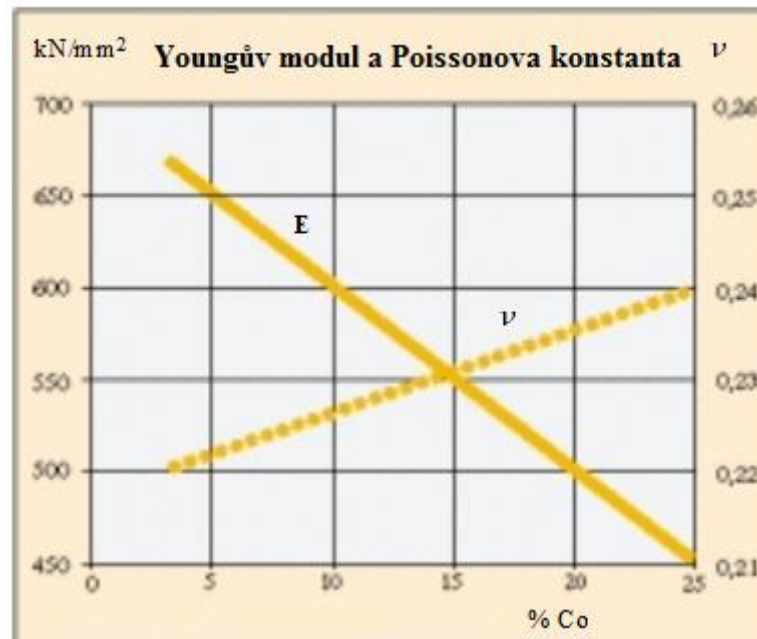
Obr. 4-10 Řez vtisku s mediánem c [14]

#### Určení lomové houževnatosti dle Lawn et al.

Tento způsob zjišťování lomové houževnatosti je opět založen na měření velikosti mediánu trhlin, ale je doplněn o závislost mezi modulem pružnosti a tvrdostí SK. Toto doplnění má postihnout vliv zbytkového napětí vzniklého vtiskem indentoru na výslednou lomovou houževnatost viz. vztah (4-12) [14].

$$K_{Ic} = 0,028 * Ha^{1/2} (E/H)^{1/2} (c/a)^{-3/2} \quad (4-12)$$

E [kN/mm<sup>2</sup>] - Youngův modul

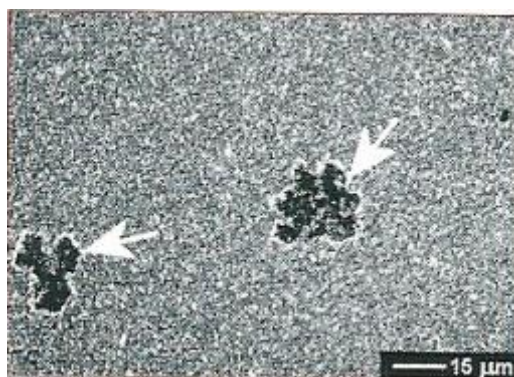


Obr. 4-11 Závislost Youngova modulu a Poissonovy konstanty na množství Co [23]

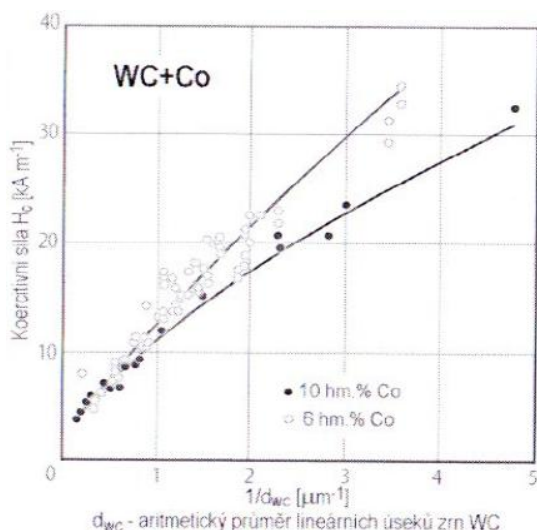
#### 4.5. Magnetické vlastnosti slinutých karbidů

Magnetické vlastnosti SK byly zařazeny do teoretické části z důvodu možného uplatnění magnetických charakteristik pro určení mechanických a chemických vlastností SK. SK se skládá minimálně ze dvou základních fází: pojivové a karbidické. Pojivá fáze je tvořena z kobaltu, niklu či železa. Kobalt i nikl jsou feromagnetické prvky, zatímco karbidická fáze (WC) je paramagnetická. Pomocí magnetického sycení substrátu je možné u SK měřit nejen množství pojivé fáze, ale i přítomnost nežádoucí  $\eta$  - fáze, která je velmi křehká a narušuje strukturu SK.  $\eta$  - fáze kobaltu je nemagnetická a vzniká při slinování směsi prášku, kdy došlo k překročení teploty slinování. Mikrostruktura SK, kde se vyskytuje nežádoucí  $\eta$  - fáze kobaltu, je na obr. 4-12.

Měřením hodnoty koercitivní síly, která je definována stavem napjatosti kobaltové fáze, závisí zejména na stupni disperze této fáze (čím jemnější jsou jednotlivé části pojiva, tím tenčí jsou tloušťky kobaltu mezi karbidickými zrny, nebo-li koercitivní síla roste) [1]. V průmyslové praxi se pomocí koercitivní síly často zjišťuje velikost zrn karbidické fáze. Velikost zrn lze měřit, jelikož velikost a uspořádání oblastí pojivé fáze záleží také na velikosti zrn karbidické fáze. Měření velikosti zrn lze samozřejmě provádět pokud je známo přesné množství pojivé fáze v SK. Závislost koercitivní síly na velikosti zrn je zobrazena na obr. 4-13 [1], [15].



Obr. 4-12 Mikrostruktura SK s přítomností  $\eta$  - fáze kobaltu [1]



Obr. 4-13 Závislost koerctivní síly na velikosti zrn WC a obsahu Co [1]

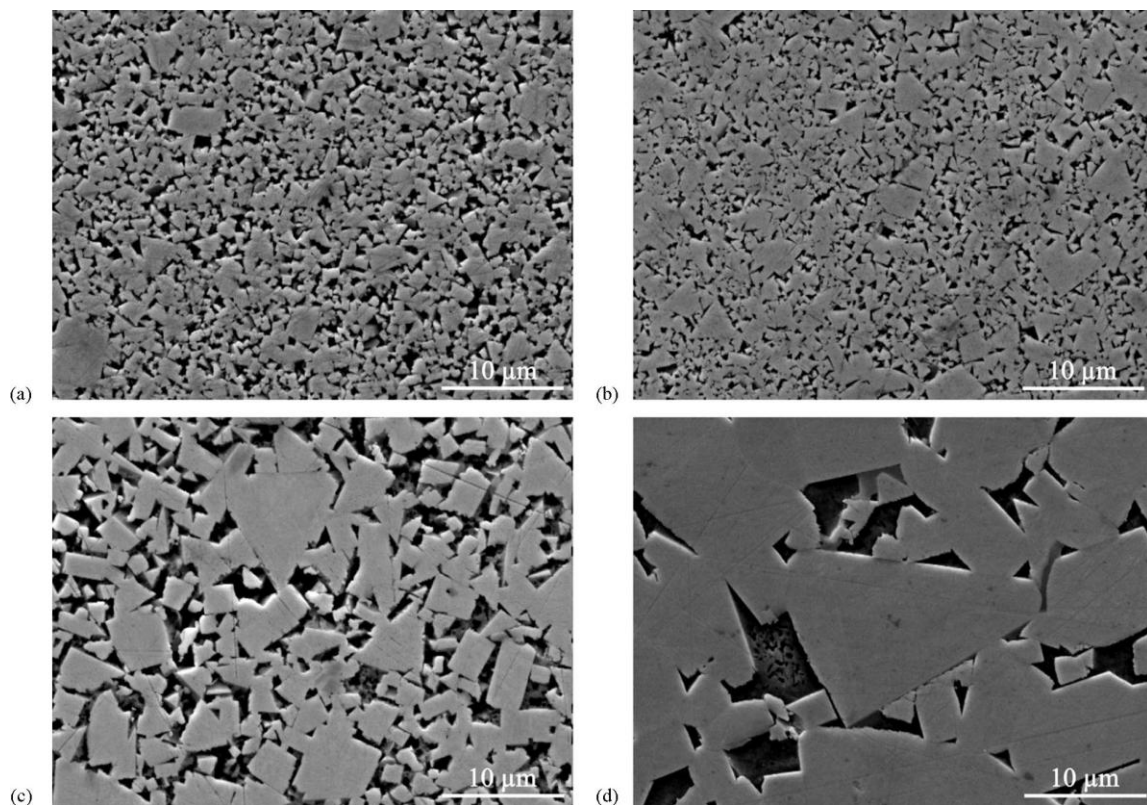
#### 4.6. Brousitelnost řezného nástroje

Tato technologická vlastnost popisuje schopnost a vhodnost daného materiálu měnit svůj tvar pomocí obráběcí technologie broušení. Broušení patří do technologie třískového obrábění, kde není 100 % definována geometrie břitu. Brusná zrna jsou náhodně rozmístěna v celém objemu broušícího nástroje. U broušení SK zpravidla nedochází k závažným problémům, avšak nelze vybrousit tak dokonalé a "špičaté" ostří, jako u rychlořezných ocelí, které se také využívají při obrábění. Při broušení ostrých úhlů u SK může dojít k částečnému vydrolení karbidické fáze ze špičky. Vydrolení či vytrhnutí karbidu ze základní matrice může při obrábění způsobit destrukci celého nástroje, jelikož vydrolením či vytrhnutím vzniká vrub, který je koncentrátorem napětí a může způsobit při namáhání v místě vrubu destrukci nástroje.

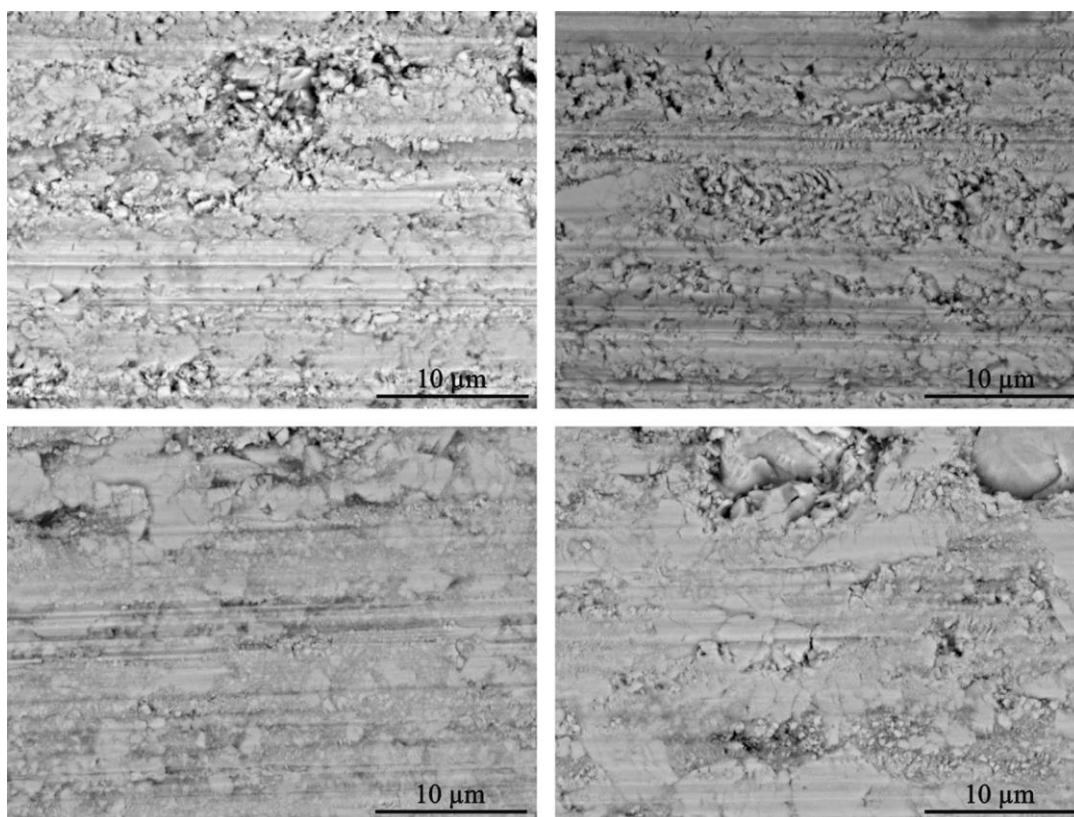
Při broušení dochází k velkému tepelnému namáhání povrchové vrstvy substrátu, jelikož až 80% tepla přechází při broušení do substrátu. Při takto vysokém tepelném namáhání dochází ke zvýšení vnitřního napětí v povrchových vrstvách substrátu, a to způsobuje možný vznik trhlin, které působí jako iniciátory k dalšímu porušování substrátu. Pro velké množství vznikajícího tepla při broušení se zpravidla všechny SK brousí s přívodem chladícího média.

Na kvalitu povrchu SK po broušení má kromě řezných podmínek, chlazení, stupeň otupení brusného kotouče také vliv velikost karbidického zrna SK. Na obr. 4-14 je struktura SK WC s 10% kobaltu před broušením s různými velikostmi karbidických zrn. Na obr. 4-15 lze vidět značně zdeformovaný povrch SK, kde je na obr. 4-15d (SK s nejvyšší velikostí zrna) patrné vytrhnutí kobaltového pojiva a roztržení některých karbidických zrn. Z toho vyplývá, že pro získání povrchu SK s vyšší jakostí je lepší volit SK s jemnozrnější strukturou.





Obr. 4-14 Struktura SK WC - 10hm% Co před broušením s různými velikosti karbidických zrn (a) 3 μm, (b) 5 μm, (c) 10 μm, (d) 20 μm [8]



Obr. 4-15 Struktura povrchu slinutých karbidů typu WC – 10 hm. % Co po broušení. Broušící parametry:  $v_c = 30 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $v_f = 100 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $a_e = 0,01 \text{ mm}$  [8]

## 5. Zvyšování užitečných vlastností slinutých karbidů pro použití na řezné nástroje

V současné době se klade velký důraz na zhuštění a zefektivnění obráběcích operací. Tyto aspekty vedou ke zlepšení a zvýšení výkonnosti řezných nástrojů, tudíž i slinutých karbidů. V současné době je nejpoužívanější a nejefektivnější způsob ke zvýšení užitečných vlastností řezných materiálů a hlavně slinutých karbidů deponice tenkých vrstev. Tenké vrstvy se začaly používat od roku 1969 na principu TiC. První destička ze slinutého karbidu byla deponována koncem 60. let 20. století (materiál GC125 firmy Sandvik Coromat). Poté byly vyvinuty vrstvy na základě TiN a TiCN. Zhruba o deset let později byla vyvinuta vrstva  $Al_2O_3$ . V současnosti je na trhu mnoho typů tenkých vrstev, které nesou různá označení a mnohdy jsou si velmi podobné.

Tenké vrstvy se obvykle dělí do čtyř vývojových generací. V současné době se převážně používají tenké vrstvy, které se skládají ze dvou či více vrstev a tvoří tzv. sendvič.

Mezi moderní vrstvy spadají tzv. TripelCoatings vrstvy. Tyto vrstvy komplexně řeší rozdílné požadavky kladené na systém s tenkými vrstvami. TripelCoatings vrstvy se skládají ze tří základních částí.

Na povrchu substrátu (slinutý karbid) je ukotvená adhezivní vrstva a na ní je nanášena jádrová vrstva systému. Na této vrstvě, vytvářející rozhraní s okolním prostředím, je vrchní obvykle kluzná vrstva. Tloušťka TripleCoatings vrstev je mezi 1 a  $7\mu m$ , přičemž tloušťka jednotlivých mezivrstev se pohybuje od desetin mikrometru až po jednotky mikronů. Povrchová vrstva tvoří hlavní funkční část chránící matrici, nejčastěji se jedná o bariérový efekt proti tepelným šokům, difúzním procesům, agresivnímu prostředí a šíření povrchových trhlin.

### Souhrn příznivých vlastností tenkých vrstev na řezný nástroj vyrobený ze SK:

- zvyšování tepelné stability SK
- zvýšení otěruvzdornosti
- zvýšení korozivzdornosti a chemické odolnosti
- zabránění šíření povrchových trhlin
- zvyšování tvrdosti povrchu

Mezi další způsoby jak zvýšit užitečné vlastnosti slinutého karbidu je úprava mikrogeometrie nástroje. Tento způsob rovněž patří mezi moderní způsoby zvyšování výkonnosti a životnosti řezných nástrojů. Úpravou mikrogeometrie lze dosáhnout příznivého zaohlení řezných hran, které po broušení obsahují mnoho vrubů a povrchových defektů.

### Způsoby úprav mikrogeometrie řezného nástroje ze SK:

- omílání
- kartáčování
- tryskání



## 6. Vlivy působící na trvanlivost nástroje

Obrábění je proces, kdy se řezným nástrojem odebírá tříška, která je značně plasticky deformována. Díky vysoké deformaci odebrané třísky a třením mezi třískou obrobkem a nástrojem vzniká velké množství tepla, které ovlivňuje celý řezný proces včetně obráběcího nástroje. Krom tepelného namáhání nástroje dochází mezi obrobkem, třískou a nástrojem ke značnému tření, které způsobuje adhezivní a abrazivní degradaci nástroje. Pro optimální volbu materiálu, ze kterého je obráběcí nástroj vyroben, se materiály musí podrobit různým zkouškám, které charakterizují jednotlivé vlastnosti materiálu.

### 6.1. Tvorba tepla při obrábění

Při obrábění jakéhokoliv materiálu se z 98% přeměňuje mechanická energie potřebná pro odebrání třísky na tepelnou energii. Vzniklé teplo má zásadní vliv na produktivitu, výkonnost a trvanlivost nástroje. Nejvyšší podíl na vzniku tepla v místě řezu má oblast plastické deformace tvoření třísky, oblast tření třísky s čelem nástroje a oblast tření hřbetu nástroje s obrobkem. Vzniklé teplo ovlivňuje petchování a zpeňování obráběného materiálu i samotný polotovar.

Největší odběr tepla z místa řezu je zajišťován odcházející třískou (až 80% tepla). Při nízkých řezných rychlostech dochází k odvodu tepla i prostřednictvím obrobku. Se zvyšující řeznou rychlostí roste podíl odvodu tepla třískou. Při komplikovaném odvodu třísky z místa řezu (vrtání, hluboké vrtání) je nezbytné zajistit dostatečný přívod chladicí kapaliny do místa řezu. Chladicí kapalina mimo chladicího účinku, pomáhá odvádět třísky z místa řezu a snižuje míru tření mezi nástrojem, obrobkem a třískami.

## 7. Odolnost slinutých karbidů proti tepelným a mechanickým rázům

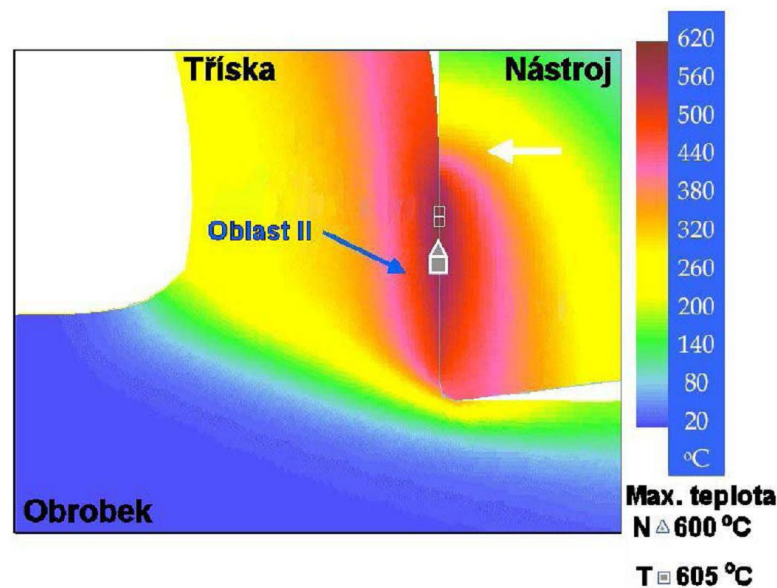
Při obrábění musí SK odolávat zejména tepelným a mechanickým rázům. Obecně platí, že SK jsou charakterizovány nižší houževnatostí oproti rychlořezným ocelím. Nižší houževnatost SK je dána především vyšším podílem karbidické fáze a nižším podílem pojící fáze. Při obrábění může dojít k vylomení či vydrolení části břitu vlivem cyklického namáhání nástroje [24]. U těžkoobrobitelných materiálu jako např. austenitické oceli dochází zejména při vyšších řezných rychlostech k lokalizaci plastické deformace ve smykové rovině a ke vzniku výrazněji oddělených elementů plynulé třísky. Následkem toho kolísá řezná síla v podstatně vyšší míře než u jiných druhů ocelí. Větší amplituda hlavní složky řezné síly zvyšuje nebezpečí vzniku únavového lomu, ale za určitých podmínek roste i intenzita a mění se charakter jeho opotřebení otěrem nebo se může projevit jako mikroskopické vydrolení břitu [24].

Tepelné rázy se projevují zejména při obrábění, kde dochází k přerušovanému řezu (frézování, soustružení, atd.). Při takto přerušovaném řezu dochází k prudkému ohřevu a poté ochlazení břitu nástroje. Tyto tepelné rázy způsobují tahové a tlakové napětí v povrchu SK, které může zapříčinit vznik mikroskopických trhlinek v oblasti ostří, které mohou způsobit křehké porušení břitu nástroje (4). Odolnost proti tepelným šokům se nejčastěji testuje pomocí tzv. "quench" testu, kde se SK obvykle zahřeje pod teplotu fázové transformace kobaltu rozpuštěného v SK, a poté se prudce ochladí obvykle na pokojovou teplotu či teplotu používané řezné kapaliny.

Zvýšení odolnosti proti tepelným rázům lze úspěšně dosáhnout použitím tenkých vrstev např. na bázi AlTiN (bez chlazení) nebo vrstvou pod obchodním názvem naCo, která má funkci tepelného štítu a tepelně izoluje SK od třísky a obrobku. Další možností jak zmírnit dopad tepelných rázů, je obrábění bez použití procesních kapalin nebo nepoužívat procesní kapaliny s velkou měrnou tepelnou kapacitou.

## 7.1. Teplota v místě řezu

Na teplotu řezání má zásadní vliv zejména kontakt mezi třískou a nástrojem, velikost řezných sil a tření mezi povrchem obrobku a břitem nástroje. Při obrábění nízkými řeznými rychlostmi dochází k nejvyššímu výskytu teploty na špičce nástroje. Maximální teplota při obrábění vyššími řeznými rychlostmi vzniká v určité vzdálenosti od ostří nástroje. Na obr. 7-1 je příklad záznamu tepelného pole při soustružení [16].

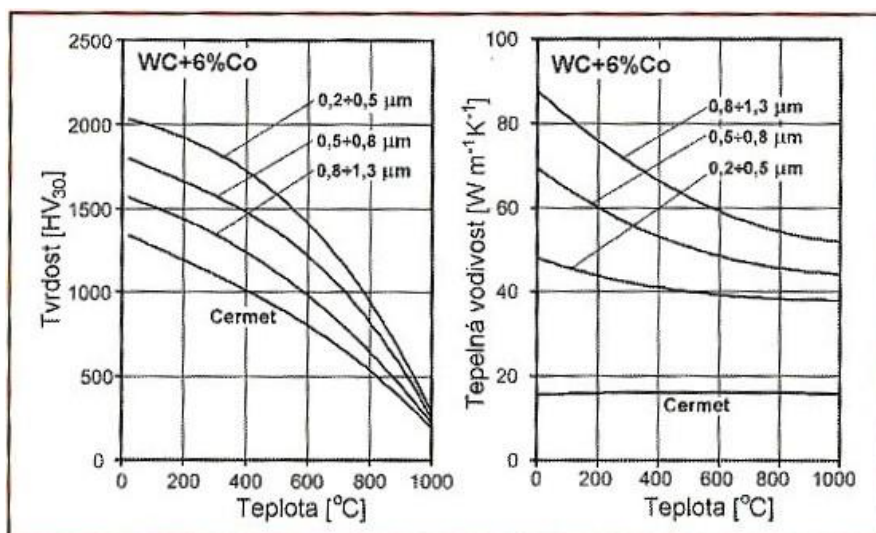


Obr. 7-1 Záznam tepelného pole při soustružení [16]

## 7.2. Tepelná vodivost slinutých karbidů

Tato fyzikální vlastnost popisuje schopnost látky odvádět teplo ze zahřáté části do chladnější části látky. U SK se tepelná vodivost mění se změnou velikostí zrn a teploty. Množství kobaltu nemá zásadní vliv na tepelnou vodivost. Pouze pokud pojivo obsahuje nikl, tak tepelná vodivost klesá.

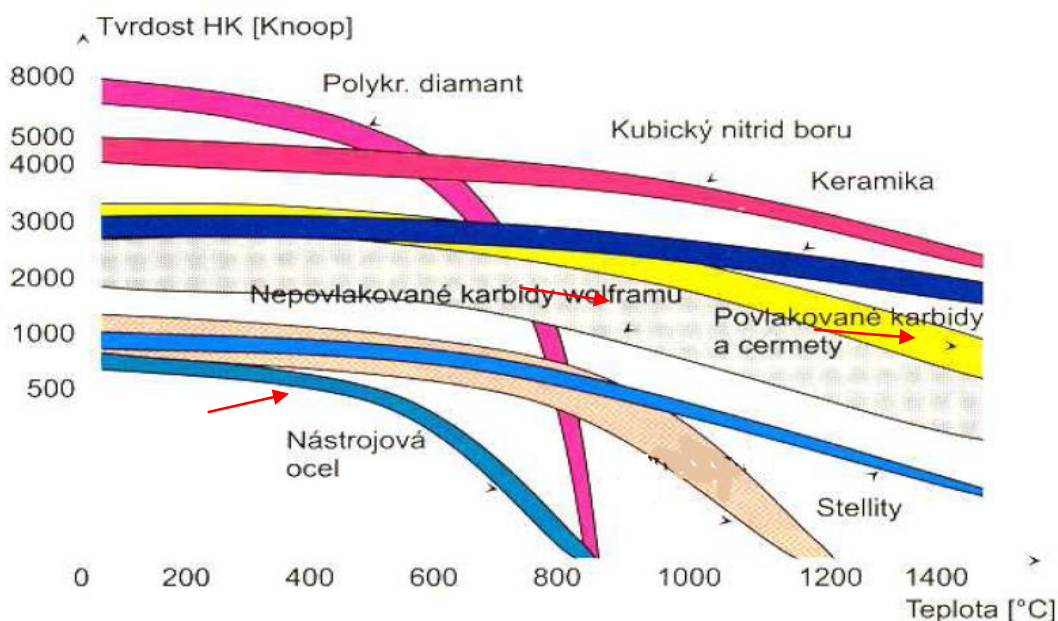
Tepelná vodivost klesá s narůstající teplotou, viz. obr.7 -2 a se zmenšováním zrn karbidické fáze. Nižší tepelná vodivost má zpravidla příznivý vliv na tepelné zatížení nástroje, jelikož teplo se více odvádí obrobkem, avšak může docházet k tvorbě tepelných trhlin. U obrábění materiálů s nízkou hodnotou tepelné vodivosti (austenitické oceli) může dojít k přehřívání obráběného materiálu. Přehřátí polotovaru může způsobit v místě řezu vyšší plastické deformace, které mají negativní vliv na integritu povrchu obrobku. Nižší tepelná vodivost má negativní vliv na odolnost proti vzniku tepelných trhlin. Při obrábění austenitické oceli je nezbytné dostatečné chlazení, aby nedošlo k přehřátí a degradaci obráběcího nástroje [5], [1].



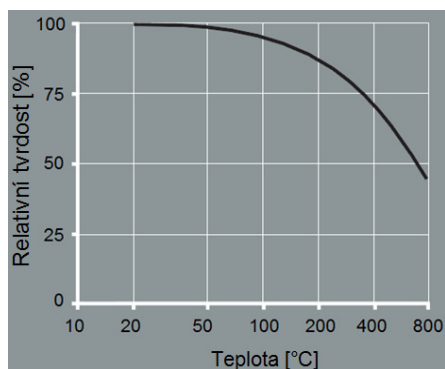
Obr. 7-2 Závislost tvrdosti a tepelné vodivosti na teplotě [1]

### 7.3. Tepelná degradace slinutých karbidů

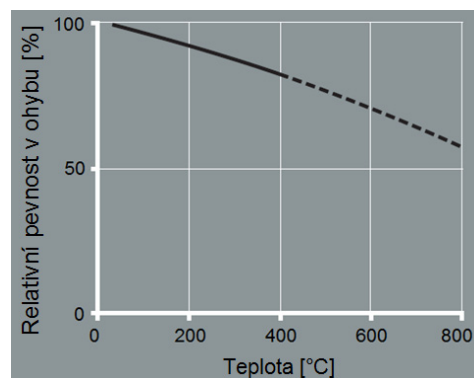
Při obrábění dochází k nárůstu teploty na čele a hřbetu nástroje až k 1300°C. Takto vysoká teplota způsobuje pokles mechanických hodnot SK (viz. obr. 7-3). Při teplotách nad cca. 1000°C dochází k degradaci substrátu, jelikož se naruší soudržnost pojiva a dochází k oxidaci karbidické fáze. SK patří mezi materiály s vysokou tepelnou stabilitou až k teplotám cca. 950°C. Mezi materiály s vyšší tepelnou stabilitou patří např. keramické materiály, kubický nitrid bóru, atd.. Řezné nástroje vyrobené z keramiky mají vysokou tvrdost i za vysokých teplot, jsou limitovány malou lomovou houževnatostí, což omezuje tyto nástroje v řadě obráběcích operací. Keramické nástroje se zpravidla nepoužívají pro hrubování, přerušované obrábění a obrábění např. austenitických ocelí. Tato ocel se v průběhu obrábění zpevňuje, a to může mít za následek vznik chvění nástroje popř. rázů.



Obr. 7-3 Vliv teploty na snížení tvrdosti řezných materiálů [1]



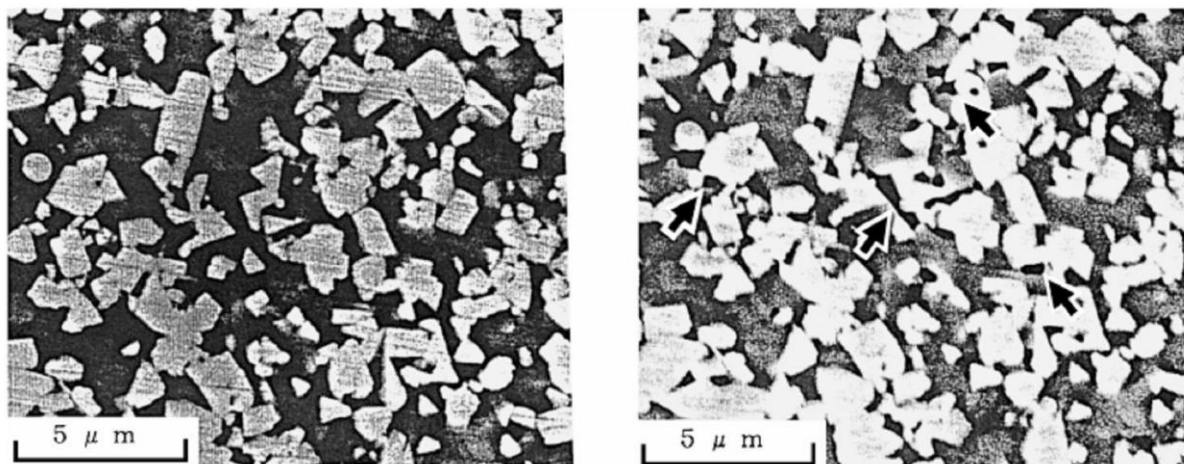
Obr. 7-4 Závislost tvrdosti na teplotě (5)



Obr. 7-5 Závislost pevnosti v ohybu na teplotě střední velikost zrna WC - 11%wt Co (5)

## 7.4. Tepelné trhliny

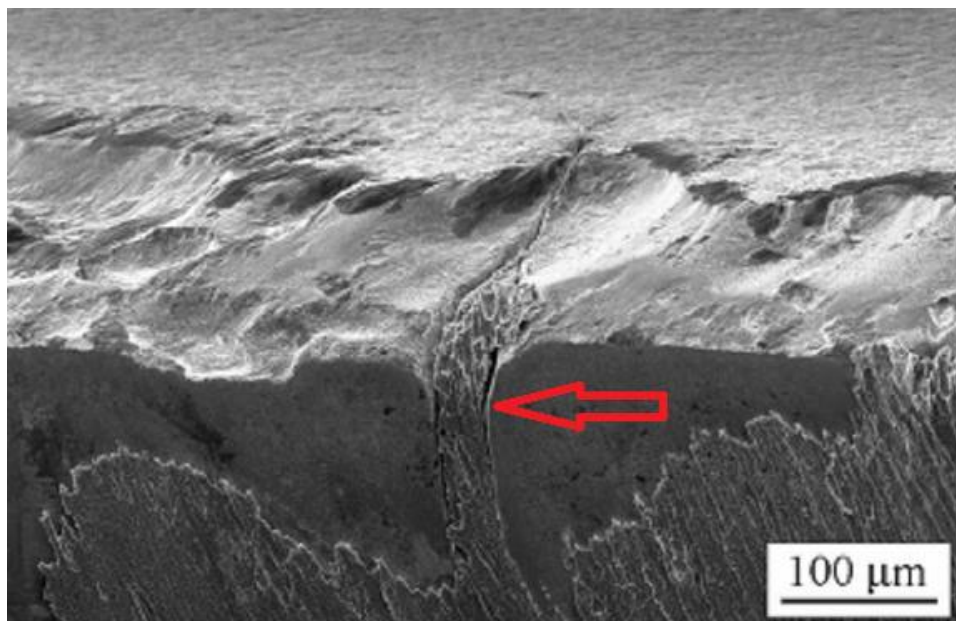
Tepelné trhliny, neboli hřebenovité trhliny, vznikají v SK vlivem přerušovaného řezu nástroje při vysokých řezných rychlostech. Trhliny vznikají vlivem střídavého rozpínání a stahování povrchových vrstev řezného nástroje. Tyto rozměrové dilatace jsou důsledkem prudkého zahřívání (odebírání třísky) a chlazení (mimo záběr břítu). Trhliny vznikají v celé škále řezných rychlostí, avšak nejvyšší výskyt trhlín je lokalizován zejména při vyšších řezných rychlostí v místech s nejvyšší teplotou. Tepelné trhliny se šíří v substrátu interkrystalicky a tudíž oddělují zrna karbidické fáze od pojivové fáze. Přerušením vazby mezi pojivem a karbidy může dojít k vydrolování substrátu a silnému otupení břítu nástroje. Na obr. 7-6 vlevo je mikrostruktura SK v neporušeném stavu a vpravo mikrostruktura poškozená tepelnými trhlinami mezi karbidy a kobaltem. Trhliny jsou označeny šipkami.



Obr. 7-6 Mikrostruktura SK bez tepelných trhlín (vlevo) a s tepelnými trhlinami (vpravo) [16]

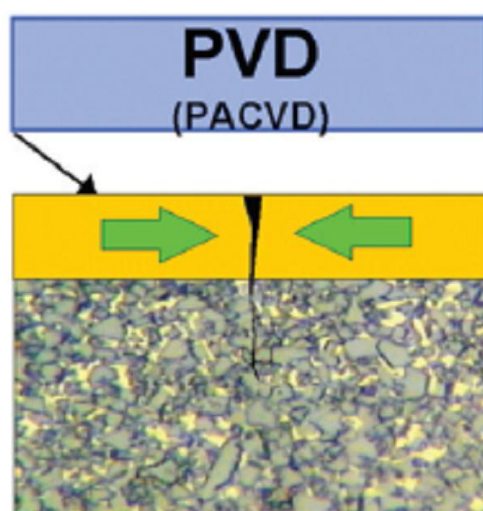
V počátku jsou vznikající trhliny úzké. Po dalších obráběcích operacích se vlivem tepelné dilatace rozevírají a jsou vyplňovány obráběným materiálem viz. obr. 7-7.





Obr. 7-7 Hřebenovité trhliny vyplněné obráběným materiálem [16]

Významný vliv na vznik a rozvoj tepelných trhlin mají také procesní kapaliny. Při obrábění s přerušováním řezu je výhodnější nepoužívat procesní kapaliny na vodní bázi. Tyto kapaliny mají vysoký chladicí účinek, který urychluje růst tepelných trhlin. Při obrábění bez přívodu procesní kapaliny se potlačuje vznik i vývoj tepelných trhlin. Obrábění bez přívodu procesní kapaliny obvykle není možné u vrtání hlubokých děr, kde je kapalina s vysokým tlakem nezbytná k odstranění třísek z místa řezu. Předcházet vzniku tepelných trhlin lze použitím houževnatějšího typu SK, např. TSM33 nebo MG18 od firmy CERATIZIT. Tyto SK mají velikost zrna od 0,5 do 0,8  $\mu\text{m}$  s 10% kobaltu. Zvýšit odolnost proti tvoření a šíření tepelných trhlin lze také depozicí vrstev na bázi PVD a PACVD, které jsou charakteristické vnitřním tlakovým napětím, které tak částečně uzavírá trhliny vzniklé tepelným a mechanickým namáháním viz. obr. 7-8 [16].



Obr. 7-8 Vnitřní napětí u metody PVD ovlivňuje charakter šíření trhlin [16]

## 7.5. Odolnost slinutých karbidů proti tepelným šokům (Thermal Shock Resistance)

Při obrábění s přívodem procesní kapaliny prakticky vždy vznikají tepelné šoky v povrchových vrstvách substrátu. Z tohoto důvodu se SK testují na odolnost proti tepelným šokům. Kreimer již v roce 1968 zjistil, že s rostoucím množstvím kobaltu ve SK roste odolnost vůči tepelným šokům. Rozhodují vliv na odolnost proti tepelným šokům má i počet fází ve SK. Jednofázové SK WC-Co mají vyšší odolnost proti tepelným šokům než dvou či tří fázové SK. Odolnost proti tepelnému namáhání lze spočítat dle vztahu (7-1) [17].

$$R = \sigma_m(1 - \nu)\lambda / \beta / E = [W / m] \quad (7-1)$$

- $\sigma_m$  [MPa] - pevnost v ohybu
- $\nu$  - Poissonova konstanta
- $\lambda$  [W/mK] - tepelná vodivost
- $\alpha$  [K<sup>-1</sup>] - koeficient tepelné roztažnosti
- $E$  [MPa] - Youngův modul

Složky slinutého karbidu hm%						Velikost zrna ( $\mu\text{m}$ )	Tvrdoost (Hv)	Odolnost proti tepelnému namáhání $R$ (W/m)	Odolnost proti tepelným šokům $\Delta T$ (K)
WC	TiC/ TiN	TaC	Mo <sub>2</sub> C Others	Co	Ni				
95.0	3.0	2.0	0	0	0	1-2	1930	1.8x(10) <sup>4</sup>	550
91.0	4.0	0	0	5.0	0	1-2	1670	3.7	550
93.5	0	0	0	6.5	0	1-2	1520	4.1	600
91.0	0	0	0	9.0	0	1-2	1300	4.8	800
92.0	0	0	0	8.0	0	3-7	1210	4.9	>900
87.5	0	0	0	12.5	0	3-7	1030	4.3	>900
91.5	3.0	1.0	0	4.5	0	1	1970	2.3	500
90.5	3.0	1.0	0	5.5	0	1	1870	2.2	500
78.5	5.0	10.0	0	6.5	0	1-2	1720	2.1	600
88.2	0	0	0.8	11.0	0	0.6	1560	4.3	700
83.0	0	2.0	0	15.0	0	1-2	1170	4.9	900
92.0	0	0	0	0	8.0	1-2	1390	3.8	700
80.0	1.0	1.0	2.0	0	15.0	1	1310	3.6	700
75.5	2.0	0.5	4.0	0	18.0	1	1290	3.3	600
20.0	46.0	6.0	12.0	0	16.0	1-2	1470	1.7	600

Tab. 7-1 Odolnost SK proti tepelným šokům podle složení [17]

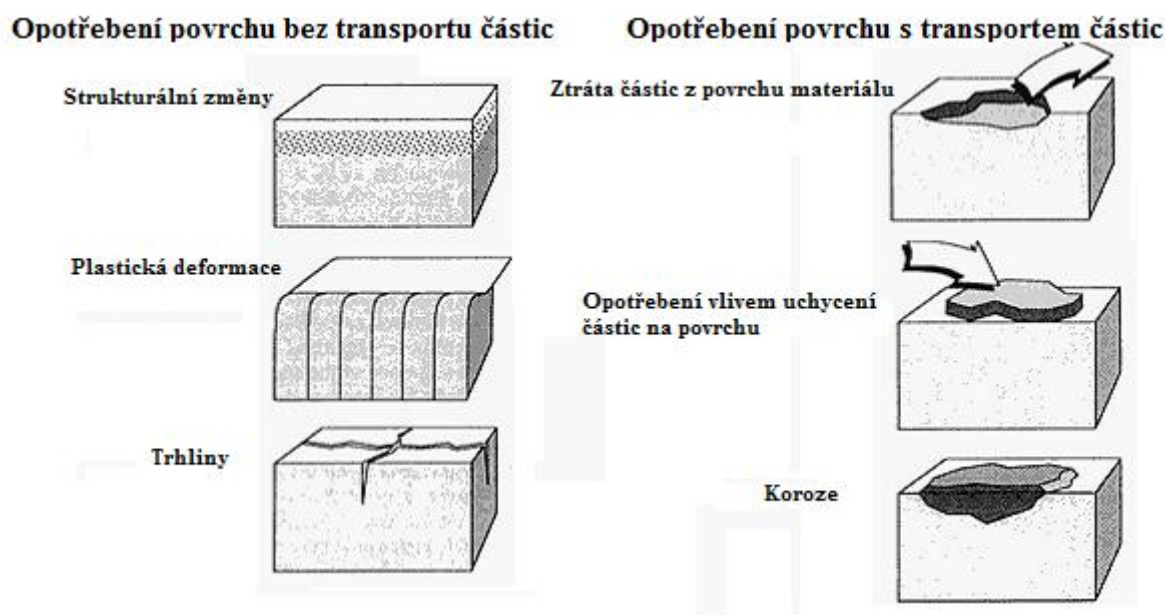
## 8. Opotřebení řezných nástrojů

Opotřebení má zásadní vliv na trvanlivost a spolehlivost řezných nástrojů. Zvýšené opotřebení obráběcího nástroje má negativní vliv na mnoho aspektů obráběcího procesu jako

např.: zvýšené zatížení obráběcího stroje, zhoršení rozměrové stálosti a povrchové jakosti, zvýšení teploty v místě řezu (tím dojde k tepelnému ovlivnění obráběného materiálu). Zvýšené opotřebení se obvykle projeví zvýšením řezného odporu, řezných sil, vyšší hlučností, vibracemi a rázy. Obecně lze říci, že opotřebení je procesem, při kterém dochází k odebrání či k přemístování částic z obráběného materiálu nebo obráběcího nástroje. Při tomto mechanickém ději mohou vznikat další doprovodné pochody: fyzikální, chemické, popř. elektrické. Opotřebení může způsobit i plastickou deformaci, změnu struktury a výskyt trhlin. Při těchto dějích nedochází k úbytku či transportu částic materiálu [5],[18].

Opotřebení obráběcího nástroje způsobují tyto faktory:

- mikroplastické deformace vzniklé zatlačením tvrdých částic do měkčího povrchu druhé součásti
- tvorba oxidů, která je podpořena mikroplastickou deformací a vysokou teplotou v místě řezu
- únava povrchových vrstev při cyklickém rázovém a tepelném namáháním
- změna struktury obráběcího nástroje a obráběného materiálu
- degradace substrátu



Obr. 8-1 Základní druhy opotřebení s a bez transportu částic materiálu [5]

Základní druhy opotřebení, které jsou uvedeny na obr. 8-1, vyvolávají vždy určitou změnu v povrchové vrstvě materiálu. Ne vždy musí vést poškození povrchové vrstvy k degradaci celé strojní součásti. Např. při omílání obráběcího nástroje je povrchová deformace zcela normální a má pozitivní dopad na integritu povrchu nástroje.

Jednotlivé druhy opotřebení se ve většině případů vyskytují současně. Za současného synergického efektu, který proces opotřebení mnohonásobně navyšuje, např. koroze za vysokých teplot, kde povrchová vrstva oxiduje a tím pádem je mnohonásobně náchylnější na erozivnímu opotřebení [5].

Při výskytu opotřebení na strojní součásti je velmi důležitá identifikace opotřebení, jelikož kvalitní a přesnou identifikaci se zjistí nejvýznamnější druh opotřebení, který má zásadní vliv na životnost strojní součásti. Díky identifikaci hlavního mechanismu opotřebení lze přímo

aplikovat takové ochranné prostředky, které sníží hlavní mechanismus opotřebení. Identifikaci opotřebení musí vždy provádět kvalifikovaný a zkušený pracovník, jelikož mnohdy se přeceňuje význam např. trhlin, které jsou velmi řídké rozmístěny na rovném povrchu řezného nástroje. Tento projev opotřebení nemusí být nejvýznamnější, a proto se musí zohlednit i další faktory (stav povrchu, drsnost, výskyt plastických deformací, úbytek či nárůstek materiálu, atd.) [5].

### 8.1. Poškození povrchu trhlinami

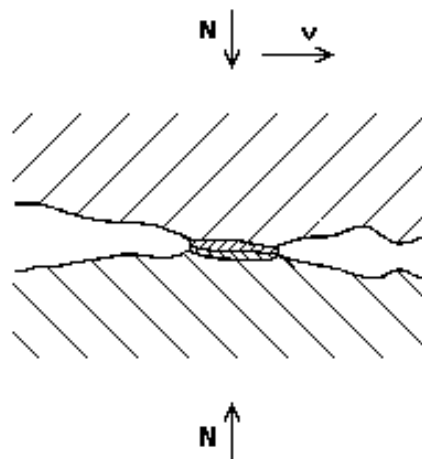
Trhliny se obvykle objevují u cyklicky namáhaných řezných nástrojů, ale mohou být vyvolány také kombinací tření a tepelných šoků. Nukleace trhlin vzniká za přítomnosti tahových napětí a křehkého povrchu nástroje. Směr šíření trhliny je při jednoosé napjatosti kolmý na směr hlavního tahového napětí. Nadměrné napětí způsobené třením způsobuje paralelní trhliny kolmé ke směru zatěžování [5].

### 8.2. Povrchové poškození s transportem částic materiálu

Mezi typy povrchového poškození s transportem částic materiálu patří: adhezivní, abrazivní, erozivní a korozní opotřebení. Při tomto porušení povrchu řezného nástroje dochází vždy k oddělení či připojení částic materiálu.

### 8.3. Povrchové poškození způsobené adhezivními silami

K adhezivnímu opotřebení dochází při pohybu drobných částic, které jsou vytrhávány z jednoho povrchu a jsou transportovány na povrch druhého. Vytrhávání částic z jednoho povrchu na druhý je způsobeno značnými meziatomovými silami, které se snaží jednotlivé povrchy spojit viz. obr. 8-2 [5].



Obr. 8-2 Základní mechanismus adhezivního opotřebení [26]

Na vznik adhezivního opotřebení má zásadní vliv hloubka, poloměr zakřivení mikronerovností, druh a velikost zatížení dotýkajících ploch, rychlost relativního pohybu stykových povrchů součástí, drsnost povrchu a odolnost daného typu povrchu na vytváření adhezivního spoje. Pro zmírnění adhezivního opotřebení se úspěšně používají mazací média, která vytváří mezi povrchy součásti tenký film, tenké vrstvy, pokovení a jiné úpravy povrchu. V praxi se hodnotí adhezivní opotřebení od mírného zadíraní až po intenzivní. Ve většině případů se při adhezivním opotřebení přenášejí částice z jednoho povrchu na druhý.



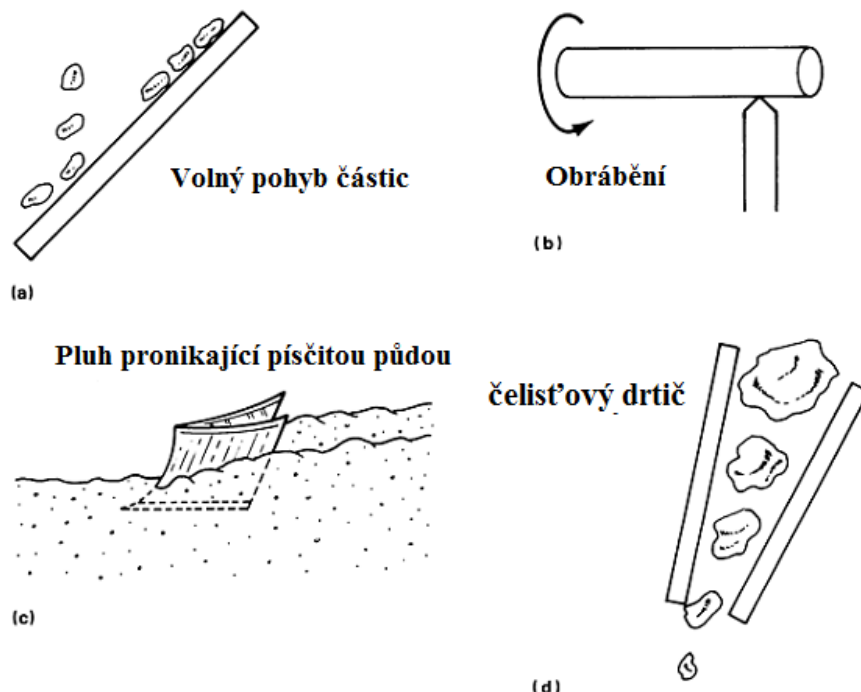
Hlavní vliv na transport částic má velká plastická deformace, která vzniká na povrchu součásti a způsobuje mnohdy zpevnění materiálu. Významný vliv na vznik adhezivních spojů má také vysoká teplota v místě dotyku obou ploch, která významně pomáhá plastické deformaci materiálu a tvorbě adhezivních mikrospojů [3].

U obrábění houževnatých a zpevňujících se materiálů (např. austenitické oceli) dochází k vysokému adhezivnímu opotřebení obráběcího nástroje. Vysoké adhezivní opotřebení je způsobeno vysokou plastickou deformací polotovaru a vysokou teplotou způsobenou špatnou tepelnou vodivostí austenitických ocelí. Tento problém se zpravidla řeší výběrem vhodné tenké vrstvy, která výrazně přispívá ke zlepšení adhezivní odolnosti nástroje a dostatečným přívodem procesní kapaliny.

### 8.3.1. Abrazivní opotřebení

K abrazivnímu opotřebení dochází při oddělování povrchových částic vlivem nerovného povrchu přitlačné plochy nebo volně pohybujícími částicemi z vyšší tvrdosti než styčných ploch stroj. součástí, přitlačné síle, délce kluzné plochy a na tvrdosti, velikosti a množství abrazivních částic [18].

Abrazivní opotřebení lze rozdělit dle kontaktu na dvoubodový a tříbodový dotek viz. obr. 9-3. Tyto kontakty se dělí dále na otevřené a uzavřené. Otevřený kontakt se nalézá tam, kde se abrazivní částice mohou pohybovat volně a nejsou nijak směřovány. Uzavřené kontakty vznikají tam, kde jsou abrazivní částice směřované a nemohou se volně pohybovat. Při testování strojních součástí na abrazivní otěr s otevřeným a uzavřeným typem bylo zjištěno, že při stejných parametrech zkoušek bylo docíleno takřka shodných opotřebení. U uzavřených typů opotřebení došlo zdánlivě k vyššímu opotřebení, které bylo způsobeno vyšším zatížením vlivem uzavřeného typu kontaktu. [5].



Obr. 8-3 Typy kontaktu při abrazivním opotřebení [18].

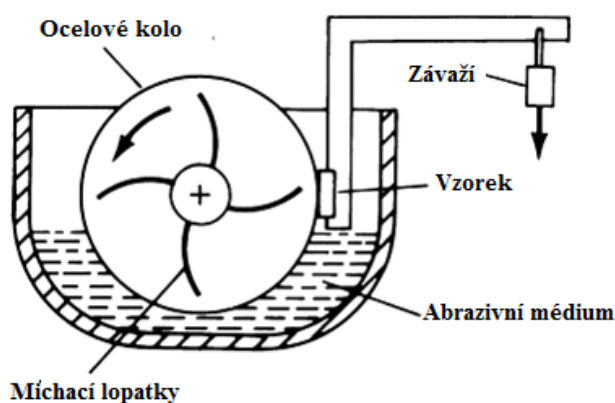
- a) dvoubodový kontakt - otevřený, b) dvoubodový kontakt uzavřený
- c) tříbodový kontakt - otevřený, d) tříbodový kontakt - uzavřený

Abrazivní odolnost je také často rozdělována podle velikosti napětí v abrazivních částicích na slabé napětí a vysoké napětí. Slabě namáhané částice se vyskytují např. u broušení dřeva smirkovým papírem, kde si abrazivní částice zachovávají svůj tvar i po broušení a nedochází u nich k výrazným změnám. Vysoce namáhané částice jsou např. v kulových mlýnech, kde mnohdy dochází k jejich destrukci v průběhu mletí. Vydírání částic je proces kdy se abrazivní částice rozdrťí a "vmáčknou" do povrchu strojní součásti, např. při rozdrťování hornin v čelistích drtiče [18].

### Abrazivní odolnost slinutých karbidů

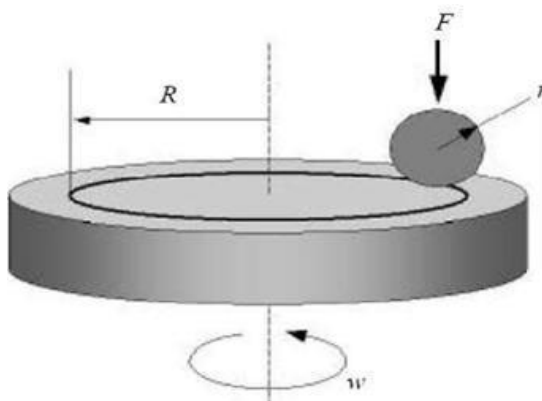
Obecně lze říci, že SK mají velmi dobrou odolnost proti otěru, což je dáno zejména 80 až 95% karbidické fáze, která dosahuje vysokých hodnot tvrdosti. Studie karbidů ukazuje, že abrazivní opotřebením zahrnuje zaoblování, fragmentaci, odhalování zrn WC a následné odtrhnutí měkkého pojiva (Co).

Pro zjištění otěruvzdornosti SK lze použít tzv. ASTM test B 611. Tento experiment je založen na principu úbytku objemu z testovaného vzorku. Zkoušený vzorek je přitlačován konstantní silou na rotující kotouč, který je ponořen v abrazivním médiu a koná určený počet otáček obr. 8-4 [18].



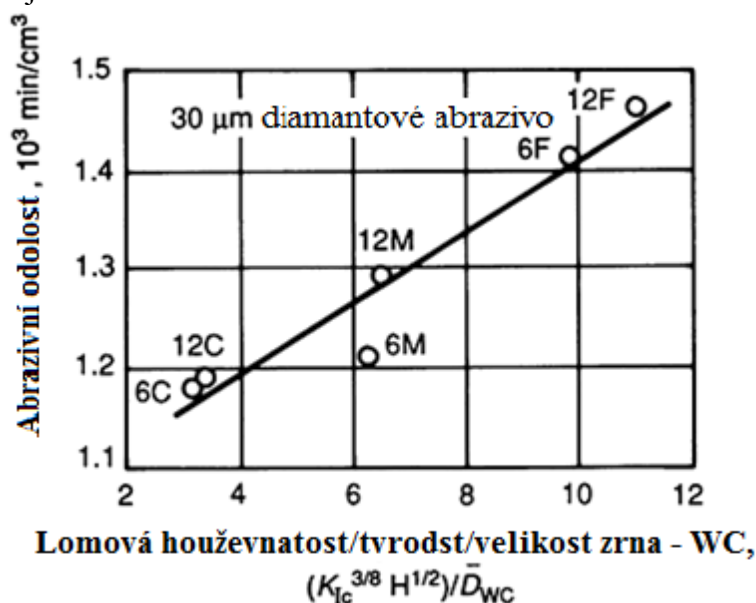
Obr. 8-4 Schématický náčrt zařízení pro zjišťování abrazivní odolnosti [18]

Pro zjištění otěruvzdornosti lze také použít metodu Pin-on-Disc, u které se vyhodnocuje jak úbytek objemu, tak stopa vytvořená pomocí cizího tělíska (pinu). Zkoušený vzorek koná rotační pohyb, na který je přitlačováno tělíska předem definovanou silou viz. obr. 8-5.



Obr. 8-5 Schématický náčrt zařízení Pin-on-Disc [19]

Obr. 8-6 zachycuje závislost otěruvzdornosti, tvrdosti a lomové houževnatosti na velikosti zrna a množství kobaltu. Čísla 6 a 12 představují procenta kobaltu ve SK. Písmena vyjadřují střední velikosti zrn karbidické fáze C - coarse (hrubé), M - medium (střední), F - fine (jemné). Z obr. 8-6 je patrné, že otěruvzdornost klesá se zvyšujícím se množstvím kobaltu a roste se snižující se velikostí zrna.



Obr. 8-6 Závislost otěruvzdornosti, tvrdosti a lomové houževnatosti na velikosti zrna a množství kobaltu [18]

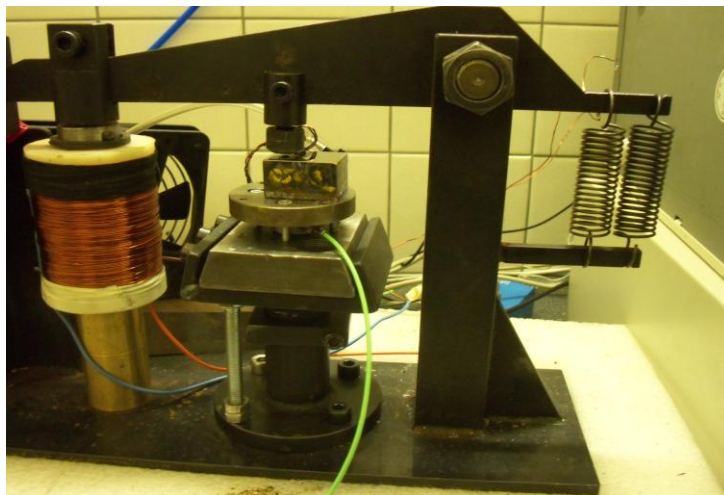
### Impact test

Impact test je nekonvenční metoda zkoumání povrchové odolnosti materiálu vůči rázovému namáhání.

Tato metoda je založena na opakovaném místním zatížení jedné lokality materiálu konstantní energií a frekvencí úderů. Jako indenter se nejčastěji používá karbidová kulička. Tímto vzniká tzv. impact kráter, který je podroben zkoumání. Rázové zatížení je jedno z nejméně příznivých a často se v praxi vyskytuje.

Odolnost proti rázovému zatížení lze teoreticky přesně jen velmi těžko postihnout, jelikož se jedná z hlediska materiálu o funkci tvrdosti, houževnatosti, tvařitelnosti atd. Rázové zatížení působí na materiál zejména Hertzovými tlaky, lokální plastickou deformací apod.

Výsledkem impact testu je tzv. impact kráter. Jeho vznik lze vysvětlit tím, že zatěžovaný materiál je již při prvních úderech podroben silnému lokálnímu plastickému přetvoření. Vzniká zde rychle impact kráter, který se relativně rychle rozšiřuje. Díky zpevnění se tento proces zastavuje a po vyčerpání pevnostních vlastností dojde k odloupení vrstvy a kráter se rozšíří. Lze tvrdit, že čím menší kráter vznikne při stejných podmínkách, tím lepších výsledků bude dosaženo. Toto tvrzení platí pouze při aplikacích, kde výrazně záleží na odolnosti proti opotřebení apod. V tomto případě impact test bude zřejmě simulovat vznik a rozvoj povrchového poškození, například pittingy na namáhaných površích [27].



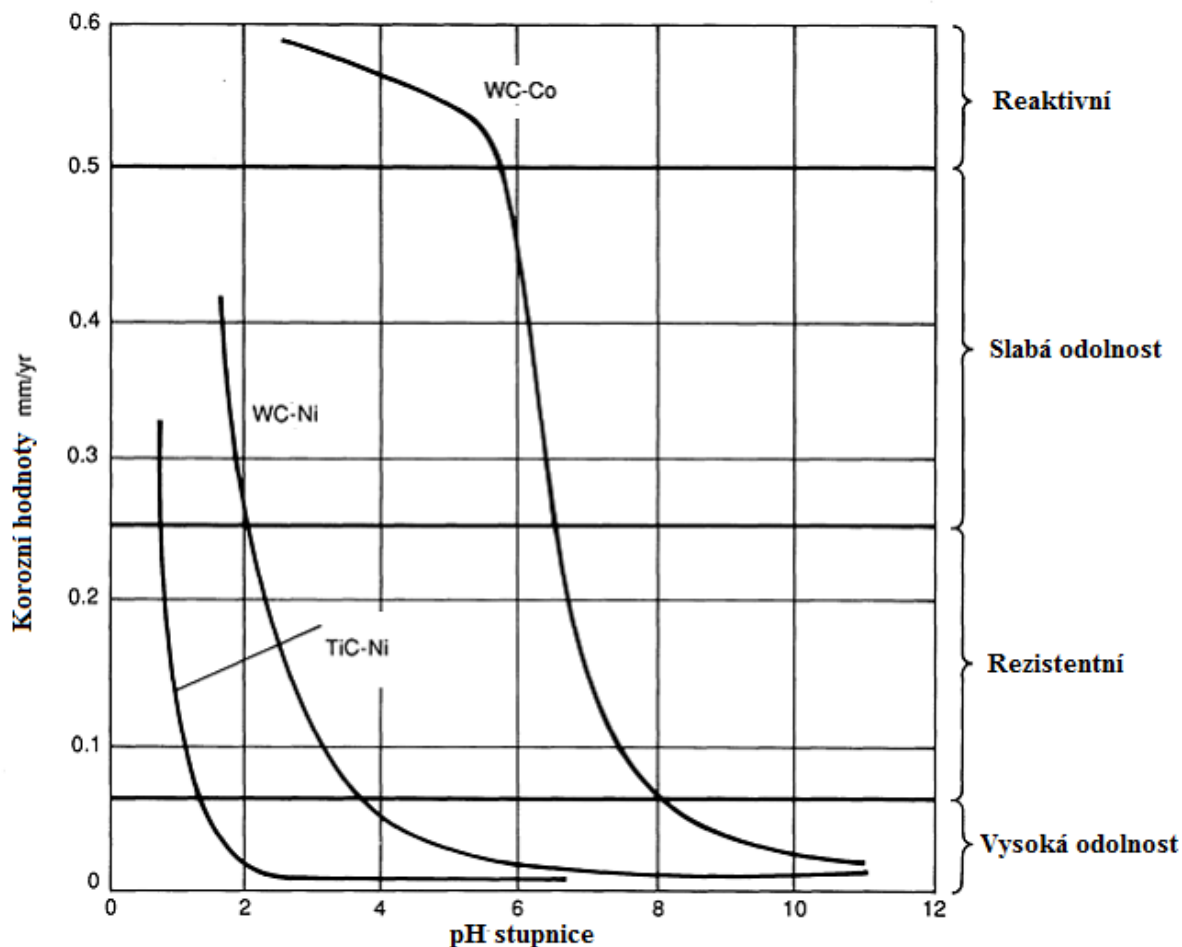
Obr. 8-7 Elektromagnetický impact tester (7)

#### **8.4. Erozivní odolnost**

Erozivní odolnost je důležitá v případech, kdy je SK v kontaktu s proudícím abrazivem např. trysky, pískovací hubice atd.. Erozivní odolnost je obdobně závislá na velikosti zrna a množství kobaltu jako u abrazivním namáhání, avšak ze zkoušek vyplývá, že velikost zrna není tak rozhodující jako v případě abrazivního namáhání [18].

#### **8.5. Odolnost proti korozi**

Nej slabší strukturní součástí z hlediska koroze je pojivo (Co, Ni). Obvykle odolává karbidická fáze (WC) (výjimkou jsou některé alkálie). Napadení korozi obvykle způsobuje rozpouštění kobaltové matrice, což má za následek křehkost a nekompaktnost celého SK. Obecně lze říci, že se zvyšujícím se množstvím kobaltu se snižuje korozní odolnost. Korozní odolnost SK lze zvýšit snížením množství pojící fáze, použitím Ni místo Co či dopování chromem a molybdenem [18].



Obr. 8-8 Korozní odolnost jednotlivých SK [18]

Procesní a chladicí kapaliny se při broušení SK volí zejména na bázi minerálních olejů, které nezpůsobují korozní účinky na SK a přispívají ke zlepšení jakosti povrchu obráběného plochy.

Testování korozní odolnosti se provádí ponořením vzorků do média o konstantní teplotě a pH na určitý čas. Poté se vzorky vyjmou a analyzují se třemi základními metodami:

- a) Metalografie - pomocí příčného výbrusu, při kterém se zkoumá hloubka nenarušené matrice
- b) Omílání - zde se využívá špatné soudržnosti SK vlivem korozních účinků media - zkoušený vzorek se zváží před a po omílání
- c) Atomová absorpční technika pro měření množství pojiva (kobaltu či niklu), který byl rozpuštěn v agresivním médiu.

## 9. Základní mechanické vlastnosti dvoufázových slinutých karbidů

Typ SK	Velikost zrna	Tvrdost HRA	Hustota g/cm <sup>3</sup>	Příčná pevnost		Pevnost v tlaku		Modul pružnosti		Relativní abrazivní (a) odolnost	Koefficient tepelné roztažnosti μ		Tepelná vodivost W/m · K
				MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10 <sup>8</sup> psi		at 200 °C (390 °F)	at 1000 °C (1830 °F)	
97WC-3Co	Medium	92.5-93.2	15.3	1590	230	5860	850	641	93	100	4.0	...	121
94WC-6Co	Fine	92.5-93.1	15.0	1790	260	5930	860	614	89	100	4.3	5.9	...
	Medium	91.7-92.2	15.0	2000	290	5450	790	648	94	58	4.3	5.4	100
	Coarse	90.5-91.5	15.0	2210	320	5170	750	641	93	25	4.3	5.6	121
90WC-10Co	Fine	90.7-91.3	14.6	3100	450	5170	750	620	90	22	...	...	...
	Coarse	87.4-88.2	14.5	2760	400	4000	580	552	80	7	5.2	...	112
84WC-16Co	Fine	89	13.9	3380	490	4070	590	524	76	5	...	...	...
	Coarse	86.0-87.5	13.9	2900	420	3860	560	524	76	5	5.8	7.0	88
75WC-	Medium	83-85	13.0	2550	370	3100	450	483	70	3	6.3	...	71

a) hodnota abrazivní odolnosti: 100 = nejlepší  
Tab. 9-1 Přehled základních vlastností SK [18]

### 9.1. Vliv velikosti zrna karbidické fáze slinutých karbidů na výrobu šroubovitého vrtáku

Velikost zrna karbidické fáze SK má velký vliv na výsledné mechanické i fyzikální vlastnosti. Velikostí zrna (od < 0,2 μm až do > 6 μm) lze měnit tvrdost, lomovou houževnatost, pevnost v ohybu, otěruvzdornost, žáruvzdornost, žárupevnost a další veličiny. Při výběru SK pro výrobu monolitního nástroje určeného pro obrábění materiálu je třeba dbát na obráběný materiál a na řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, plynulost řezu a chlazení). U obrábění austenitických ocelí je důležité si uvědomit několik faktorů :

- špatný odvod tepla z místa řezu
- tvorba nárůstku na ostří nástroje
- neplynulé odebrání třísky, které způsobuje rázy mezi obráběným materiálem a nástrojem
- velké adhezivní tření mezi obrobkem a nástrojem
- zpevňování austenitické oceli

Vhodným výběrem velikosti zrna lze zvýšit otěruvzdornost. Tento požadavek vedl k vývoji slinutých karbidů s velmi jemnými zrny. Tyto SK jsou označovány dle terminologie jako ultrafine. Na druhou stranu tepelné stability SK lze dosáhnout použitím hrubších zrn karbidické fáze (střední až vyšší velikosti zrn označovány dle terminologie - fine, medium). Tvrdost SK lze zvýšit použitím velmi jemných zrn - nano, ultra fine. Zvýšení hodnoty lomové houževnatosti lze dosáhnout kombinací hrubých a jemných zrn karbidické fáze.

Určení správné velikosti zrna prášku pro výrobu SK je pro danou aplikaci velmi složité, jelikož se musí zohlednit všechny uvedené faktory, které mají protichůdné požadavky. V průmyslové praxi se pro obrábění austenitické oceli používá submicronové SK s velikostí zrna (0,5 až 0,8 μm).

## **9.2. Vliv množství a druhu pojiva slinutých karbidů na výrobu šroubovitého vrtáku**

Velikost zrna a množství pojiva má zásadní vliv na výsledné vlastnosti SK. Přítomnost pojivé fáze neboli pojiva je důležité a nezbytné pro zajištění dostatečných mechanických a fyzikálních vlastností. Základní dva typy pojiva jsou nikl a kobalt, přičemž pro výrobu obráběcích nástrojů se používá zejména kobalt, jelikož má lepší smáčivost (viz. kapitola 2.1.). Pomocí regulace množství pojiva ve SK lze zvýšit mez pevnosti v ohybu, tvrdost, lomovou houževnatost, korozivzdornost a otěruvzdornost. S vyšším obsahem pojiva se zvyšuje lomová houževnatost, odolnost proti rázům a vrubová houževnatost. S nižším obsahem kobaltu roste tvrdost a otěruvzdornost.

Pro obrábění austenitické oceli se doporučuje použít spíše houževnatější typ SK a to především kvůli zpevňujícím účinkům austenitické oceli. Zvýšení hodnoty houževnatosti se docílí zvýšením množství pojiva (kobaltu). Doporučené množství kobaltu ve slinutých karbidech je 10 až 15%.

## **10. Recyklace slinutých karbidů**

V současnosti se klade velký důraz na ekologii a ochranu životního prostředí. Tento trend se objevil i ve výrobě obráběcích nástrojů, a to zejména u nástrojů ze SK. V současné době prakticky všichni výrobci SK (CERATIZIT, Sandvik, Pramet, GUHRING, atd.) nabízí odkup použitých a opotřebovaných nástrojů ze SK. Způsob recyklace by měl být ekologicky šetrný a je přísně kontrolován příslušnými institucemi.

Při recyklaci SK se získává zejména wolfram, kobalt a tantal. Recyklovaný wolfram tvoří 30% celkové spotřeby wolframu na světě. Kobalt a tantal jsou oproti wolframu málo zastoupenými prvky ve SK, ale jejich cena je několika násobně vyšší a tak se vyplatí i tyto prvky recyklovat. Na obr. 10-1 je uvedeno spotřebované množství kovů k výrobě SK za rok a zásoby surovin pro jejich výrobu včetně oblastí, kde probíhá jejich těžba.

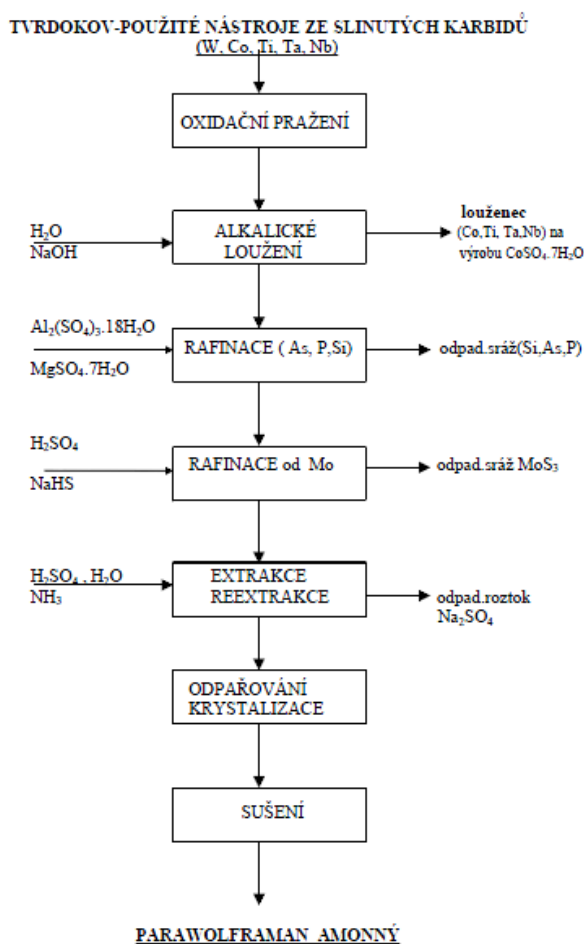
Technologie recyklace SK lze rozčlenit na přímé s fyzikální podstatou (Zn - proces, Coldstream - proces) a nepřímé, které jsou založeny na oxidaci a následném chemickém zpracování produktů oxidace [20]. Procesy lze také rozdělit na suché a mokré přepracování. Suché či mokré přepracování se volí s ohledem na typ SK a na požadovanou čistotu výsledných složek. Speciálně vybraná a tříděná skupina odpadů se obvykle recykluje pomocí již uvedeného procesu Zn - procesem. Zhruba 65 % zbylých karbidů se recykluje nepřímo pomocí alkalických látek. Výsledný roztok je podroben rafinaci a filtraci od nečistot, který je následně podroben extrakci a konverzi na wolfram amonný. Celý proces je velmi energeticky náročný a spotřebovává velké množství vody. Voda se spotřebovává na promývání a tím pádem produkuje značné množství odpadních vod obsahujících síran sodný [20].

Současný trend moderních zařízení využívá odpařovacích jednotek pro zahuštění odpadních vod s následnou krystalizací síranu sodného viz. obr. 10-2.



Kov	Zásoby surovin			Roční spotřeba	Oblasti s hl. množstvím zásob surovin
	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup> YEARS		
W	50 - 130			42	46% P.R. CHINA
Mo	80 - 105			105	46% USA
Ti	>10 <sup>4</sup>			30	
Ta	67			1.5	84% ZAIRE
Nb	>10 <sup>3</sup>			8	72% BRAZIL
V	10 <sup>3</sup>			10	76% S. AFRICA
Co	120			30	46% ZAIRE
Ni	85 - 105			930	45% OCEANIA
Suroviny pro výrobu slinutých karbidů					

Obr. 10-1 Suroviny pro výrobu SK a jejich spotřeba [17]



Obr. 10-2 Technologie recyklace SK - alkalický způsob [20]

Alternativní technologií recyklace SK je oxidační proces tzv. HMZ - proces. Metoda HMZ byla vyvinuta v sedmdesátých letech v podniku RD Jeseník, kde se uplatňovala zejména pro recyklaci vrtných nástrojů používaných v dolech, tak odpadních surovin z podniku Pramet Šumperk. Koncem osmdesátých let se přesunula recyklace SK do

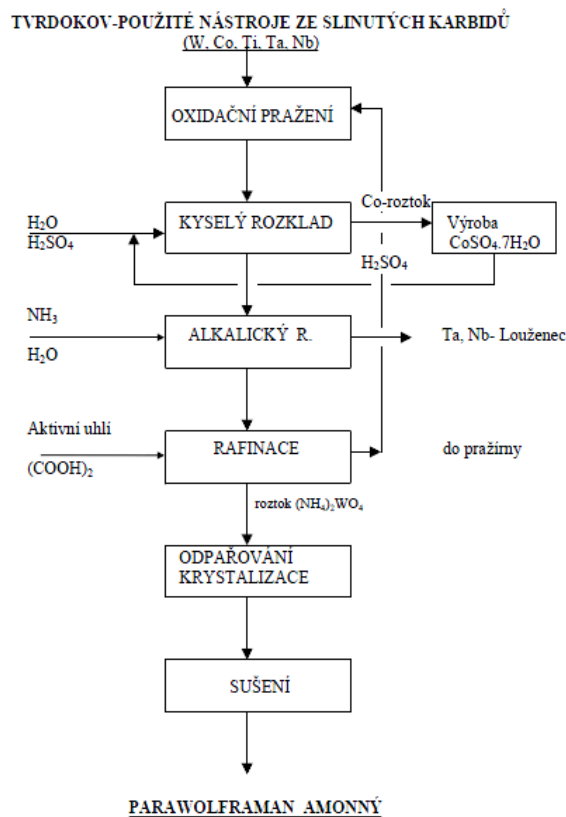


hydrometalurgického závodu RD Bruntál. V současné době se v této firmě stále provádí recyklace SK, avšak s modernější technologií a větší kapacitou linky [20].

Tento proces spočívá v pražení SK v oxidačním prostředí a následnému exponování oxidačního pražce v kyselém prostředí. Následuje rafinace roztoků síranu kobaltnatého a wolframanu amonného až do krystalických produktů. Tato technologie je ekologičtější, jelikož produkuje nižší procento odpadu. Moderní HMZ technologie používá místo kyseliny chlorovodíkové, která se používala pro loužení, kyselinu sírovou. Díky kyselině sírové lze proces loužení provádět za atmosférické tlaku při vyšší teplotě. Rozkladem kyseliny sírové vznikne síran kobaltnatý s vysokou čistotou. Změna kyseliny se pozitivně projevila v životnosti celého zařízení včetně olověného reaktoru. Modernizace se týkala také v optimalizaci recirkulace matečné kyseliny sírové po krystalizaci síranu kobaltnatého heptahydrátu [20].

Podstata HMZ procesu zůstala až na drobné úpravy zachována do současné doby. Odpadní SK jsou zpracovávány v různých formách a velikostech: pevné (Hard scrap), drobné (Soft scrap), jemné (prach a kaly). Technologie oxidačního pražení probíhá v řízených retortových pecích nepřímou vyhříváním plynovými hořáky.

Modernizace se projevila zvýšením výnosů a čistoty wolframu, tantalu, niobu, atd., díky lepší rafinaci louženého roztoku. HMZ proces je oproti alkalickému procesu jednodušší, avšak má řadu nedostatků: vlivem kyselého rozpouštědla ( $H_2SO_4$ ) dochází k vyššímu opotřebením reaktoru, což má za následek vyšší nárok na materiál reaktoru. Procesem nelze vygenerovat takovou chemickou čistotu prvků jako při použití extrakci či iontové výměny. Při použití alkalického rozpouštědla zůstává v roztoku množství vázaného wolframu, který snižuje celkovou výnosnost recyklace [20].



Obr. 10-3 Technologie recyklace SK-odpadů (HMZ-proces) [20]

Kyselý rozklad - kontinuální		Alkalický rozklad- vsádkový	
Teplota média pracovní	135°C	Teplota média pracovní	90 – 110°C
Teplota média max.	140°C	Tlak	0,25 MPa
Čas reakce	4 - 6 hod	Čas reakce	1 - 4 hod
Poměr fází kapalná/ pevné	1,5 : 1	Koncentrace NH <sub>3</sub>	110 g/l
Koncentrace H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	60%		

Tab. 10-1 Základní hodnoty kyselého a alkalického rozkladu SK [20]

V současné době se standardně používají recyklované SK k výrobě SK. Suroviny z recyklovaných SK prochází množstvím čistících a třídících procesů, které zaručují stejné vlastnosti jako panenské suroviny. Většina výrobců standardně přidává prášky vyrobené z vratu do panenských prášků. Výrobci obvykle neodlišují, zdali byl roubík vyroben z panenských surovin či z recyklovatelného vratu. Zákazník prakticky nikdy neví, zdali zakoupený roubík je z recyklovaných SK nebo z panenských surovin.

## 11. Závěr teoretické části

Slinuté karbidy patří mezi materiály, které lze velmi dobře přizpůsobovat různým strojírenským aplikacím, které vyžadují vysokou tvrdost a otěruvzdornost. Rešeršní část této diplomové práce se zaměřila na použití slinutých karbidů pro výrobu řezných nástrojů, které zaujímají dominantní postavení. Slinutý karbid patří mezi kompozitní materiály, které mohou mít velmi odlišné mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti, a proto bylo v této práci velmi stručně popsáno, jaké typy SK existují a z jakých složek se skládají. Řezný nástroj konkrétně monolitní vrták, který se používá pro vrtání austenitické oceli, musí odolávat mnohým typům namáháním a dalším vlivům, které při řezné operaci na nástroj působí.

Před navržením slinutého karbidu na monolitní vrták, bylo nezbytné seznámit se s komplexním procesem vrtání do austenitických ocelí. Vrtání patří mezi bezrázovité řezné operace, kde jsou řezné síly konstantní, avšak při vrtání austenitické oceli dochází vlivem zpevňování austenitické oceli k dynamickému rázům na substrát nástroje.

Kromě dynamického rázovitého zatížení vrtáku je problém i s odvodem tepla z místa řezu. Jelikož je při obrábění cca. 70% tepla odváděno prostřednictvím třísky a pak v případě vrtání je operace odvádění třísky velmi problematická. Při vrtání austenitických ocelí je odvod tepla z místa řezu ještě nižší, a proto se teplo přenáší do nástroje a do obrobku. Proto je nezbytně nutné použití konstrukci vrtáku s vnitřním chlazením.

Pro výrobu monolitního vrtáku ze SK, který je určen pro vrtání děr 8d, se používají nejhouževnatější typů SK. Tyto typy SK mají vysoký obsah Co, cca.10% a mají středně velká karbidická zrna (submicron - fine, 0,5 - 1μm). Tyto parametry splňují např. TSM33 od firmy CERATIZIT, který má průměrnou velikost zrn 0.5 až 0.9μm, dosahuje tvrdost 1590 HV a hodnotu součinitele lomové houževnatosti  $K_{Ic}$  9,4 MPa\*m<sup>1/2</sup>. Další houževnatý typ SK je AF K40UF od firmy Arno friedrichs carbide, který má průměrnou velikost zrn 0.6 μm a dosahuje tvrdost 1610 HV. Pro zvýšení otěruvzdornosti, tvrdosti a teplotní stability vrtáku se vždy používají tenké vrstvy různých druhů, které zvyšují produktivitu a výkonnost nástroje.

## 12. Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zabývá zkoušením osmi typů slinutých karbidů, které mají rozdílné vlastnosti. Jednotlivé zkoušky mají za úkol ověřit vlastnosti SK, které uvádí výrobce SK a vzájemně tyto vlastnosti porovnat a vyhodnotit jejich přednosti a zápory.

## 13. Druhy testovaných slinutých karbidů

Pro testování bylo vybráno osm typů SK od firem CERATIZIT (CTS18D, SM33, MG18, TSM20, TSF22, CTS20D a MG12) a Arno friedrichs carbide (Af UK40 UF - UK40). Výběr slinutých karbidů byl zaměřen zejména na houževnatější typy SK, jelikož tato diplomová práce je zaměřena na použití SK pro výrobu monolitních nástrojů (vrtáku či fréz), u kterých nelze použít extrémně tvrdé a křehké typy SK pro jejich nízké hodnoty  $K_{Ic}$ . Všechny SK byly testovány na ověření tvrdosti HV, zjištění  $K_{Ic}$  pomocí indentační metody, dokumentace mikrostruktury a zjištění velikosti zrna.

U vybraných SK byly provedeny testy lomové houževnatosti pomocí lomové mechaniky a cyklického tepelného zatěžování. Slinuté karbidy TSM33 a CTS20D byly testovány podrobněji, jelikož TSM33 se často používá pro výrobu speciálních monolitních nástrojů. CTS20D byl rovněž podrobněji testován, protože má v nedaleké budoucnosti nahradit stávající TSM33 a má dosahovat příznivějších mechanických vlastností než TSM33.

Sorta slinutého karbidu	Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ]	Pojivo - Cobalt [%]	Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	HV10	HV	HRA	TRS [MPa]	$K_{Ic}$ [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]
CTS18D	0,5 - 0,8	9	14,55	1610	1590	91,9	3600	10,4
TSM33	0,5 - 0,8	10	14,5	1610	1590	91,9	3700	9,4
MG18	0,5 - 0,8	10	14,45	1680	1660	92,3	3700	9,4
TSM20	0,5 - 0,8	7,5	14,75	1750	1720	92,6	3500	8,6
TSF22	0,2 - 0,5	8,2	14,55	1970	1930	93,7	4400	7,5
CTS20D	0,7	10	-	-	1600	-	4000	10,4
MG12	0,5 - 0,8	6	14,8	1820	1790	93	3500	8,2
Af UK40 UF (UK40)	0,6	10	14,5	-	1610	91,9	4000	10,5

Tab. 13-1 Základní přehled testovaných SK a jejich základní vlastnosti [1,2]

## 14. Použité přístrojové vybavení

Pro jednotlivé testy byla použita zkušební zařízení, na kterých bylo provedeno testování SK.

**Vickersův tvrdoměr**



Obr. 14-1 Vickersův tvrdoměr

**Světelný mikroskop**



Obr. 14-2 Světelný mikroskop od firmy ZEISS

**Řádkovací elektronový mikroskop**



Obr. 14-3 Řádkovací elektronový mikroskop  
od firmy philips

**Tepelný cyklický simulátor  
(Thermal cycle simulator)**



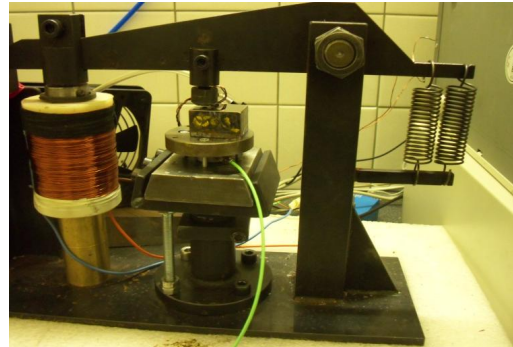
Obr. 14-4 Thermal cycle simulator od firmy od  
SMITWELD

### Zkušební trhací stroj



Obr. 14-5 Zkušební stroj ZWICK Z 250

### Impact tester



Obr. 14-6 Elektromagnetický impact tester

### Rezonanční stroj



Obr. 14-7 Rezonanční stroj RUMUL

## 15. Měření tvrdosti podle Vickerse

Tvrдость patří mezi základní mechanické vlastnosti SK, která charakterizuje odolnost daného typu SK proti vniku cizího tělesa. Stanovení tvrdosti SK dle Vickerse je normalizováno, normou ČSN EN 23878. Díky tvrdosti lze přibližně charakterizovat velikost zrn karbidické fáze, jestliže je známo chemické složení. Hodnota tvrdosti má zásadní vliv na odolnost proti abrazivnímu či erozivnímu opotřebení. Čím je hodnota tvrdosti vyšší, tím je zpravidla odolnost proti opotřebení vyšší.

Měření tvrdosti dle Vickerse patří mezi statické zkoušky, kde do materiálu vniká čtyřboký jehlan o síle 294,2 N. Ze vzniklého vtisku se příslušným vztahem spočítá hodnota tvrdosti HV.

### 15.1. Požadavky na zkušební těleso

Při výrobě a přípravě vzorků či plochy na zkušebním tělese je nezbytné dbát na následující zásady a doporučení, aby došlo k co nejmenšímu zkreslení výsledků.

- 1) Tloušťka zkoušeného tělesa nesmí být menší než 1 mm a celková plocha pro tři vtisky by neměla být menší než 4x3 mm.
- 2) Povrch zkušební tělesa nesmí obsahovat cizí tělesa, mastnotu a musí být vyleštěn na drsnost  $Ra \leq 0,5$ .

- 3) Příprava povrchu zkušebního tělesa se musí provést tak, aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění vlastností SK, zejména pak k tepelnému, popř. změny rozložení strukturních fází (kobalt). Při broušení SK musí být přiváděna procesní kapalina, která zajišťuje dostatečné chlazení povrchu SK.
- 4) Povrch zkušebního tělesa musí být rovný a indentor musí působit kolmo na povrch zkušebního tělesa.
- 5) Broušení vzorků na metalografických bruskách je velmi obtížná a časově náročná činnost. Doporučuje se proto připravit broušený povrch na průmyslových bruskách s minimálním úběrem třísky při intenzivním chlazením.
- 6) Po vyleštění povrchu 3  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  zrn leštící pasty je doporučeno vzorky vyžítat 3 hodiny při teplotě 300°C, ideálně v ochranné atmosféře helia či argonu.

Pro testování 8 typů SK byly použity válcové vzorky z roubíků o průměrech 13 mm - 18 mm a o minimální tloušťce 5 mm. Vzorky byly leštěny 3  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  diamantovými zrny v předem zhotovené suspenzi. Po vyleštění byly vzorky tři hodiny žihány při teplotě 300°C.



Obr. 15-1 Vzorky pro test tvrdosti HV

## 15.2. Postup při měření tvrdosti HV

Před samotným provedením testu je důležité přesvědčit se, zdali je indentor v pořádku, a jestli nejeví známky poškození. Po kontrole indentoru se nastaví na tvrdoměru zatížení 294,2 N a vzorek se pevně umístí na pracovní stůl pod indentor, přičemž je důležité, aby povrch zkušební vzorku byl kolmý k ose indentoru. V průběhu zatěžování nesmí dojít k posunu vzorku. Zatěžování indentorem musí být plynulé a bez rázů. Doba zatěžování od nuly až do maximální hodnoty zatížení musí být od dvou do osmi sekund. Doba maximálního zatížení je v rozmezí deseti až patnácti sekund. Na každém vzorku bylo provedeno pět vtisků, přičemž vzdálenost vtisků od sebe byla minimálně 2,5 násobek průměrné velikosti úhlopříček. Vtisky s odchylkou úhlopříček více jak 1 % nebyly započítány do celkové hodnoty HV[3].

## 15.3. Vyhodnocení výsledku

- 1) Z naměřené délky úhlopříček  $d_1$  a  $d_2$  se spočte aritmetický průměr úhlopříček  $d$ .

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (15-1)$$

- 2) Hodnotu  $d$  v milimetrech vložíme do vztahu pro výpočet tvrdosti dle Vickerse.



$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} = \frac{294,2N}{\dots \text{mm}^2} = \dots \text{HV30} \quad (15-2)$$

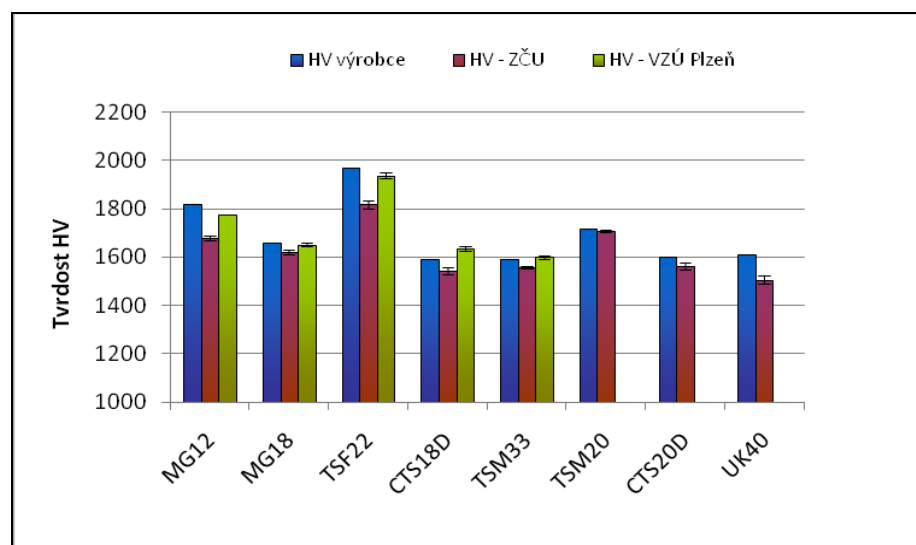
- HV - tvrdost podle Vickerse  
 F [N] - kušební zatížení v  
 α - vrcholový úhel vnikacího tělesa (jehlanu); α = 136°

#### 15.4. Výsledné hodnoty tvrdosti HV u slinutých karbidů

Měření tvrdostí HV bylo provedeno ve VZÚ Plzeň s.r.o. a na ZČU/KMM. Hodnoty tvrdosti byly porovnány v tab. 15-1.

	Hodnoty HV od výrobce	Průměrné hodnoty HV - ZČU	Průměrné hodnoty HV - VZÚ Plzeň
MG12	1820	1681 ±9,8	1776 ±0
MG18	1660	1620 ±10,7	1652 ±9
TSF22	1970	1818 ±18,1	1937 ±11,5
CTS18D	1590	1543 ±16,2	1634 ±9
TSM33	1590	1558 ±6,5	1600 ±8,5
TSM20	1720	1708 ±4,7	
CTS20D	1600	1562 ±13	
UK40	1610	1507 ±18,7	

Tab. 15-1 Hodnoty tvrdosti HV



Obr. 15-1 Porovnání tvrdostí jednotlivých SK na pracovištích kde probíhalo měření

Z tab. 15-1 a obr. 15-1 vyplývá, že hodnoty uvedené výrobcem jsou vyšší oproti naměřeným jak na ZČU tak ve VZÚ. Hodnoty naměřené na ZČU byly hodnoceny z pěti

vtisků a na VZÚ ze dvou vtisků. Nejvyšší tvrdost byla naměřena na ZČU - 1818 HV a ve VZÚ - 1937 HV u TSF22. Slinutý karbid TSF22 patří mezi ultrajemné SK, které dosahují vyšších tvrdostí než u submikronických SK. Nejnižší tvrdost byla naměřena u slinutého karbidu UK40 o hodnotě 1507 HV. Tvrdost SK TSM33 a CTS20D se liší pouze o 4 HV, a proto lze konstatovat, že mají stejnou hodnotu tvrdosti cca. 1560HV.

## 16. Měření lomové houževnatosti indentační metodou

Lomová houževnatost patří mezi velice důležité vlastnosti u všech materiálů. Její význam je ještě důležitější u křehkých materiálů, kam slinuté karbidy patří. Lomová houževnatost popisuje odolnost materiálu proti šíření trhliny v tělese. Indentační metoda stanovení lomové houževnatosti nepatří mezi přesné a zcela relevantní metody zjišťování lomové houževnatosti, avšak při dodržování stejného postupu provedení testu na všech typech testovaných SK, lze docílit poměrně relevantních výsledků. Výsledek testu může ovlivnit mnoho faktorů jako např. integrita povrchu zkušební tělesa, doba zatěžování vzorku indentorem, opotřebení indentoru, samotné měření úhlopříček vtisku, délek trhlín a použitý matematický model.

Nejpodstatnější důvod, proč se provádí indentační měření lomové houževnatosti je finanční nákladnost testu, jelikož cena indentačního testu je několika násobně nižší než klasická lomová mechanika.

Testování SK indentační metodou je normalizováno pouze pro jeden typ matematické modelu dle Palmqvista ČSN ISO 28079 [4].

### 16.1. Požadavky na zkušební těleso

Požadavky na zkušební těleso jsou stejné jako při měření tvrdost HV (viz. kapitola 15.1.).

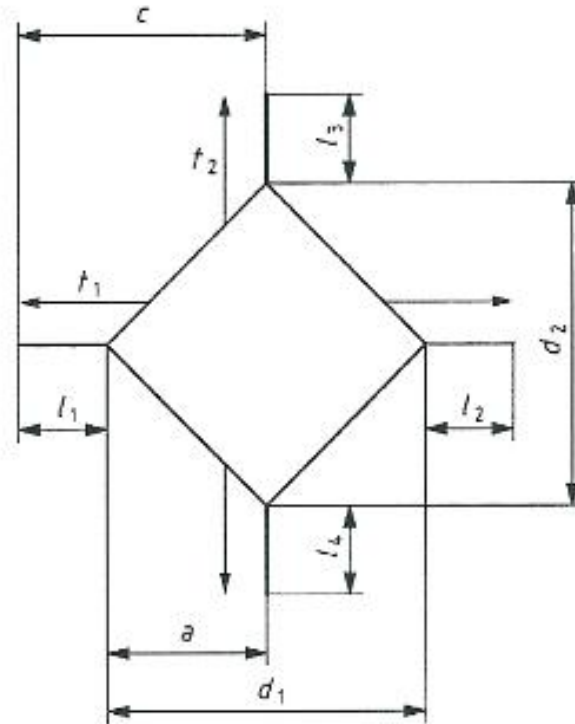
### 16.2. Postup provedení zkoušky

Součástí testu je stanovení tvrdosti HV (viz. kapitola 2). Pro zhotovení vtisků a změření tvrdosti HV se postupuje následujícím způsobem:

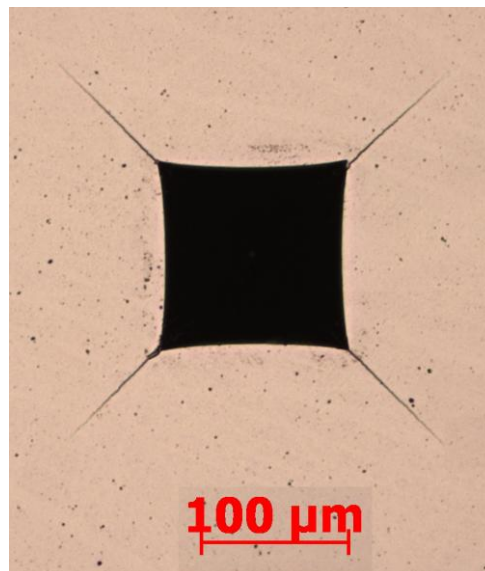
1. Zkoušený vzorek se umístí na pohyblivý stolek mikroskopu, aby povrch vzorku s vtiskem byl kolmý k ose okuláru.
2. Měření délek trhlín by mělo být prováděno při minimálním zvětšení 500x.
3. Měření délek trhlín se provádí pomocí fotografie trhlín s příslušným měřítkem nebo obrazovou analýzou.
4. Existují dva způsoby měření délek trhlín, které lze použít dle Palmqvista a dalších.
  - a) U trhlín se měří vzdálenost od čela k čelu v obou diagonálních směrech. Celková délka trhlíny je sumou obou těchto hodnot, od které se odečte součet úhlopříček vtisku viz. obr. 17-1.



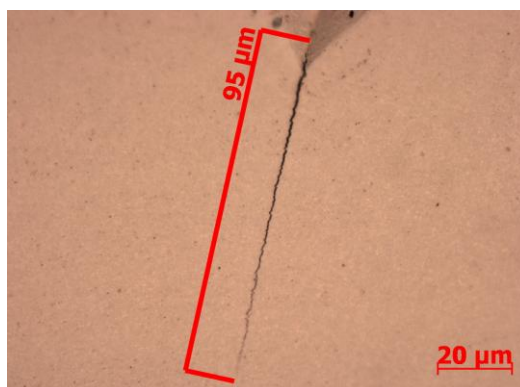
- b) U jednotlivých trhlin, které vycházejí z rohů vtisku, se změní jejich délka k čelům. Součet jednotlivých délek trhlin tvoří sumu celkové délky trhlin. Jestliže trhlinka nevychází přímo z rohu vtisku a je iniciována uvnitř vtisku, měří se od centra iniciace.



Obr. 16-1 Schematický diagram vtiskových charakteristik podle Palmqvista [13]



Obr. 16-2 Reálný vtisk na vzorku TSM 20



Obr. 16-3 Délka trhliny iniciována Vickersovým indentorem při zvětšení 500x na vzorku TSM20

### 16.3. Výsledné hodnoty

Z naměřených hodnot tvrdostí a délek trhlin byly vyhodnoceny pouze vtisky, u kterých se délky úhlopříček vtisku nelišily o více jak 1% a délky jednotlivých trhlin lišící se o 20%. Délky trhlin byly měřeny pouze na povrchu od rozpoznávaného počátku až do konce trhliny viz. obr. 16-3. Součet všech délek trhlin včetně hodnot tvrdosti HV byly dosazeny do vztahů viz. kapitola souhrn matematických modelů, z kterých byla vyhotovena tab. 16-1. Z tab. 16-1 vyplývá, že nejvyšších hodnot lomové houževnatosti dosahuje SK TSM33, i když podle údajů od výrobce mají mít nejvyšší lomovou houževnatost SK UK40, CTS18D a CTS20D. Nejnižší lomová houževnatost byla naměřena u TSF22. Tento karbid má nejmenší lomovou houževnatost i podle údajů od výrobce. Vzorek TSF22 má nejjemnější zrna karbidické fáze z testovaných SK.

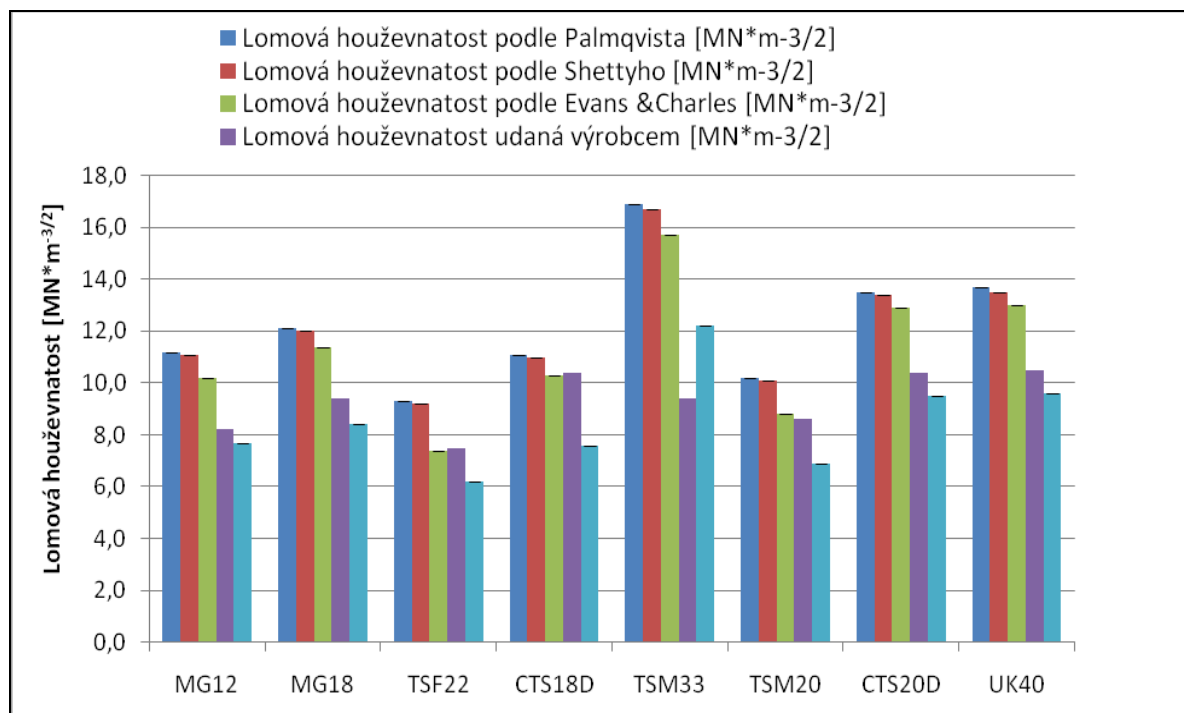
	Houževnatost podle Palmqvista [N*mm <sup>-1</sup> ]	Lomová houževnatost podle Palmqvista [MN*m <sup>-3/2</sup> ]	Lomová houževnatost podle Shettyho [MN*m <sup>-3/2</sup> ]	Lomová houževnatost podle Evans & Charles [MN*m <sup>-3/2</sup> ]	Optimalizovaná lomová houževnatost podle Shettyho [MN*m <sup>-3/2</sup> ]	Lomová houževnatost udaná výrobce [MN*m <sup>-3/2</sup> ]
MG12	959,3 ±79,01	11,2 ±0,45	11,1 ±0,45	10,2 ±0,56	7,7 ±0,35	8,2
MG18	1152,3 ±10,52	12,1 ±0,06	12,0 ±0,06	11,4 ±0,07	8,4 ±0,05	9,4
TSF22	609,4 ±38,51	9,3 ±0,32	9,2 ±0,32	7,4 ±0,42	6,2 ±0,24	7,5
CTS18D	1018,7 ±59,60	11,1 ±0,33	11,0 ±0,33	10,3 ±0,39	7,6 ±0,26	10,4
TSM33	2326,1 ±19,50	16,9 ±0,13	16,7 ±0,13	15,7 ±0,12	12,2 ±0,10	9,4
TSM20	777,1 ±27,62	10,2 ±0,18	10,1 ±0,18	8,8 ±0,24	6,9 ±0,14	8,6
CTS20D	1493,9 ±102,91	13,5 ±0,46	13,4 ±0,45	12,9 ±0,45	9,5 ±0,36	10,4
UK40	1580,5 ±147,80	13,7 ±0,71	13,5 ±0,71	13,0 ±0,68	9,6 ±0,55	10,5

Tab. 16-1 Výsledné hodnoty  $K_{Ic}$  včetně směrodatných odchylek

Z obr. 16-4 je patrné, že nejvyšší rozdíl mezi naměřenou lomovou houževnatostí a udávanou výrobcem je u SK TSM33, který má submicronickou velikost zrn (0,5-0,8μm)

a obsahuje 10% kobaltu. Tento karbid byl dále testován klasickou lomovou mechanikou pro ověření hodnoty  $K_{Ic}$ . Pro zpřesnění hodnot lomové houževnatosti indentační metodou byl optimalizován Shettyho vztah viz. (16-1).

$$K_{Ic} = 0,150449 * \left( \frac{HV_{30}}{(\sum L)^{1,13}} \right)^{1/2} = [MN / m^{3/2}] \quad (16-1)$$



Obr. 16-4 Porovnání lomové houževnatosti indentační metodou pro různé výpočtové modely

#### 16.4. Porovnání výpočtových modelů pro TSM33

Slinutý karbid TSM33 byl jediný testován lomovou mechanikou, a proto ho lze brát jako etalon pro porovnání hodnot lomové houževnatosti, které vyšly na základě výpočtových modelů indentační lomové houževnatosti.

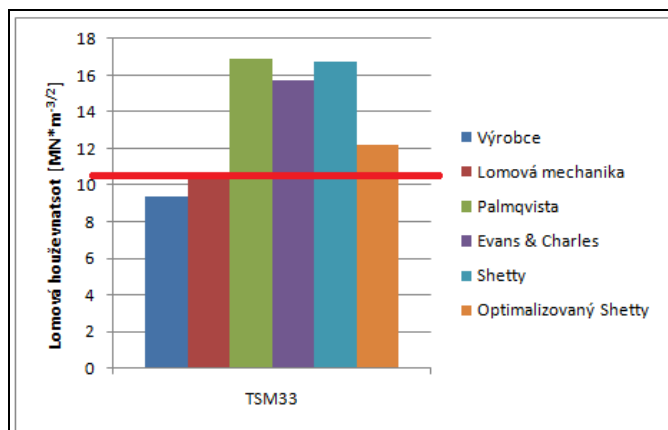
Hodnota lomové houževnatosti TSM33 lomovou mechanikou je  $10,47 \pm 0,12 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ . Z tab. 16-1 a obr. 16-4 je patrné, že hodnoty indentační lomové houževnatosti jsou o cca. 54 - 60% vyšší, než hodnoty lomové mechaniky. Proto bylo rozhodnuto optimalizovat výpočtový model. Pro optimalizaci výpočtového modelu byl vybrán model podle Shettyho, jelikož je jednoduchý a nejvíce používaný ve společnosti PRAMET s.r.o.

Optimalizace spočívala ve výběru vhodné mocniny celkové sumy délek viz. vztah (16-1). Po výběru vhodného exponentu následovalo porovnání hodnot lomové houževnatosti u ostatních SK. Po porovnání a korekci byla mocnina celkové sumy stanovena na hodnotu 1,13.

Použitím optimalizovaného Shettyho vztahu došlo k průměrnému zpřesnění u TSM33 o více jak 20%. U ostatních SK nelze přesně říci k jakému zpřesnění došlo, jelikož nejsou k dispozici etalonové hodnoty lomové houževnatosti z lomové mechaniky.

Lomová houževnatost [ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ ]						
Označení vzorku	Katalogová hodnota	Lomová mechanika	Palmqvista	Evans & Charles	Shetty	Optimalizovaný Shetty
TSM33	9,4	10,47±0,12	16,9±0,13	15,7±0,12	16,7±0,13	12,2±0,10

Tab. 16-2 Hodnoty lomové houževnatosti TSM33



Obr. 16-5 Hodnoty lomové houževnatosti TSM33

Budeli se brát etalonová hodnota lomové houževnatosti udávaná výrobcem, tak bylo dosaženo optimalizováním Shettyho modelu zpřesnění i zneřesnění viz. tab.16-3. Nejvyššího zpřesnění bylo dosaženo u TSM33. Největší zneřesnění bylo u CTS18D viz. tab. 16-3.

	Průměrná hodnota lomové houževnatosti podle Palmqvista, Evans & Charles a Shettyho [ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ ]	Optimalizovaná lomová houževnatost podle Shettyho [ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ ]	Lomová houževnatost udaná výrobcem [ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ ]	Zpřesnění/ Zneřesnění [%] vůči $K_{Ic}$ výrobce
MG12	10,8	7,7	8,2	18
MG18	11,8	8,4	9,4	10
TSF22	8,6	6,2	7,5	4
CTS18D	10,8	7,6	10,4	23
TSM33	16,4	12,2	9,4	20
TSM20	9,7	6,9	8,6	9
CTS20D	13,3	9,5	10,4	13
UK40	13,4	9,6	10,5	13

Tab. 16-3 Zpřesnění výsledků lomové houževnatosti indentační metodou

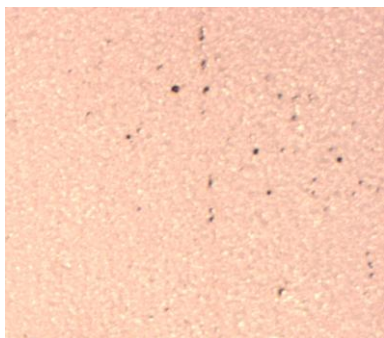
Z uvedené tab. 16-3 vyplývá, že zpřesnění bylo dosaženo zejména u houževnatějších typů SK, kde zpřesnění bylo více jak 10 %. Výjimku tvořil slinutý karbid CTS18D, u kterého došlo k zneřesnění, i když patří mezi houževnaté SK.

## 17. Tepelné zatěžování slinutých karbidů

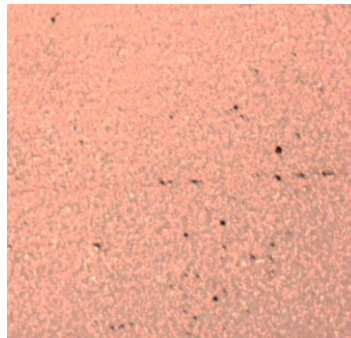
Tepelné zatěžování SK bylo zařazeno mezi testy pro stanovení odolnosti SK proti tepelným šokům. Jelikož při obrábění dochází mnohdy k náhlým změnám teploty substrátu a tím k možnému vzniku trhlin či jiných defektů na povrchu nástroje. SK byly testovány dvěma způsoby. První způsob testování spočíval v pozvolném ohřevu SK a rychlém ochlazení pod tekoucí vodou o teplotě 15°C.

Druhý způsob testování byl použit pouze u SK TSM33 a CTS20D. Testování spočívalo v cyklickém tepelném zatěžování na principu elektricky odporového ohřevu vzorků. Maximální teplota ohřevu  $T_{max} = 450^{\circ}\text{C}$  byla zvolena na základě rešeršní části, kde bylo zjištěno, že testované SK by měly být do teploty 500°C stabilní. Rovněž při krátkodobém ohřevu na teplotě 450°C nedochází k výrazné oxidaci a tím k degradaci povrchu SK.

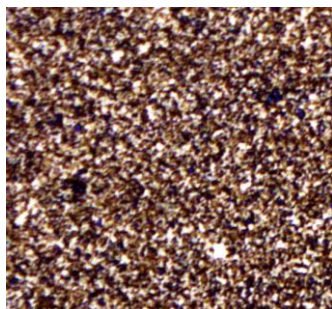
Pro zjištění teplot kdy dochází k výrazné oxidaci, byl proveden jednoduchý experiment, který spočíval v postupném ohřívání vzorků na teploty 450°C, 650°C a 700°C bez ochranné atmosféry s výdrží na teplotě po dobu 20 min. Po každém ohřátí vzorku na požadovanou teplotu byl povrch vzorku podroben vizuálnímu a mikroskopickému pozorování. Na obr. 17-1, 17-2, 17-3, 17-4 lze pozorovat vývoj oxidace povrchu SK TSM33. Při teplotě 450°C nedocházelo k patrné oxidaci. S rostoucí teplotou nad 650°C dochází již k výrazné oxidaci a narušení integrity povrchu. Při teplotě 750°C jsou již patrné výrazné defekty a deformace povrchu viz. obr. 17-4. Z rešeršních poznatků a výsledků tohoto experimentu bylo rozhodnuto použít teplotu pro zatěžování vzorků 450°C.



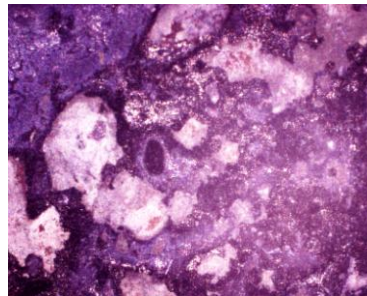
Obr. 17-1 Povrch vzorku TSM33 při 200x zvětšení  
200x zvětšení - bez ohřevu



Obr. 17-2 Povrch vzorku TSM33  
- při ohřevu na 450°C

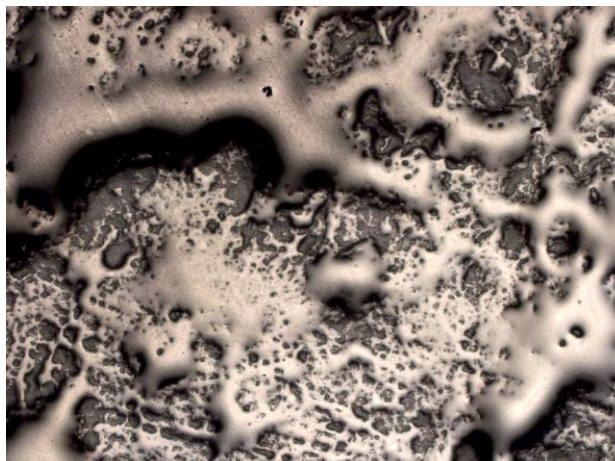


Obr. 17-3 Povrch vzorku TSM33 při 200x  
zvětšení při ohřevu na 650°C



Obr. 17-4 Povrch vzorku TSM33 při 25x  
při ohřevu na 750°C





Obr. 17-5 Povrch vzorku TSM33 při 25x zvětšení - při ohřevu na 750°C po odleštění oxidické vrstvy

## 18. Pozvolné ohřívání a rychlé ochlazení vzorků pod tekoucí vodou

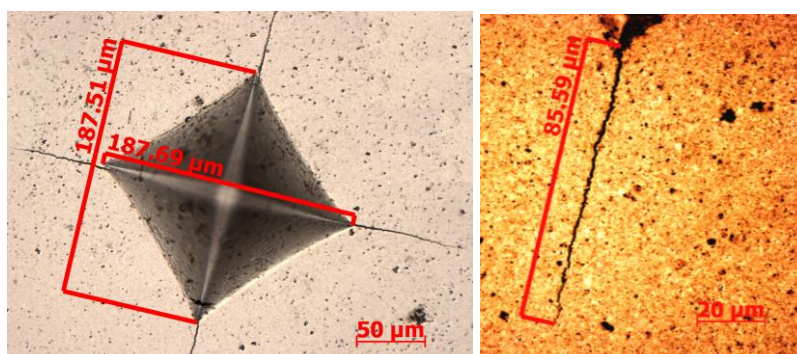
Tento test spočíval v pozvolném ohřevu vzorků v elektrické odporové peci na teplotu 450°C a poté v prudkém ochlazení pod tekoucí vodou o teplotě 15°C. Na takto tepelně ovlivněných vzorcích bylo provedeno měření tvrdosti HV a lomové houževnatosti indentační metodou.

### 18.1. Požadavky na zkušební těleso

Zkušební tělesa byla použita z předchozích měření lomové houževnatosti indentační metodou. Viz. měření  $K_{Ic}$  indentační metodou (kapitola 16.).

### 18.2. Postup provedení zkoušky

Označená zkušební tělesa SK se vložila do studené elektrické pece. Ohřev v peci byl rovnoměrný až na teplotu 450°C, poté při teplotě 450°C následovala deseti minutová prodleva, aby došlo k prohřátí celého objemu vzorku. Po prohřátí vzorku byly vzorky z pece vyjmuty a prudce ochlazeny pod tekoucí vodou o teplotě 15°C. Na takto tepelně zatížených vzorcích byly provedeny testy tvrdosti HV a měření  $K_{Ic}$  indentační metodou.



Obr.18-1 Ukázka vtisků Vickersovým indentorem a změření délky trhliny u CTS20D

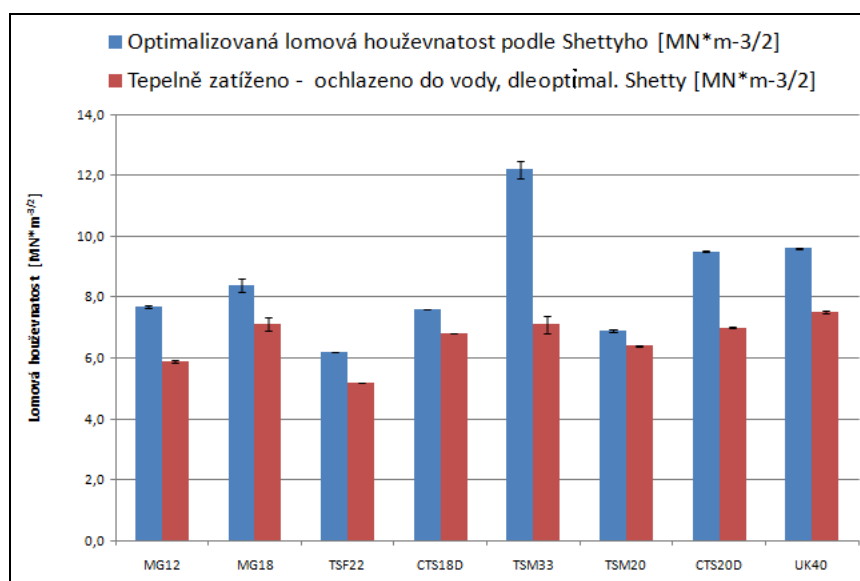
### 18.3. Výsledné hodnoty

Výsledné hodnoty tvrdosti HV a  $K_{Ic}$  vypočtené dle optimalizovaného Shettyho vztahu jsou uvedeny v tab. 18-1. Z tab. 18-1 vyplývá, že hodnota tvrdosti zůstala téměř konstantní. Výjimkou byl slinitý karbid TSF22, kde hodnota tvrdosti klesla o 100 jednotek HV.

	Průměrné hodnoty tvrdosti HV po tepelném zatížení - ochlazení do vody	Průměrné hodnoty HV - ZČU	Optimalizovaná lomová houževnatost podle Shettyho $[MN^*m^{-3/2}]$	Tepelně zatíženo - ochlazení do vody, podle optimal. Shetty $[MN^*m^{-3/2}]$
MG12	1676 ±7,40	1681 ±9,81	7,7 ±0,4	5,9 ±0,04
MG18	1573 ±8,70	1620 ±10,74	8,4 ±0,05	7,1 ±0,22
TSF22	1704 ±3,02	1818 ±18,10	6,2 ±0,24	5,20 ±0
CTS18D	1563 ±1,78	1543 ±16,26	7,6 ±0,26	6,80 ±0
TSM33	1517 ±17,11	1558 ±6,50	12,2 ±0,10	7,1 ±0,29
TSM20	1713 ±1,90	1708 ±4,70	6,9 ±0,14	6,40 ±0,04
CTS20D	1582 ±0,72	1562 ±130	9,5 ±0,36	7,00 ±0,02
UK40	1501 ±1,40	1507 ±18,75	9,6 ±0,55	7,50 ±0,04

Tab. 18-1 Hodnoty tvrdosti a indentační lomové houževnatosti po tepelném námáhání

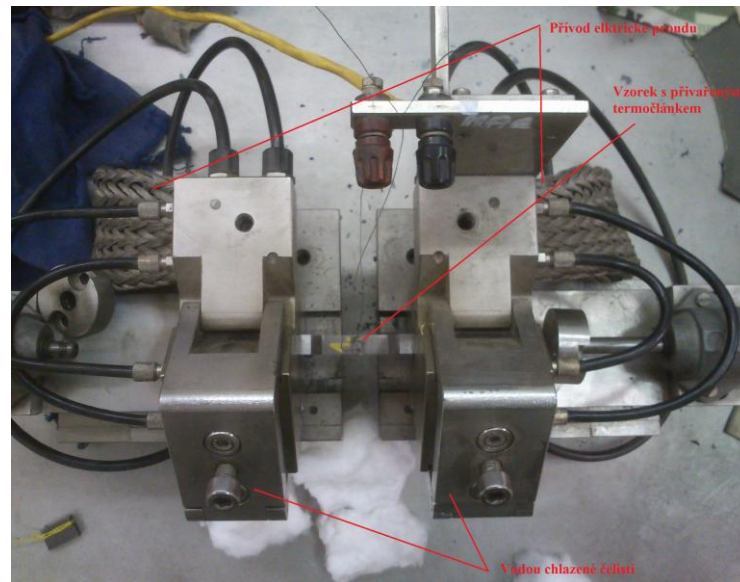
Z obr. 18-1 vyplývá, že hodnoty  $K_{Ic}$  klesly v průměru o 20% původní  $K_{Ic}$ . Nejvyšší pokles je u TSM33, kde hodnota klesla o cca. 40%. Takto velký pokles  $K_{Ic}$  lze odůvodnit samotným tepelným šokem, při kterém došlo k poklesu  $K_{Ic}$  a dále nepřesnostmi při měření lomové houževnatosti.



Obr. 18-1 Lomová houževnatost po tepelném námáhání a ochlazením ve vodě

## 19. Cyklické tepelné zatěžování slinutých karbidů

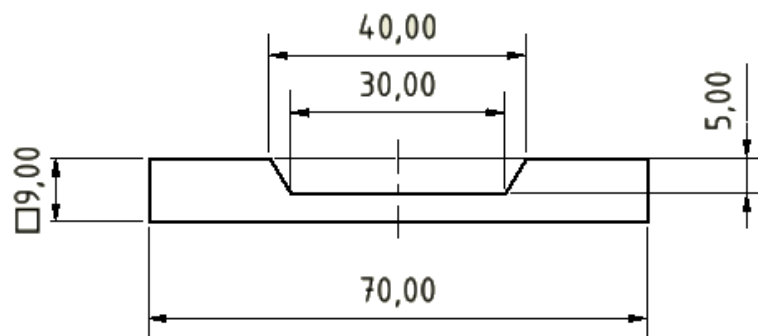
Cyklické tepelné zatěžování bylo prováděno na speciálním stroji značky SMITWELD na pracovišti VZÚ Plzeň. Pracovní stroj SMITWELD se používá pro tepelné namáhání kovových materiálů v předem nadefinovaných cyklech ohřevu a chlazení. Stroj využívá k ohřevu elektrický odpor zkušebních vzorků a k chlazení tepelnou vodivost vzorku s vodou chlazenými čelistmi. Testovány byly dva typy slinutých karbidů TSM33 a CTS20D. Na tepelně namáhaných SK byly provedeny testy tvrdosti HV, indentační  $K_{IC}$  a impact test.



Obr. 19-1 Pracovní část zkušebního stroje SMITWELD

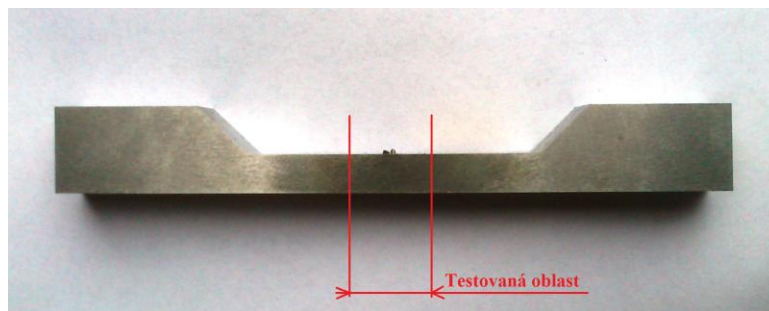
### 19.1. Požadavky na zkušební těleso

Zkušební tělesa byla vyrobena z válcového roubíku o průměru 13mm a délky 330mm. Zkušební tělesa byla navržena s vybráním uprostřed pro zvýšení rychlosti ohřevu v testované oblasti. Strana o rozměrech 9mm x 70mm byla vyleštěna pro zahlázení stop po broušení a zlepšení jakosti povrchu. Z každého SK byly vyrobeny dva kusy zkušebních těles.



Obr. 19-2 Výkres vzorku pro tepelném zatěžování





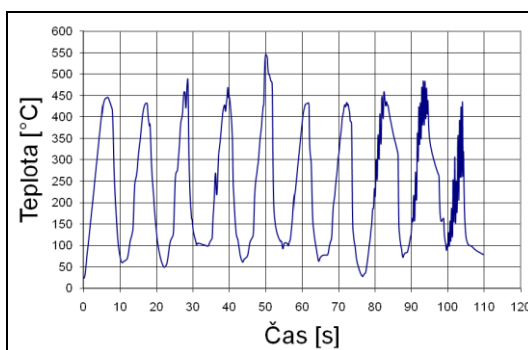
Obr. 19-3 Zkušební těleso k cyklickému tepelnému zatěžování s označením testované oblasti

## 19.2. Postup provedení zkoušky

Před samotným tepelným zatěžováním byly provedeny na vzorcích TSM33 a CTS20D kontrolní testy k zjištění  $K_{Ic}$  indentační metodou a měření tvrdostí HV. Poté byla nadefinována první varianta průběhu zatěžování viz. tab. 19-1.

Cyklování s prudkým chlazením vodou	
$T_{min}$	40 - 50°C
$T_{max}$	440 - 450°C
Průměrná rychlost ohřevu	80°C/sec
Průměrná rychlost chlazení	80°C/sec
Počet cyklů	10

Tab. 19-1 První varianta tepelného zatěžování



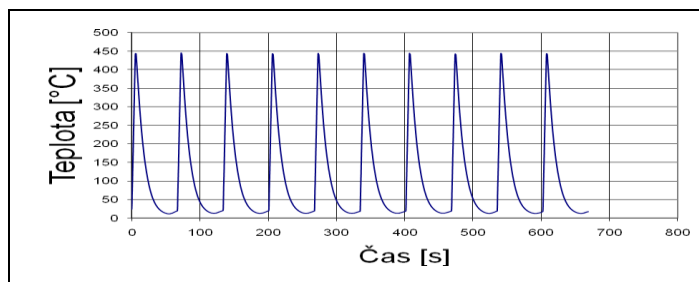
Obr. 19-4 Průběh zatěžování první varianty tepelného zatěžování

První varianta zatěžování vzorků nebyla úspěšná, jelikož po vyjmutí vzorku ze zkušebního stroje došlo k rozlomení vzorku. K rozlomení vzorku došlo zřejmě vnesením vysokého zbytkového napětí, které bylo vyvoláno rychlým ochlazením vzorku.

Druhá varianta průběhu zatěžování se lišila od první varianty rychlostí ochlazení, která byla 8 krát nižší než u první varianty, cca. 8°C/sec. Ochlazení probíhalo pouze na principu odvodu tepla materiálem, kde upínací část vzorku měla nižší teplotu než testovaná část a tím vznikl ve vzorku tepelný spád, který zajišťoval transport tepla z měřeného místa do upínací části vzorku. Upínací část vzorku byla chlazena kovovými čelistmi, které mají vnitřní chlazení tekoucí vodou. Parametry druhé varianty tepelného zatěžování jsou uvedeny v tab. 19-2.

Cyklování bez vnějšího chlazení	
$T_{\min}$	40 - 50°C
$T_{\max}$	440 - 450°C
Průměrná rychlost ohřevu	80°C/sec
Průměrná rychlost chladnutí	10°C/sec
Počet cyklů	10

Tab. 19-2 Druhá varianta tepelného zatěžování



Obr. 19-5 Průběh zatěžování druhé varianty tepelného zatěžování

Po úspěšném otestování druhé varianty byly vzorky TSM33 a CTS20D zatíženy 50 cykly při stejných zatěžovacích hodnotách jako u druhé varianty. Po 50 cyklech tepelného zatížení byly vzorky testovány na indentační  $K_{Ic}$  a HV. Na každém vzorku byly provedeny dva vtisky. Po mechanických testech  $K_{Ic}$  a HV byly vzorky opět zatíženy 50 cykly tepelného zatěžování a opět na nich byly provedeny stejné testy na indentační  $K_{Ic}$  a HV.

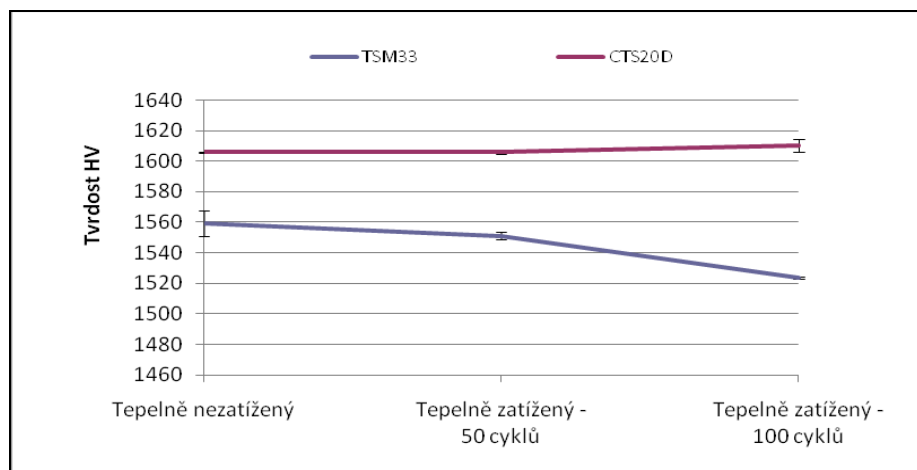
### 19.3. Výsledné hodnoty

V tab. 19-3 jsou uvedeny souhrnné výsledky tvrdostí a indentační lomové houževnatosti. Pokles tvrdosti byl zaznamenán pouze u TSM33, kdy hodnota tvrdosti klesla o 2,5%. U slinutého karbidu CTS20D nebyla zaznamenána změna. Pokles indentační lomové houževnatosti byl zjištěn u obou typů SK. Po 100 cyklech byl pokles u TSM33 o 31% a u CTS20D o 21%.

Ze zjištěných výsledků obou slinutých karbidů vyplývá, že hodnota tvrdosti HV zůstala po tepelném zatížení konstatní a hodnota lomové houževnatosti klesla o více jak 21%. Vyšší pokles lomové houževnatosti byl zaznamenán u TSM33. Přesto však byla hodnota lomové houževnatosti po tepelném zatížení vyšší než u CTS20D viz. obr. 19-6 ; 19-7.

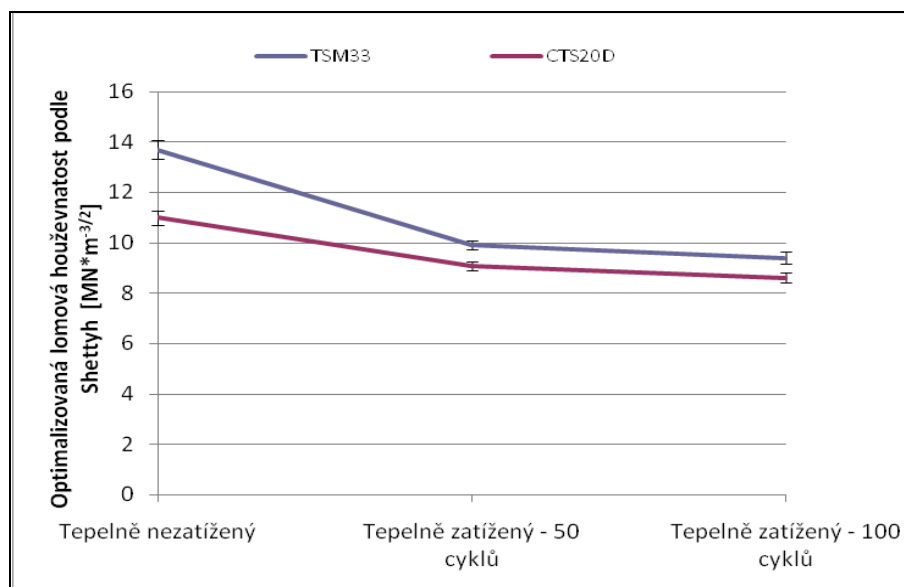
Materiál	Průměrné hodnoty tvrdosti HV		Optimalizovaná lomová houževnatost podle Shettyho [ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ ]	
	TSM33	CTS20D	TSM33	CTS20D
Tepelně nezatížený	1559 ±8,5	1606 ±0,43	13,7 ±0,38	11 ±0,29
Tepelně zatížený - 50 cyklů	1551 ±2,29	1606 ±1,13	9,9 ±0,18	9,1 ±0,17
Tepelně zatížený - 100 cyklů	1523 ±0,64	1610 ±4,24	9,4 ±0,24	8,6 ±0,21

Tab. 19-3 Průměrné hodnoty tvrdosti HV a indentační lomové houževnatosti v různých fázích tepelného namáhání.



Obr. 19-6 Hodnota tvrdosti HV v závislosti na počtu tepelných cyklů

Z grafu 19-6 vyplývá, že hodnota tvrdosti HV se u TSM33 mírně snižuje a u CTS20D zůstává konstantní.



Obr. 19-7 Hodnota indentační lomové houževnatosti v závislosti na počtu tepelných cyklů

#### 19.4. Impact test

Impact test byl proveden za účelem zjištění odolnosti SK proti rázovému kontaktnímu namáhání před a po tepelném zatížení vzorku. Testování byla provedena na pracovišti

ZČU/KMM. Testování proběhlo na elektromagnetickém impact testeru na vzorcích TSM33 a CTS20D. Hodnoty výsledků byly porovnány s tepelně nezatíženou oblastí vzorku.

## 19.5. Postup provedení zkoušky

Vzorky byly upevněny na měřicí stůl pomocí gelového lepidla Loctite. Byl použit impact test poháněný elektromagnetem.

Počet úderů byl stanoven na 10 000 a frekvence 10 Hz. Na každém vzorku byly vytvořeny impact krátery, které byly posléze měřeny a vyhodnocovány. Energie úderu jsou měřeny pomocí piezoelektrického čidla Kistler s měřicí frekvencí 17 kHz s vyhodnocením v softwaru LabView. Měřené jednotky jsou v newtonech, ale vzhledem k tomu, že se jedná o dynamický jev, značí se symbolem daN (dynamický newton). Jednotlivé krátery byly proměřeny pomocí metalografického mikroskopu a software Lucia. Průměry kráterů byly měřeny ve dvou na sobě kolmých rozměrech a posléze průměrovány.

### 19.5.1. Výsledné hodnoty

Z obr. 19-8 vyplývá, že odolnost proti rázovému kontaktnímu namáhání je u TSM33 vyšší v tepelně ovlivněné oblasti a to až do zatížení 500daN. Poté je odolnost proti rázovému kontaktnímu namáhání vyšší v nezatížené oblasti až do maximálního zatížení 700 daN. U slinutého karbidu CTS20D byl průběh poškození v tepelně ovlivněné oblasti strmější a tudíž docházelo k rychlejšímu poškození než u TSM33.

Vzorek	Zpracování	Zatížení (daN)	1. průměr kráteru (μm)	2. průměr kráteru (μm)	Zprůměrovaný průměr (μm)
TSM33	Tepelně ovlivněná oblast	400	363	346	381,5 ±8,5
		500	418	431	459 ±6,5
		600	472	484	536 ±6,0
		700	479	493	589,5 ±7,0
	Tepelně neovlivněná oblast	400	393	400	396,5 ±3,5
		500	408	437	454 ±14,5
		600	440	441	520 ±0,5
		700	463	454	581,5 ±4,5
CTS20D	Tepelně ovlivněná oblast	400	283	262	341,5 ±10,5
		500	353	387	426,5 ±17,0
		600	452	423	526 ±14,5
		700	454	474	577 ±10,0
	Tepelně neovlivněná oblast	400	436	444	418 ±4,0
		500	451	474	475,5 ±11,5
		600	452	486	526 ±17,0
		700	474	481	587 ±3,5

Tab. 19-4 Výsledné hodnoty impact testu

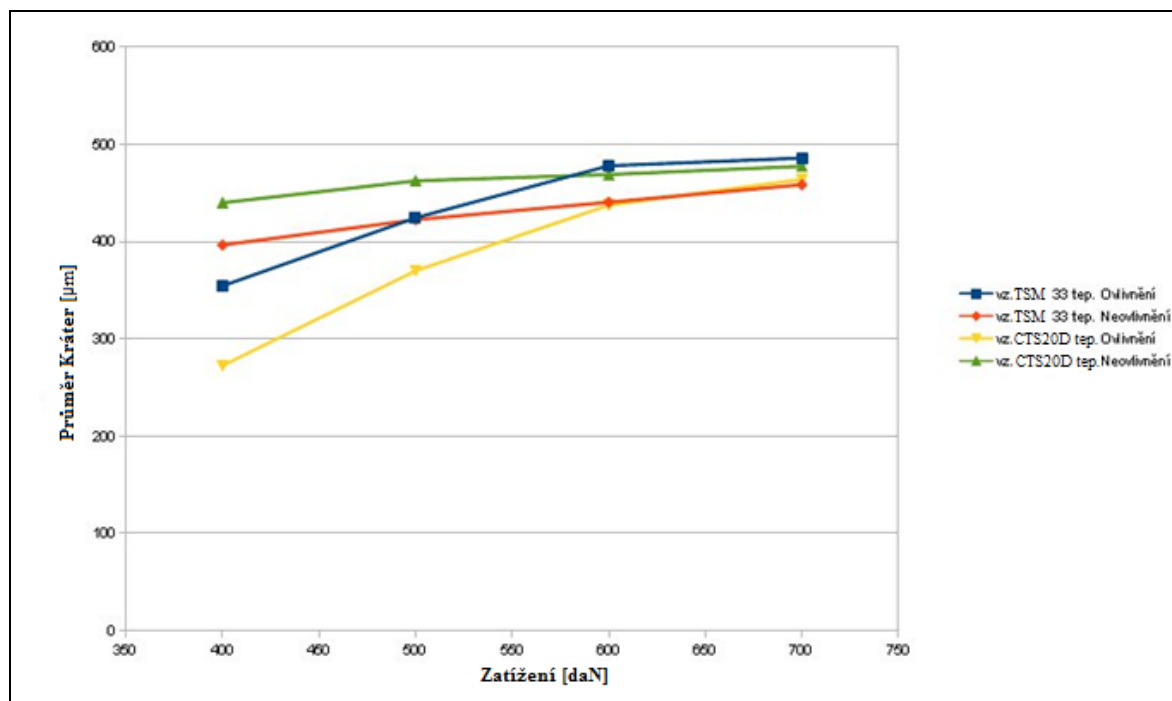
Pro ověření hodnot rozměrů impactových kráterů u TSM33 v nižších hodnotách zatížení byl proveden dodatečný test, který měl za úkol potvrdit či vyvrátit výsledky z předchozího impact testu. Hodnoty rozměrů kráterů po dodatečném testu jsou uvedeny v tab. 19-5.

Vzorek	Zpracování	Zatížení (daN)	1. průměr kráteru (μm)	2. průměr kráteru (μm)	Zprůměrovaný průměr (μm)	
TSM33	Tepelně ovlivněná oblast	100	185	164	174,5	±10,5
		200	207	212	209,5	±2,5
		300	253	257	255	±2
	Tepelně neovlivněná oblast	100	177	194	185,5	±8,5
		200	231	254	242,5	±11,5
		300	269	254	261,5	±7,5

Tab. 19-5 Výsledné hodnoty z dodatečného impact testu

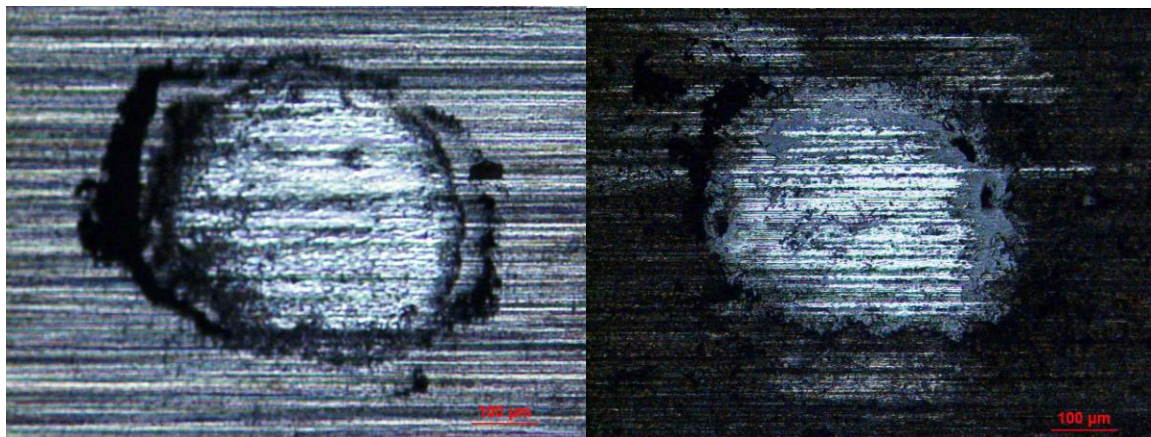
Z dosažených hodnot rozměrů impactového kráteru u jednotlivých vzorků materiálu TSM 33 s tepelnou a bez tepelné exploatace vyplývá, že citlivost této metody není v tomto případě vyvolaných změn tak vysoká. Ostatní testy (tvrdost, lomová houževnatost) prokázaly podstatně větší rozdílnost v naměřených hodnotách, přičemž tepelně zatížený slinutý karbid vykazoval vždy prokazatelně nižší hodnoty (horší vlastnosti). U impact testu vykazoval tepelně zatížený SK rovněž nižší odolnost proti rázovému cyklickému namáhání, avšak zjištěné rozdíly oproti teplotně nezatíženému SK nebyly tak výrazně nižší.

U obou vzorků (tepelně zatížených i nezatížených) byly zjištěny pouze nepatrné rozdíly ve velikosti vzniklých kráterů. Nikde nebyly zjištěny žádné rozdíly ve vzniku trhlin popř. iniciace dalších poškození (odtržení povrchových vrstev, vydrolení karbidických zrn apod.) Tento stav lze vysvětlit tím, že při impact testu vznikají v oblasti kráteru především tlaková napětí. Ta nejsou v případě tepelně exploatovaných slinutých karbidů tak nebezpečná, ačkoliv lomová houževnatost prokazatelně klesala, neprojevalo se to na získaných výsledcích z impact testu, kde se očekávaly rovněž větší rozdíly.

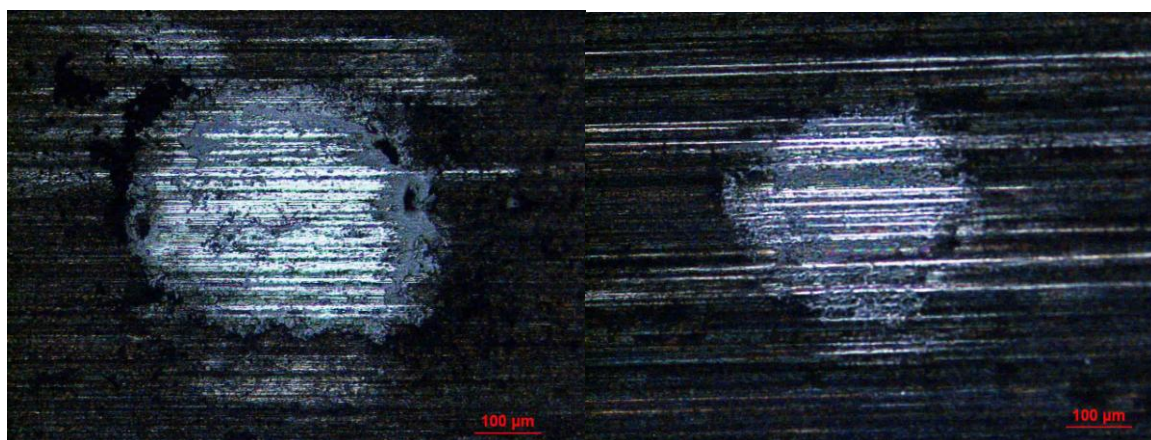


Obr. 19-8 Průměrné velikosti kráterů v závislosti na zatěžovací síle





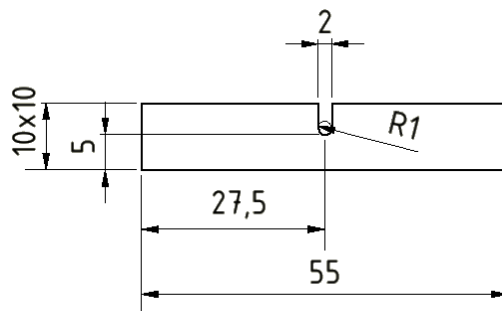
Obr. 19-9 Vytvořené krátery po impact testu TSM33 při zatížení 400 daN, neovlivněná oblast (vlevo), ovlivněná oblast (vpravo)



Obr. 19-10 Vytvořené krátery po impact testu CTS20D při zatížení 400 daN, neovlivněná oblast (vlevo), ovlivněná oblast (vpravo)

## 20. Zkouška lomové houževnatosti

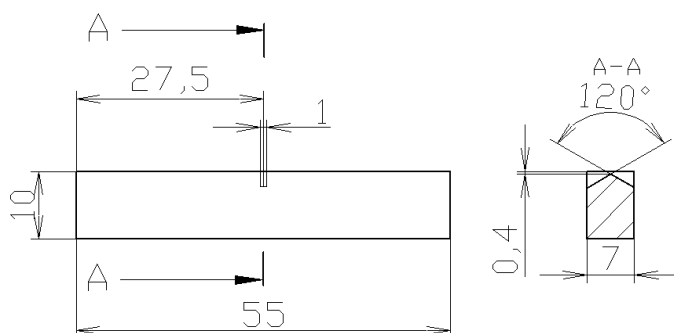
Zkouška lomové houževnatosti byla provedena pro stanovení skutečné relevantní hodnoty  $K_{Ic}$  u SK. Všechny testy probíhaly při konstantní teplotě 20°C. V počátku testování ve spolupráci s VZÚ v Plzni byl navržen vzorek typu Charpy viz. obr. 21-1. Při testování se však tento vrub ukázal jako nevhodný a při cyklování trhliny došlo k přelomení vzorku. Při dalším pokusu se stejný vzorek zatěžoval tříbodovým ohybem bez předchozího pokusu o nacyklování trhliny. Výsledné hodnoty lomové houževnatosti však neodpovídaly realitě a byly zcela chybné. Proto po konzultaci s oddělením výzkumu a vývoje ve společnosti PRAMET s.r.o. se testování provedlo ve spolupráci s Ústavem fyziky materiálu v Brně, kde byly vyrobeny speciální vruby typu Chevron na vzorcích o rozměrech 7 mm x 10 mm x 55 mm. Dále zde bylo provedeno nacyklování trhliny a dolomení vzorků. Testován byl pouze jeden typ SK, a to TSM33 z důvodu velké finanční náročnosti experimentu. Slinutý karbid TSM 33 byl vybrán z důvodu vyšší lomové houževnatosti a častého použití při výrobě monolitních vrtáků. Vzorků bylo vyrobeno a odzkoušeno 9 kusů.



Obr. 20-1 První varianta vzorku pro testování lomové houževnatosti

## 20.1. Požadavky na zkušební těleso

Zkušební těleso bylo navrženo o rozměrech 7 mm x 10 mm x 55 mm. Vrub byl vyroben elektrojiskrovým obráběním podle obr. 21-2.



Obr. 20-2 Výrobní výkres testovaného vzorku na lomovou houževnatost

Všechny plochy musely mít rovinnost a kolmost pod 0,001 mm. Pro zlepšení viditelnosti tvorby trhliny byla jedna strana vzorku (10 mm x 55 mm) vyleštěna 3 $\mu$ m a 1 $\mu$ m pastou.

## 20.2. Postup provedení zkoušky

Tento typ zkoušky byl proveden na vzorcích z válcového roubíku o rozměrech  $\varnothing 13$  mm a délky 330 mm. Poté byly na vzorcích vyrobeny ostré vruby typu Chevron elektrojiskrovou metodou. Na takto připravených vzorcích bylo provedeno cyklování trhliny na stolním pulsatoru Rumul viz. obr. 20-3 .

K iniciaci je v těchto případech nutné použít vrubu typu Chevron, který má tu výhodu, že trhlina se při cyklickém zatěžování snadněji iniciuje. Jakmile je trhlina iniciovaná, působí tam stejný efekt, jaký se využívá u tohoto vrubu u keramik tj. rozšiřující se šířka celé trhliny zvyšuje odpor proti šíření trhliny i když je na jejím celém faktoru intenzity napětí blížíci se kritickému. Neboli u rovného vrubu by už došlo k lomu, ale vrub typu Chevron udrží stabilní podmínky pro cyklické šíření trhliny. Tím se trhlina dostane do režimu, kdy lze snížit rozkmit napětí (nebo předpětí a amplitudu), a tak i riziko nestabilního lomu. Tyto charakteristiky je nutno snižovat průběžně, v závislosti na frekvenci kmitání. Ta umožňuje sledovat trhlinu, dokud je schovaná v rubu typu Chevron (tj. není vidět na povrchu). Vždy po určitém snížení frekvence je nutno snížit parametry zatěžování. Lze najít podmínky, jak šíření trhliny kontrolovat. Jakmile se trhlina objeví na boční straně, sleduje se její šíření lupou nebo dlouhoohniskovými objektivy.

Při cyklování bylo zapotřebí odladit zadanou hodnotu frekvence, aby docházelo k rovnoměrnému šíření trhliny. Optimální frekvence pro šíření trhliny byla optimalizována na

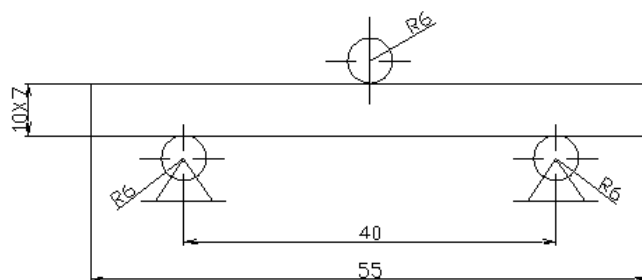


300 Hz při  $(2 \text{ až } 3) \cdot 10^6$  cyklů. Průhyb vzorků byl cca. 0.015 mm při průměrném zatížení, které klesalo na 700 N. Trhlina byla nacyklována cca. do poloviny šířky vzorku (5mm).



Obr. 20-3 Rezonanční stroj RUMUL s upnutým vzorkem

Po nacyklování trhliny byly vzorky dolomeny na trhacím stroji značky INSTRON 8862. Při manipulaci byly 4 vzorky přelomeny a tudíž nemohly být dále použity pro další expertízy. Vzorky byly namáhány tříbodovým ohybem viz. obr. 20-4 a obr. 20-5.



Obr. 20-4 Schéma tříbodového ohybu pro dolomení vzorků

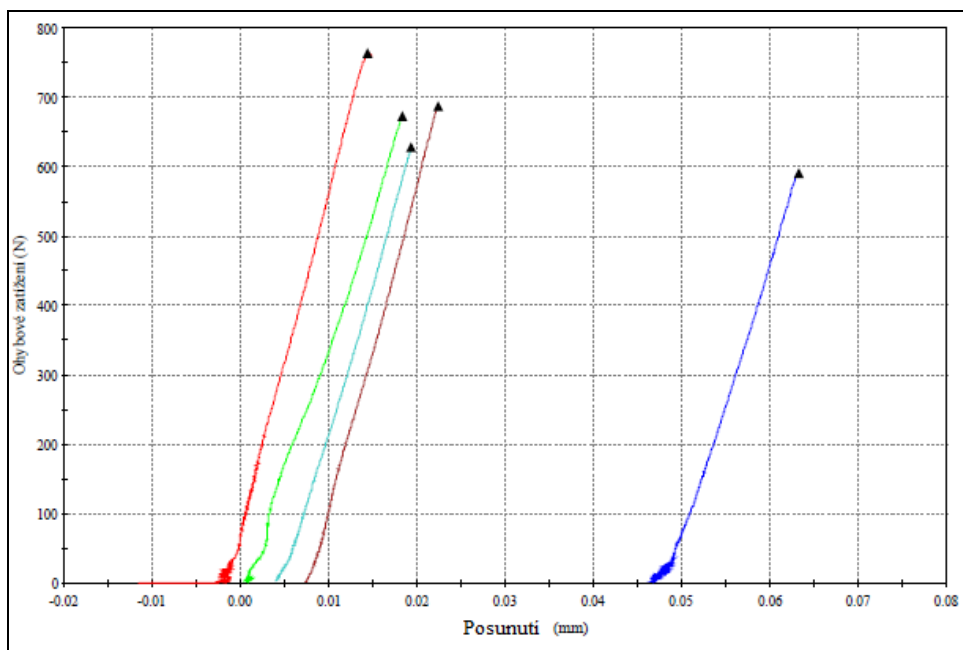


Obr. 20-5 Dolomení vzorku tříbodovým ohybem

Rychlost zatěžování byla 0,1 mm/min. Dolomením byla změřena lomová síla  $F_c$ . Hodnoty lomové síly jsou znázorněny v tab. 20-1 a průběh zatěžování na obr. 20-6. Cyklování trhliny i dolomení vzorku probíhalo při konstantní teplotě 20°C.

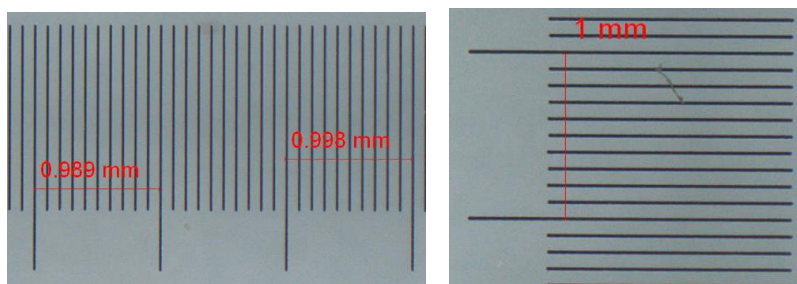
Označení vzorku	Materiál	Šířka vzorku [mm]	Tloušťka vzorku [mm]	Lomová síla [N]
5	TSM33	7,02	10,02	765,06
6	TSM33	7,01	10,02	687,22
7	TSM33	6,99	10,02	672,36
8	TSM33	6,99	10,02	627,78
9	TSM33	7,00	10,03	590,87

Tab. 21-1 Hodnoty lomové houževnatosti TSM33



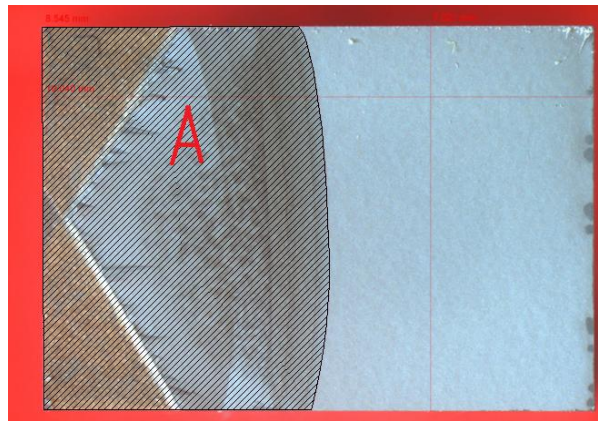
Obr. 20-6 Záznam z dolomení vzorků tříbodovým ohybem

Po dolomení vzorků bylo provedeno změření délky nacyklované trhliny pomocí obrazové analýzy z důvodu přesnosti a jednoduchosti zjištění délky trhliny. Před započítáním měření byl mikroskop zkalibrován viz. obr. 20-7.



Obr. 20-7 Kalibrace mikroskopu v podélné a příčné ose

Po kalibraci byly překontrolovány rozměry vzorků a změřeny lomové plochy trhlín pomocí polygonové funkce viz. obr. 20-8. Lomové plochy byly změřeny z obou částí zlomeného vzorku a poté byly zprůměrovány. Podělením průměrné lomové plochy vzniklé nacyklovanou trhlínou šířkou vzorku byla vypočtena délka trhliny viz. vztah (20-1) a tab. 20-2.



Obr. 20-8 Lomová plocha vzorku se zvýrazněnou plochou vzniklou trhlinou

$$a = \frac{A_1 + A_2}{B} = [mm] \quad (20-1)$$

- a [mm] - délka nacyklované trhliny  
 A<sub>a</sub>, A<sub>b</sub> [mm<sup>2</sup>] - lomová plocha od trhliny na přeráženém vzorku  
 B [mm] - šířka vzorku

Označení vzorku	A <sub>a</sub> [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>b</sub> [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>prům</sub> [mm <sup>2</sup> ]	B [mm]	a [mm]
5	35,68	35,73	35,71	7,02	5,09
6	34,86	34,88	34,87	7,01	4,98
7	35,64	35,79	35,71	6,99	5,11
8	37,25	37,24	37,24	6,99	5,33
9	38,68	38,53	38,61	7,00	5,51

Tab. 20-2 Délky nacyklovaných trhlin

Po podrobné vizuální prohlídce lomových ploch vzorků byla zjištěna u vzorku čísla 5 zakřivená plocha do "vrtule", což mělo za následek zkreslení hodnoty délky trhliny a maximální lomové síly. Proto nelze brát naměřené hodnoty pátého vzorku za relevantní a průkazné.

### 20.3. Vyhodnocení naměřených hodnot

Naměřené hodnoty lomové síly a délky nacyklovaných trhlin byly dosazeny do vztahu pro výpočet statické lomové houževnatosti  $K_{Ic}$  (20-2) pro vzorek namáhaný na ohyb.

$$K_{Ic} = F_Q \frac{S}{BW^2} f(g_1) = [MPa * m^{\frac{1}{2}}] \quad (20-2)$$

- F<sub>Q</sub> [N] - síla  
 S [cm] - rozteč mezi vnějšími podporami při zatěžování vzorku  
 B [cm] - tloušťka vzorku  
 W [cm] - šířka vzorku  
 a [cm] - délka trhliny

Tvarová funkce  $g_1$  pro rozměry zkušebního tělesa vychází ze vztahu (20-3)

$$f(g_1) = (3,297433273 - 2,215633679 * \frac{a}{w} + 69,76690527 * (\frac{a}{w})^2 - 154,7046423 * (\frac{a}{w})^3 + 165,0187627 * (\frac{a}{w})^4) \quad (20-3)$$

Označení vzorku	Materiál	B [mm]	W [mm]	F <sub>Q</sub> [N]	a [mm]	K <sub>Ic</sub> [Mpa*m <sup>1/2</sup> ]
5	TSM33	7,02	10,02	765,06	5,09	11,87
6	TSM33	7,01	10,02	687,22	4,98	10,27
7	TSM33	6,99	10,02	672,36	5,11	10,53
8	TSM33	6,99	10,02	627,78	5,33	10,54
9	TSM33	7,00	10,03	590,87	5,51	10,55
Průměrná hodnota K <sub>Ic</sub> [Mpa*m <sup>1/2</sup> ] vzorků 6 - 9						<b>10,47±0,12</b>

Tab. 20-3 Hodnoty lomové houževnatosti

Z výsledných hodnot lomové houževnatosti nelze brát za relevantní hodnotu K<sub>Ic</sub> vzorku č. 5, který měl nerovinný lom do "vrtule". Průměrná hodnota 4 průkazných vzorků dosahuje 10,47 MPa\*m<sup>1/2</sup>. Hodnota udávaná výrobcem je 9,4 MPa\*m<sup>1/2</sup>. Z výsledných hodnot lomové houževnatosti vyplývá, že test byl úspěšný a naměřené hodnoty jsou cca. o 1 MPa\*m<sup>1/2</sup> vyšší než uvádí výrobce. Testy lomové houževnatosti budou nadále pokračovat i na dalších typech SK při různých teplotách testování.

## 21. Vyhodnocení velikosti zrn karbidické fáze

Stanovení velikosti zrna karbidické fáze bylo zařazeno mezi testy z důvodu ověření hodnot, které uvádí výrobce a zjištění skutečné průměrné velikosti zrn. Test byl proveden na všech typech SK na plaketách o průměru 13 až 17 mm a délce 5 až 7 mm.

### 21.1. Požadavky na zkušební těleso

Příprava vzorků pro analýzu velikosti zrna se víceméně shoduje s přípravou povrchu pro měření tvrdosti a K<sub>Ic</sub>.

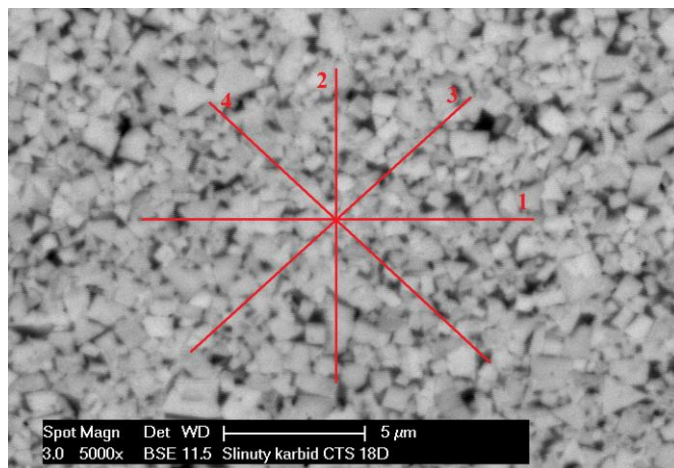
Vzorky (plaketky) byly vyleštěny pomocí diamantové pasty se zrnitostí od 3 μm až po 1 μm. Poté byly vzorky leptány v roztoku Murakami. Toto leptadlo vyvolává mikrostrukturu SK, aniž by docházelo k naleptání kobaltového pojiva. Činidlo Murakami je složeno z kyanoželezitanu draselného a hydroxidu draselného rozpuštěném v destilované vodě. Pro přípravu 100 ml leptadla je zapotřebí 10g KOH, 100 ml H<sub>2</sub>O a 10 g K<sub>3</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>].

### 21.2. Postup provedení zkoušky

Před samotným určováním velikosti zrn karbidické fáze bylo třeba dané vzorky naleptat (Murakami při 20°C po dobu 50 sekund). Pro zkoumání mikrostruktury byl nejdříve použit světelný mikroskop při 1000x zvětšení. Toto zvětšení však nebylo dostatečné, a proto byl použit ŘEM umožňující 2000x až 10000x zvětšení.

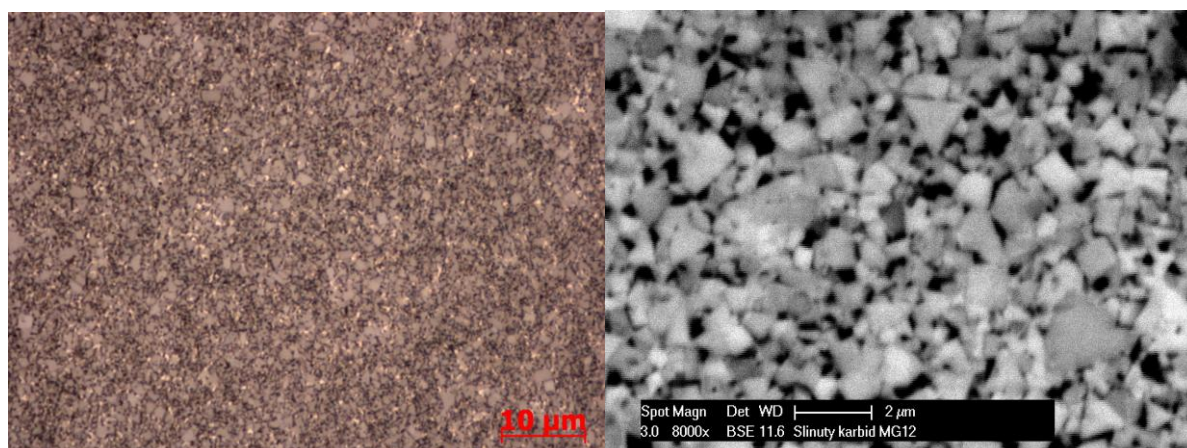
Samotné měření velikosti zrn karbidické fáze bylo provedeno pomocí lineární průsečkové metody. Měřící úsečky byly 10 μm dlouhé a všechny se protínaly v polovině délky úsečky viz. obr. 21-1.





Obr. 21-1 Umístění měřících úseček

Při měření průsečíkovou metodou se vyskytl problém, který spočíval v možném protnutí "ostrůvku" kobaltového pojiva a tím mohlo dojít ke snížení přestnosti celého měření. Proto při protnutí kobaltového "ostrůvku" se délka protnutého ostrůvku odečte od délky úsečky a tím dojde k zpřesnění celého měření. Měření velikosti karbidického zrna bylo provedeno na třech snímcích u všech analyzovaných slinutých karbidů.



Obr. 21-2 Mikrostruktura MG12 (vlevo); světelný mikroskop při 1000x zvětšení (vpravo)  
ŘEM při 8000x zvětšení, leptáno Murikami 50 s při 20°C.

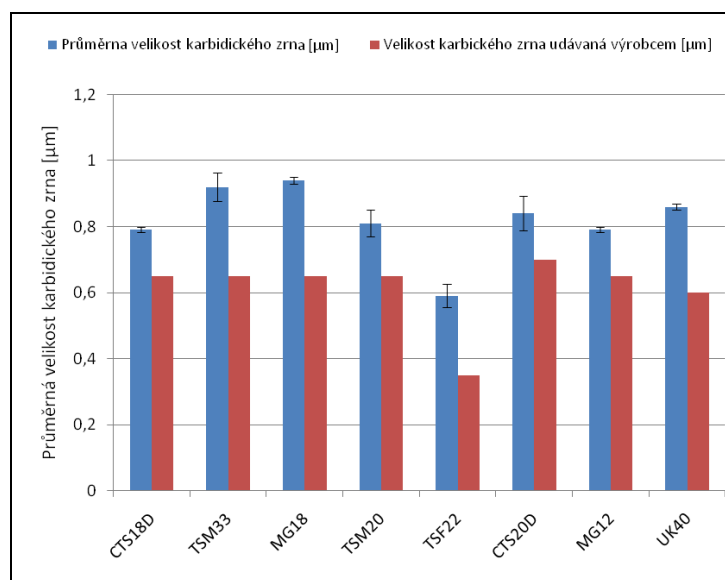
### 21.3. Výsledné hodnoty

Z tab. 21-1 vyplývá, že naměřené velikosti zrn průsečíkovou metodou jsou přibližně o 10 až 20% vyšší oproti hodnotám uváděným výrobcem. Nejvyšší rozdíl mezi naměřenou hodnotou a změřenou byl zjištěn u SK UK40. Nejvyšší průměrná karbidická zrna byla naměřena u SK MG18 a TSM33, nejmenší zrna pak u TSF22, který má ultrajemnou strukturu (0,2-0,5μm).

Slinutý karbid	Průměrná velikost karbidických zrn [ $\mu\text{m}$ ]	Rozsah velikostí karbidického zrna [ $\mu\text{m}$ ]	Velikost karbidického zrna udávaná výrobcem [ $\mu\text{m}$ ]
CTS18D	0,79 $\pm$ 0,007	0,6-2,1	0,5 - 0,8
TSM33	0,92 $\pm$ 0,044	0,7-2	0,5 - 0,8
MG18	0,94 $\pm$ 0,010	0,1-2	0,5 - 0,8
TSM20	0,81 $\pm$ 0,040	0,4-1,8	0,5 - 0,8
TSF22	0,59 $\pm$ 0,036	0,1-0,7	0,2 - 0,5
CTS20D	0,84 $\pm$ 0,052	0,3-2	0,7
MG12	0,79 $\pm$ 0,007	0,7-2	0,5 - 0,8
UK40	0,86 $\pm$ 0,009	0,1-2,2	0,6

Tab. 21-1 Souhrnné výsledky z měření velikosti karbidických zrn

Na obr. 21-3 jsou patrné rozdílné hodnoty průměrných velikostí zrn z měření průsečíkovou metodou a hodnotami udávanými výrobcem. Mikrostruktura SK je kromě TSF22 velmi smíšená o velikosti zrn cca.  $2\mu\text{m}$  až po malá cca.  $0,4\mu\text{m}$ . Takto smíšené mikrostruktury využívají synergického efektu velkých a malých karbidických zrn, které kombinují vysokou tvrdost malých zrn a vysokou houževnatost velkých zrn. Smíšená struktura SK patří mezi hojně používané pro výrobu monolitních nástrojů, jelikož mají požadovanou houževnatost s dostatečnou tvrdostí.



Obr. 21-3 Průměrná velikost karbidického zrna

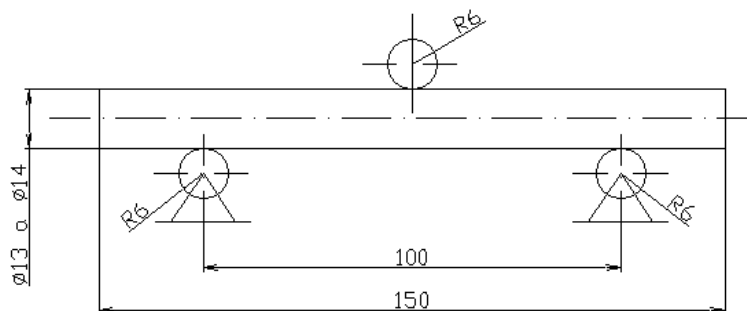
## 22. Zkouška třibodovým ohybem (TRS)

Zkouška třibodovým ohybem byla zařazena mezi experimenty z důvodu ověření hodnot, které uvádí výrobce a dále porovnání hodnot mezi sebou. Zkouška byla provedena pouze u dvou typů SK a to TSM33 a CTS20D. Důvod výběru těchto dvou SK spočívá v častější aplikaci těchto SK pro výrobu speciálních dlouhých monolitních řezných nástrojů. Oba typy SK by měly být podle výrobce firmy CERATIZIT velmi podobné a měly by dosahovat podobných pevností v ohybu, i když CTS20D by měl být nástupcem TSM33 s komplexně lepšími vlastnostmi.

### 22.1. Požadavky na zkušební těleso

Zkušební tělesa musí být buď obdélníkového či kruhového průřezu. Povrch zkušebních těles by měl být broušen s chladicí kapalinou. Hloubka úběru třísky by neměla převýšit 0,01 mm a drsnost povrchu by měla být do Ra 0,4 $\mu$ m. Lze testovat roubíky i v surovém (neopracovaném) stavu po slinování, avšak hodnoty meze pevnosti v ohybu jsou podstatně nižší.

Pro testování SK TSM33 a CTS20D byly použity válcové roubíky v broušeném i nebroušeném stavu o rozměrech :  $\varnothing$ 14mm - TSM33,  $\varnothing$ 13mm - CTS20D a délce 150 mm viz. obr. 22-1.



Obr. 22-1 Výrobní výkres vzorku pro zkoušku třibodovým ohybem



Obr. 22-2 Vzorky pro třibodový ohyb - leštěné



Obr. 22-3 Vzorky pro třibodový ohyb - v neopracovaném stavu

### 22.2. Postup provedení zkoušky

Zkušební těleso se umístilo na podpěrné válečky do středu zatěžovacího trnu. Napěťová rychlost zatěžování byla 1000 N/s při vzdálenosti podpor 100 mm, průměry



válečků 12 mm. Zatěžování probíhalo rovnoměrně v režimu řízení síly bez rázů při teplotě 20°C.



Obr. 22-4 Umístění vzorků při zkoušce tříbodovým ohybem

### 22.3. Vyhodnocení naměřených hodnot

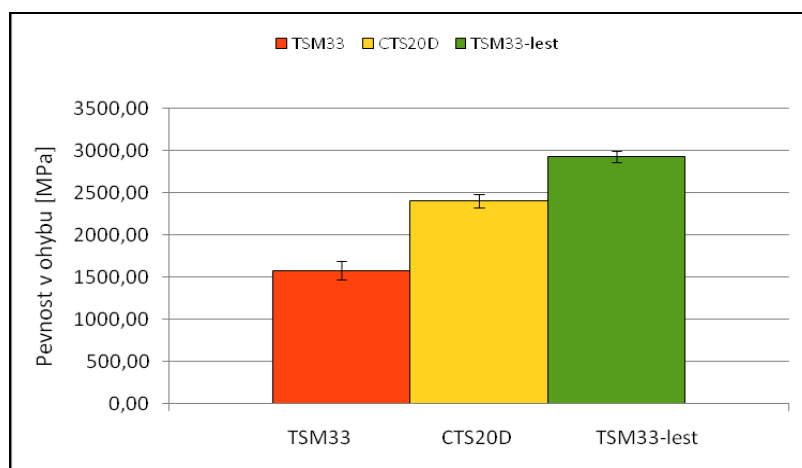
Naměřené hodnoty maximálních sil byly automaticky převedeny na meze pevnosti v ohybu pomocí výpočtového softwaru. Vztah pro výpočet meze pevnosti v ohybu byl použit viz.(22-1). Výsledné hodnoty pevnosti v ohybu jsou uvedené v tab. 22-1 včetně směrodatných odchylek.

$$R_{bm} = \frac{8 * F_{max} * l}{\pi * d^3} = [MPa] \quad (22-1)$$

- $F_{max}$  [N] - maximální síla před přelomením zkušební tyče  
 $l$  [mm] - vzdálenost podpěr  
 $d$  [mm] - průměr zkušební tyče

Pevnost v ohybu [MPa]				
	VZ1.	VZ2.	VZ3.	Průměrná hodnota
TSM33	1694	1612	1429	1578,33 ±110,8
CTS20D	2406	2502	2303	2403,67 ±81,3
TSM33-lešt	2998	2861		2929,50 ±68,5

Tab. 22-1 Výsledné hodnoty pevnosti v ohybu



Obr. 22-5 Pevnost v ohybu pro různé SK s různý stav povrchu

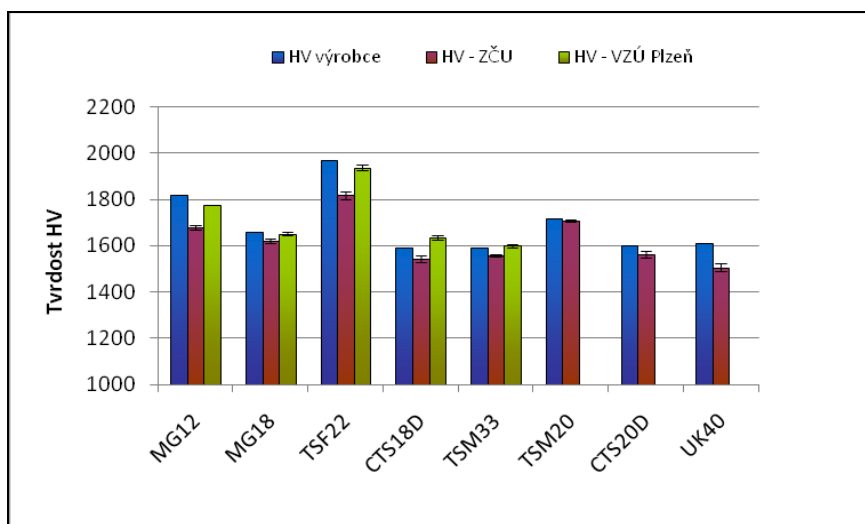
Z grafu na obr. 22-5 je patrné, že nejnižších hodnotu pevnosti v ohybu dosahuje TSM33 v surovém stavu a nejvyšších hodnot TSM33 s leštěným povrchem. Kvalita povrchu má na výslednou pevnost velká vliv. U leštěné tyče je hodnota meze pevnosti téměř



## 23. Diskuze výsledků

Cílem této diplomové práce bylo zhodnotit vybrané vlastnosti osmi typů slinutých karbidů, které byly testovány zejména za účelem zjištění hodnoty lomové houževnatosti v závislosti na tepelném namáhání. Při návrhu experimentů byl kladen důraz na přiblížení namáhání SK v reálné aplikaci řezného procesu, konkrétně při obrábění (vrtání) austenitické oceli.

**První experiment** se týkal měření tvrdosti podle Vickerse při zatížení 294 (HV). Na každém vzorku bylo provedeno 5 vtisků, ze kterých se určovala tvrdost HV. Tvrdost byla měřena na dvou pracovištích, a to ve VZÚ Plzeň a na ZČU dle normy ČSN EN 23878. Měření probíhalo při konstantní teplotě 20°C. Z grafu na obr. 15-1 je patrné, že nejvyšších hodnot tvrdosti bylo naměřeno na slinutém karbidu TSF22 a nejnižších hodnot na slinutém karbidu UK40. Tyto výsledky odpovídají předpokladům, které byly zjištěné v teoretické části. Naměřené hodnoty tvrdosti ve VZÚ Plzeň byly zhruba o 4-6% vyšší než na ZČU. Udávané hodnoty výrobcem byly zhruba o 4-8% vyšší než hodnoty naměřené na ZČU. Rozdílné naměřené hodnoty byly zřejmě způsobeny nepřesností při měření.

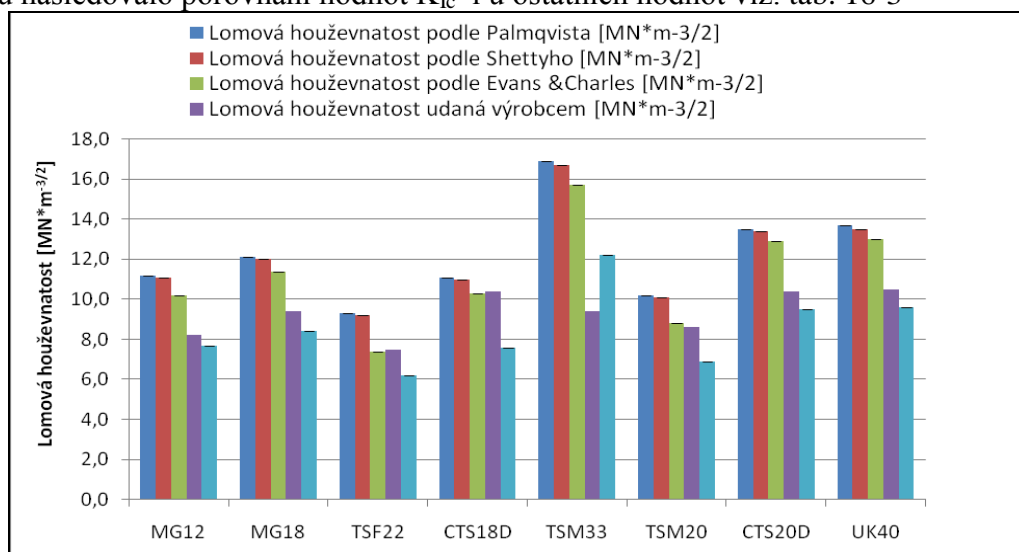


Obr. 15-1 Výsledné hodnoty tvrdosti

**Druhý experiment** se týkal zjištění lomové houževnatosti indentační metodou u 8 typů SK. Jednotlivé vzorky byly připraveny a zkoušeny dle normy ČSN ISO 28079, která obsahuje doporučený postup provedení zkoušky. Výsledné hodnoty délek trhlin byly přepočteny pomocí čtyř výpočtových modelů včetně optimalizovaného na lomovou houževnatost. Na každém vzorku bylo provedeno 5 vtisků, ze kterých se vyhodnocovala lomová houževnatost. Z grafu na obr. 16-4 vyplývá, že nejvyšších hodnot lomové houževnatosti dosahoval slinutý karbid TSM33, nejnižších hodnot pak slinutý karbid TSF22. Hodnoty indentační lomové houževnatosti patří mezi orientační hodnoty, které nelze považovat za zcela relevantní a bezchybné. Proto byl zařazen experiment pro zjištění relevantní hodnoty lomové houževnatosti lomovou mechanikou.

Z tří použitých výpočtových modelů (Palmqvista - vztah (4-8), Evans & Charles - vztah (4-11) a Shetty - vztah (4-9)) nebyl, ani jeden model zcela přesný a neodpovídal hodnotám z lomové mechaniky ani hodnotám udávané výrobcem. Z tohoto důvodu byl optimalizován

Shettyho vztah viz.(16-1). Optimalizace byla provedena na slinutém karbidu TSM33, kde byla známa relevantní hodnota lomové houževnatosti. Po optimalizaci na tomto slinutém karbidu následovalo porovnání hodnot  $K_{Ic}$  i u ostatních hodnot viz. tab. 16-3



Obr. 16-4 Výsledné hodnoty lomové houževnatosti pro různé výpočtové modely.

	Průměrná hodnota lomové houževnatosti podle Palmqvista, Evans & Charles a Shettyho [MN <sup>3/2</sup> *m <sup>-3/2</sup> ]	Optimalizovaná lomová houževnatost podle Shettyho [MN <sup>3/2</sup> *m <sup>-3/2</sup> ]	Lomová houževnatost udaná výrobcem [MN <sup>3/2</sup> *m <sup>-3/2</sup> ]	Zpřesnění/ Znepřesnění [%] vůči $K_{Ic}$ výrobce
MG12	10,8	7,7	8,2	18
MG18	11,8	8,4	9,4	10
TSF22	8,6	6,2	7,5	4
CTS18D	10,8	7,6	10,4	23
TSM33	16,4	12,2	9,4	20
TSM20	9,7	6,9	8,6	9
CTS20D	13,3	9,5	10,4	13
UK40	13,4	9,6	10,5	13

Tab. 16-3 Zpřesnění výsledků lomové houževnatosti indentační metodou

Z uvedené tab. 16-3 vyplývá, že k zpřesnění bylo dosaženo zejména u houževnatějších typů SK, kde zpřesnění bylo více jak 10 %. Výjimku tvořil slinutý karbid CTS18D u kterého došlo k nejvyššímu zneřesnění, i když patří mezi houževnaté SK.

**Třetí experiment** se týkal tepelného zatížení slinutých karbidů. Osm typů zkoušených SK se pomalou rychlostí ohřevu zahřály na teplotu 450°C a poté došlo k rychlému ochlazení na 15°C. Na takto tepelně zatížených vzorcích bylo provedeno testování tvrdosti a lomové houževnatosti indentační metodou. Hodnoty tvrdosti se po tepelném zatížení nezměnily

a zůstaly konstantní. Hodnoty lomové houževnatosti však poklesly o 17 až 42%. Pokles lomové houževnatosti na povrchu lze odůvodnit vnesením zbytkového napětí prostřednictvím rychlého ochlazení vzorků. Pokles lomové houževnatosti o 42% u TSM33 lze odůvodnit nepřesností při měření a specifickou strukturou (velikost zrn karbidické fáze od 0,7 do 2  $\mu\text{m}$ ), která je zřejmě velmi náchylná na tepelné šoky.

	Průměrné hodnoty tvrdosti HV po tepelném zatížení - ochlazení do vody	Průměrné hodnoty HV - ZČU	Optimalizovaná lomová houževnatost podle Shettyho $[\text{MN}^*\text{m}^{-3/2}]$	Tepelně zatíženo - ochlazení do vody, podle optimal. Shetty $[\text{MN}^*\text{m}^{-3/2}]$
MG12	1676 $\pm$ 7,40	1681 $\pm$ 9,81	7,7 $\pm$ 0,4	5,9 $\pm$ 0,04
MG18	1573 $\pm$ 8,70	1620 $\pm$ 10,74	8,4 $\pm$ 0,05	7,1 $\pm$ 0,22
TSF22	1704 $\pm$ 3,02	1818 $\pm$ 18,10	6,2 $\pm$ 0,24	5,20 $\pm$ 0
CTS18D	1563 $\pm$ 1,78	1543 $\pm$ 16,26	7,6 $\pm$ 0,26	6,80 $\pm$ 0
TSM33	1517 $\pm$ 17,11	1558 $\pm$ 6,50	12,2 $\pm$ 0,10	7,1 $\pm$ 0,29
TSM20	1713 $\pm$ 1,90	1708 $\pm$ 4,70	6,9 $\pm$ 0,14	6,40 $\pm$ 0,04
CTS20D	1582 $\pm$ 0,72	1562 $\pm$ 13,00	9,5 $\pm$ 0,36	7,00 $\pm$ 0,02
UK40	1501 $\pm$ 1,40	1507 $\pm$ 18,75	9,6 $\pm$ 0,55	7,50 $\pm$ 0,04

Tab. 18-1 Výsledné hodnoty tvrdosti a indentační lomové houževnatosti po tepelném zatížení

**Čtvrtý experiment** také sledoval vliv tepelného zatěžování slinutých karbidů. Tepelné zatěžování probíhalo v cyklech (50 a 100 cyklů), kdy docházelo k postupnému ohřívání vzorků na teplotu 440 - 450°C a poté ochlazení na teplotu 40 -50°C. Na vzorcích se provedly testy tvrdosti HV, indentační lomová houževnatost a impact test. Testy lomové houževnatosti a tvrdosti byly provedeny před tepelným zatěžováním, po 50 cyklech tepelného zatěžování a po 100 cyklech tepelného zatěžování. Impact test byl proveden po 100 cyklech v teplem ovlivněné a neovlivněné oblasti.

V tab. 19-3 jsou uvedeny souhrnné výsledky tvrdostí a indentační lomové houževnatosti. Pokles tvrdosti byl zaznamenán pouze u TSM33, kdy hodnota tvrdosti klesla o 2,5%, což je důsledek nepřesnosti měření. U slinutého karbidu CTS20D nebyla zaznamenána změna. Pokles indentační lomové houževnatosti byl zjištěn u obou typů SK. Po 100 cyklech byl pokles u TSM33 o 31% a u CTS20D o 21%.

Ze zjištěných výsledků obou slinutých karbidů vyplývá, že hodnota tvrdosti HV zůstala po tepelném zatížení konstantní a hodnota lomové houževnatosti klesla o více jak 21%. Vyšší pokles lomové houževnatosti byl zaznamenán u TSM33. Přesto však byla hodnota lomové houževnatosti po tepelném zatížení vyšší než u CTS20D.

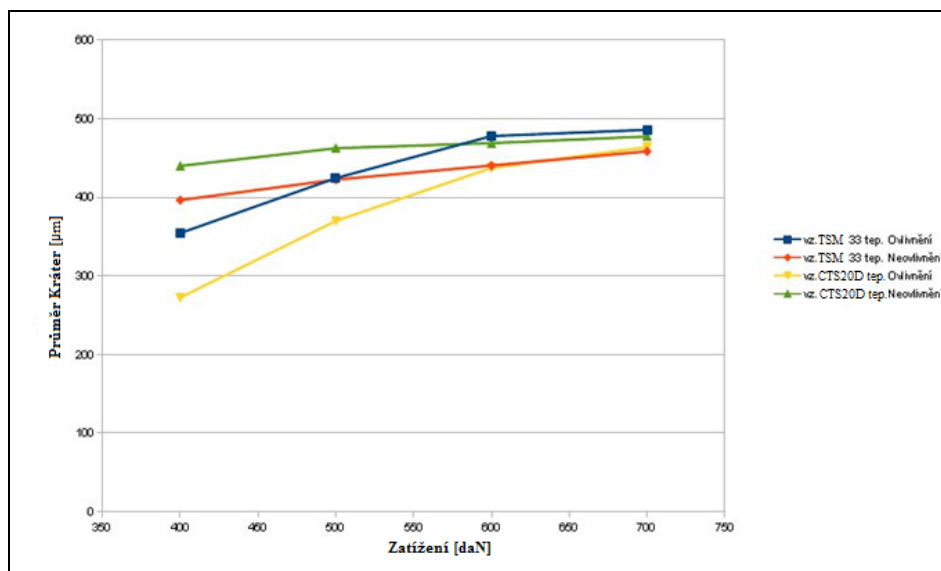
Materiál	Průměrné hodnoty tvrdosti HV		Optimalizovaná lomová houževnatost podle Shettyho [ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ ]	
	TSM33	CTS20D	TSM33	CTS20D
Tepelně nezatížený	1559 $\pm$ 8,5	1606 $\pm$ 0,43	13,7 $\pm$ 0,38	11 $\pm$ 0,29
Tepelně zatížený - 50 cyklů	1551 $\pm$ 2,29	1606 $\pm$ 1,13	9,9 $\pm$ 0,18	9,1 $\pm$ 0,17
Tepelně zatížený - 100 cyklů	1523 $\pm$ 0,64	1610 $\pm$ 4,24	9,4 $\pm$ 0,24	8,6 $\pm$ 0,2

Tab. 19-3 Výsledné hodnoty tvrdosti a indentační lomové houževnatosti před a po tepelném zatížení vzorků

### Impact test

Impact test byl proveden za účelem zjištění odolnosti proti rázovému kontaktnímu namáhání v tepelně neovlivněné a tepelně ovlivněné oblasti. Na vzorcích TSM33 a CTS20D byly provedeny impact testy při různých zatíženích. Z grafu na obr. 19-8 vyplývá, že odolnost proti rázovému kontaktnímu namáhání je u TSM33 vyšší v tepelně ovlivněné oblasti a to až do zatížení 500daN. Poté odolnost proti rázovému kontaktnímu namáhání je vyšší v nezatížené oblasti až do maximálního zatížení 700 daN. U slinutého karbidu CTS20D byl průběh poškození v tepelně ovlivněné oblasti strmější a tudíž docházelo k rychlejšímu poškozování než u TSM33.

Nikde nebyly zjištěny žádné rozdíly ve vzniku trhlin popř. iniciace dalších poškození (odtržení povrchových vrstev, vydrolení karbidických zrn, apod.) Tento stav lze vysvětlit tím, že při impact testu vznikají v oblasti kráteru především tlaková napětí. Ta nejsou v případě tepelně exploatovaných slinutých karbidů tak nebezpečná, a ačkoliv lomová houževnatost prokazatelně klesala, neprojevovalo se to na získaných výsledcích z impact testu, kde se očekávaly rovněž větší rozdíly.



Obr. 19-8 Závislost průměru kráteru na zatížení pro tepelně ovlivněnou a neovlivněnou oblast

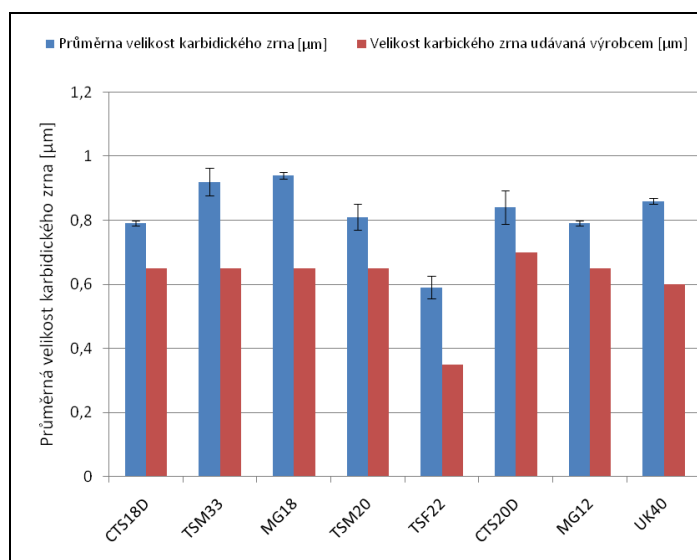
**Pátý experiment** byl proveden pro zjištění lomové houževnatosti přístupem lomové mechaniky. Pro finanční náročnost byl tento test proveden pouze u vybraného slinutého karbidu TSM33, který se výnamně používá pro výrobu monolitních nástrojů. Test byl proveden ve spolupráci s Ústavem fyziky materiálů v Brně. Hodnota lomové houževnatosti u vzorků s vrubem typu Charpy byla stanovena na  $10,47 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Hodnota je zhruba o  $1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  vyšší než uvádí výrobce.

Označení vzorku	Materiál	B [mm]	W [mm]	F <sub>Q</sub> [N]	a [mm]	K <sub>Ic</sub> [Mpa*m <sup>1/2</sup> ]
5	TSM33	7,02	10,02	765,06	5,09	11,87
6	TSM33	7,01	10,02	687,22	4,98	10,27
7	TSM33	6,99	10,02	672,36	5,11	10,53
8	TSM33	6,99	10,02	627,78	5,33	10,54
9	TSM33	7,00	10,03	590,87	5,51	10,55
Průměrná hodnota K <sub>Ic</sub> [Mpa*m <sup>1/2</sup> ] vzorků 6 - 9						<b>10,47±0,12</b>

Tab. 20-3 Hodnoty lomové houževnatosti

**Šestý experiment** byl zaměřen na porovnání mikrostruktury 8 typů SK a zjištění průměrné velikosti karbidických zrn. Hodnocení mikrostruktury bylo provedeno na světelném a hlavně na řádkovacím elektronovém mikroskopu průsečíkovou metodou.

Na obr. 21-3 je patrný rozdíl mezi hodnotami z měření průsečíkovou metodou a hodnotami udávanými výrobcem. Mikrostruktura SK je kromě TSF22 velmi smíšená od velikosti zrn, cca. 2μm až po malá cca. 0,4μm zrna. Takto smíšené mikrostruktury využívají synergického efektu velkých a malých karbidických zrn, které kombinují vysokou tvrdost malých zrn s vysokou houževnatostí velkých zrn. Smíšená struktura SK patří mezi často používané pro výrobu monolitních nástrojů, jelikož mají požadovanou houževnatost s dostatečnou tvrdostí. Největší průměrná zrna byla naměřena u vzorků z TSM33 a MG18, nejmenší zrna TSF22. Tyto zjištěné hodnoty odpovídají předpokladům z rešeršní části.



Obr. 21-3 Výsledné hodnoty průměrných velikostí karbidických zrn

**Sedmý experiment** byl proveden za účelem stanovení meze pevnosti v ohybu u TSM33 a CTS20D. Mez pevnosti se vyhodnocovala na leštěných a neleštěných tyčích. Z tab. 22-1 je patrné, že nejnižší hodnoty pevnosti v ohybu dosahuje TSM33 v surovém stavu a nejvyšších hodnot TSM33 s leštěným povrchem. Vliv kvality povrchu má v tomto případě namáhání významný vliv na výslednou pevnost, která je v případě leštěné tyče téměř dvojnásobná. SK CTS20D, který byl zkoušen rovněž v surovém stavu dosahuje cca. o 800 MPa vyšší pevnosti v ohybu než TSM33 v surovém stavu. Výsledné hodnoty R<sub>bm</sub> mohly být ovlivněny různými průměry zkušebních tyčích, které byly k testování použity.



Pevnost v ohybu [MPa]				
	VZ1.	VZ2.	VZ3.	Průměrná hodnota
TSM33	1694	1612	1429	1578,33 ±110,8
CTS20D	2406	2502	2303	2403,67 ±81,3
TSM33-lešt	2998	2861		2929,50 ±68,5

Tab. 22-1 Výsledné hodnoty pevnosti v ohybu

## Závěr

Diplomová práce se zabývala problematikou návrhu slinutého karbidu pro daný řezný nástroj a řeznou operaci. Hlavním cílem této diplomové práce bylo vybrat nejvhodnější typ slinutého karbidu pro výrobu monolitního vrtáku, který bude používat při obrábění austenitické oceli. Dalším cílem bylo ověřit mechanické hodnoty udávané výrobcem a další vlivy, které ovlivňují užité vlastnosti slinutých karbidů. Rešeršní část se zaměřila zejména na popis komplexních vlastností slinutých karbidů, které se skládají ze dvou základních fází karbidu wolframu a kobaltu. Dále se zaměřila na vlivy, které ovlivňují komplexní vlastnosti slinutého karbidu. Pro testování bylo vybráno osm typů slinutých karbidů od firmy CERATIZIT a Arno friedrichs carbide. Vybrané karbidy patří mezi houževnatější typy slinutých karbidů, které se při výrobě monolitních vrtáků používají.

V praktické části byly navrženy experimenty, které měly ověřit vybrané mechanické hodnoty, které uvádí výrobce. Dále se experimenty zaměřily na optimalizaci výpočtových modelů pro určování indentační lomové houževnatosti, tepelného zatěžování slinutých karbidů a následného testování změn mechanických vlastností.

Lze konstatovat, že testy indentační lomové houževnatosti mají své uplatnění, a to především pro svou jednoduchost a nedestruktivnímu charakter zkoušení. Nejvíce se projevila výhoda testů u cyklického tepelného zatěžování, kde testy indentační lomové houževnatosti byly provedeny v zkušebních vzorcích bez nutné destrukce vzorku. Nevýhodou testů indentační lomové houževnatosti je nepřesnost a velké nároky na zkušenost pracovníka při vyhodnocování testu.

Z výsledků jednotlivých experimentů vyplývá, že hodnoty udávané výrobcem se ve většině případů mnoho nelišily a lze je považovat za relevantní.

Z výsledných hodnot jednotlivých experimentů vyplývá, že nejvyšších hodnot indentační lomové houževnatosti dosahoval slinutý karbid TSM33. Tento slinutý karbid dosahoval i nejvyšších hodnot lomové houževnatosti po tepelných zkouškách. Nejvyšší pevnost v ohybu na zkušebních tělesech bez opracování byla zjištěna u slinutého karbidu CTS20D. Nejvyšší tvrdost byla zjištěna u slinutého karbidu TSF22. Tvrdost slinutých karbidů TSM33 a CTS20D byla shodná.

Porovnáním výsledků z jednotlivých experimentů byl za optimální materiál pro výrobu monolitního vrtáku navržen TSM33, případně CTS20D. Tyto materiály dosahovaly nejvyšších hodnot lomové houževnatosti a pevnosti v ohybu a byly nejvíce tepelně stabilní. V současné době probíhá testování lomové houževnatosti u CTS20D, které má potvrdit vysokou lomovou houževnatost CTS20D.

## Použitá literatura

- [1] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 240s. ISBN 987-80-254-2250-2
- [2] HUDA D. Vlastnosti a struktury progresivních slinutých karbidů pro řezné nástroje. Bakalářská práce, ZČU v Plzni, 2011
- [3] HÁJEK Jiří. Proces výroby Přednášky z TZS
- [4] KRAUS, Václav, *Technologie tepelného zpracování a slinování*. Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-582-0
- [5] *Hand Book Vol. 18: Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee. Includes bibliographies and indexes. Contents: v. 18. Friction, lubrication, and wear technology*. United States of America 1992. ISBN 0-87170-377-7
- [6] Hluchý, M. a kol. *Strojírenská technologie*. První vydání., SNTL Praha 1979. ISBN 80-7183-265-0
- [7] BULÁNEK Jiří, *Teorie třískového obrábění*, Bakalářská práce, České Budějovice 2008
- [8] MANGL, Petr. *Optimalizace parametrů broušení slinutých karbidů diamantovými kotouči*, Diplomová práce, Brno 2009
- [9] KOSEK, Lukáš. *Lomová houževnatost kovových materiálů a její zkoušení*, Bakalářská práce, Brno 2011
- [10] Norma ČSN ISO 12737, 2011
- [11] HUMÁR, A., SEDLÁČEK, J. Materiály pro řezné nástroje. In *Proceedings of the 5th International Tools Conference, ITC 2006*. UTB Zlín, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 5.-6.9.2006, ISBN 80-7318-448-56.
- [12] D. K. SHETTY, I. G. WRIGHT, P. N. MINCER, A. H. CLAUSER, *Indentation fracture of WC-Co cermets*, USA Ohia 1984
- [13] Norma ČSN ISO 28079, 2010
- [14] W.D.Shubert et al, *Proceedings of the 14th International PLansee Seminar*, 1997
- [15] PENRICE, T.W. *Some Characteristics of Binder Phase in Cemented Carbides*, USA 1997

- [16] Doležalová, Petra, *Řezné materiály ze SK a jejich teplotní odolnost*. Bakalářská práce, Brno 2011
- [17] Gopal S. Upadhyaya, *Cemented tungsten carbides*, New Jersey 07675, 1998, ISBN: 0-81555-1417-4
- [18] KRAUS, Václav, *Povrchy a jejich úpravy*. Západočeská univerzita v Plzni 2000 ISBN 80-7082-668-1
- [19] BUBLÍKOVÁ P. Mechanické vlastnosti struktury kov - polymer. Bakalářská práce, ZČU v Plzni, 2010
- [20] Kalčos.V, Šosták.V , Hák.L. *Recyklace tvrdokovového odpadu HMZ-procesem*

### Internetové zdroje

- [21] Internetový odkaz: 2.10.2012 :  
<http://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/inhibitor>
- [22] Internetový odkaz: 2.12.2012  
<http://cs.wikipedia.org/wiki>
- [23] Internetový odkaz 23.3. 2013:  
[http://www2.sandvik.com/sandvik/0130/HI/SE03411.nsf/2433dace93a2ebe3c1256af400499915/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/\\$FILE/ATTYN87R/9100%20eng.pdf](http://www2.sandvik.com/sandvik/0130/HI/SE03411.nsf/2433dace93a2ebe3c1256af400499915/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/$FILE/ATTYN87R/9100%20eng.pdf)
- [24] Internetový odkaz: 22.8.2012 :  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/odolnost-slinutych-karbidu-proti-teplotnim-a-mechanickym-razum.html>
- [25] Internetový odkaz: 22.8.2012 :  
[http://www.allaboutcementedcarbide.com/01\\_02.html](http://www.allaboutcementedcarbide.com/01_02.html)
- [26] Internetový odkaz: 15.10.2012 :  
<http://www.gsxr.wz.cz/opotreb.htm>
- [27] Internetový odkaz 23.4. 2013:  
[http://www.ateam.zcu.cz/download/Interantikor\\_Kriz.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/Interantikor_Kriz.pdf)

## **Seznam příloh**

CD s elektronickou formou dat