



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POVRCHOVÉ ÚPRAVY NÁSTROJŮ PRO OBRÁBĚNÍ

Surface cutting of cutting tools of machining

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Miroslava KLUSKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Miroslava Klusková

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Povrchové úpravy nástrojů pro obrábění

v anglickém jazyce:

Surface coating of cutting tools for machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Celkový přehled povrchové úprav nástrojů pro obrábění různými technologiemi, zejména povlakovacími procesy.

Cíle bakalářské práce:

Úvod

Teoretický rozbor namáhání řezných nástrojů

Experimentální zkoušky a hodnocení řezivosti nástrojů

Moderní trendy v povlakování řezných nástrojů, jejich přínosy

Závěry

Seznam odborné literatury:

1. Bunshah, R.F. Handbook of hard coatings. Noyes Publications / William Andrew Publishing, N. York. 2001, pp. 550. ISBN 0-8155-1437-7.
2. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
3. FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástrojů. VŠ skriptum. Brno : CERM, 2006. s. 230. 1. vyd. ISBN 80-214-2374-9.
4. A.S. Argon , M.G.J. Veprek-Heijman , R.F. Zhang , S. Vepřek , S.H. Sheng Superhard nanocomposites: Origin of hardness enhancement, properties and applications. Surface & Coating Technology 204 (2010), pp. 1898-1906.
5. I. Galassi, M.G.J. Veprek-Heijman, P. Holubář, S. Vepřek, T. Cselle, M. Piška. Applications of hard and superhard nanocomposite coatings on tools for machining, forming and stamping – A Guide for SMEs. Vyšlo pod hlavičkou VINP (The Virtual Institute of Nano Films) Network of Excellence EXCELL, 6. Rámcový program EC; 3/2011. [21.11.2013]. Dostupné na World Wide Web:
<http://www.yumpu.com/en/document/view/9282201/virtual-institute-of-nano-films-applications-of-shm-cz>
6. TÖNSHOFF, H.K., KARPUSCHEWSKI, B., MOHLFELD, A., SEEGER, H.: Influence of Subsurface Properties on the Adhesion Strength of Sputtered Hard Coatings. Surface and Coatings Technology, 1999, Vol. 116-119, pp. 524-529.
7. JONES, M.I., McCOLL, I.R., GRANDT, D.M.: Effect of Substrate Preparation and Deposition Conditions on the Preferred Orientation of TiN Coatings Deposited by RF Reactive Sputtering. Surface and Coatings Technology, 2000, Vol. 132, pp. 143-151.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 21.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na povlakování řezných nástrojů. Na úvod bakalářské práce je zde přehled nástrojových materiálů. Dále teoretické rozebrání namáhání řezných nástrojů a zkoušky řezivosti. V závěru práce jsou popsány moderní trendy povlakování.

Klíčová slova

Povlakování, obrábění, řezný nástroj, řezivost, opotřebení.

ABSTRACT

The bachelor work is aimed to the surface coating of cutting tools. In introduction of this paper is an overview of tools materials. As additional here is theoretical analysis of loading and wear of cutting tools and some tests of cutting performance are include also. At the end of work some modern trends in coating are described also.

Key words

Deposition, cutting, cutting tool, coating, wear, cutting performance.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KLUSKOVÁ, Miroslava. *Povrchové úpravy nástrojů pro obrábění*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 59 s. 3 příloh. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Povrchové úpravy nástrojů pro obrábění** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum.....
Miroslava Klusková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavovi Piškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY	10
1.1 Nástrojové oceli uhlíkové	12
1.2 Nástrojové oceli legované.....	13
1.3 Nástrojové oceli rychlořezné	13
1.4 Stellity.....	13
1.5 Coronite	14
1.6 Slinuté karbidy.....	14
1.7 Slinuté karbidy s tvrdými povlaky.....	15
1.8 Cermety.....	15
1.9 Keramické řezné materiály	16
1.10 Kubický nitrid bóru.....	17
1.11 Polykrystalický diamant	17
1.12 Diamant.....	18
2 Teoretický rozbor namáhání nástroje	19
2.1 Mechanismy fyzikálně-mechanické	20
2.2 Mechanismy chemické	22
2.3 Řezné síly při obrábění	23
3 Experimentální zkoušky a hodnocení řezivosti nástrojů	26
3.1 Dlouhodobá zkouška trvanlivost	28
3.2 Krátkodobá čelní zkouška opotřebení.....	30
3.3 Stupně obrobitelnosti materiálů.....	31
3.4 Měření vhodného utváření třísky.....	32
3.5 Měření tvrdosti povlaku.....	32
3.6 Měření tloušťky povlakované vrstvy	33
3.7 Měření drsnosti povlaku	33
4 Povlakování slinutých karbidů.....	34
4.1 Metoda PVD	36
4.2 Metoda CVD.....	37
5 Moderní trendy povlakování.....	40

5.1	Nanokrystalické kompozity	41
5.2	Nanovrstvená struktura	42
5.3	Marwin [®]	43
5.4	Alwin [®]	45
5.5	Darwin [®]	45
5.6	Lubrik [®]	46
5.7	TripleCoatings ^{3®}	46
5.8	Larc [®]	48
	ZÁVĚR	50
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	51
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	55
	SEZNAM PŘÍLOH.....	59

ÚVOD

Jednou z důležitých výrobních metod ve strojírenství je technologie obrábění. Slouží k výrobě hotových kusů nebo výrobu nástrojů pro jiné výrobní technologie, jako jsou technologie tváření, slévání, stříhání, svařování, nekonvenční metody obrábění, atd. Tato metoda je založena na specifickém silovém působení nástroje ve tvaru klínu na obráběný materiál, za účelem vytvoření povrchu obrobku určitého tvaru, rozměrů a jakosti [1]. Chování řezného nástroje můžeme velmi ovlivnit provedením povrchových úprav. Kvalitně provedená povrchová úprava se může projevit ve zvýšení životnosti řezného nástroje, ve snížení velikosti řezných sil, v zamezení nalepování obráběného materiálu na nástroj, ve snížení teploty v místě řezu a v kvalitě povrchu obrobené plochy [2].

Výzkumná činnost v této oblasti je v současné době zaměřena zejména na rozvoj poznatků o vlastním procesu obrábění, na zvyšování výkonnosti řezných nástrojů, inovace obráběcích strojů a automatizaci řízení technologických procesů, charakterizované vysokým využitím počítačové podpory [1]. Tato práce je zaměřená na výzkum zvyšování výkonnosti a životnosti nástrojů díky povlakováním výměnných břitových destiček.

První povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu pro obrábění se na trhu objevily koncem 60. let 20. století (materiál GC125 firmy Sandvik Coromant, povlak TiC, tloušťka vrstvy 4 – 5 μm). Brzy nato byly vyvinuty povlaky typu TiN a TiCN, povlaky Al_2O_3 přišly na trh v polovině 70. let. Povlaky byly vytvářeny metodou CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování – patentováno Hintermannem, Rupertem a Swedlerem, pracovníky laboratoře LSRH ve Švýcarsku) jako jedno- i vícevrstvé, povlak Al_2O_3 vyžadoval vytvoření mezivrstev (např. TiC), aby byla zlepšena adhezní pevnost mezi povlakem a podkladem. Povlaky PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování) se objevily na začátku 80. let. Nejužívanějším povlakem PVD byl jednovrstvý TiN, získaný metodou reaktivní iontové implantace [3].

Na začátku vývoje postačovalo jen několik typů povlaků jako konkurence jiným nástrojovým materiálům. Každoroční zvyšování požadavků vede k vývoji a zdokonalování nových druhů povlakovaných slinutých karbidů pro různé řezné aplikace. Jednotlivé materiály se od sebe liší druhem povlaku, kombinací vrstev, tloušťkou povlaku, metodou povlakování, substrátem atd. Správná kombinace všech těchto faktorů je velmi důležitá, protože zejména na této skutečnosti závisí efektivnost a užití nástroje s povlakovanou břitovou destičkou [3].

1 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

V procesu obrábění je správné zvolení řezného materiálu důležitým faktorem, z hlediska produktivity. V dnešní době, díky celosvětovému materiálovému výzkum, je k dispozici široký sortiment řezných materiálů – od nástrojových ocelí po přírodní nebo syntetický diamant [1].

V roce 2013 společnost Pramet Tools, s. r. o. uvedla na trh novou generaci materiálů s označením UP!GRADE. To, co dělá tyto materiály lepší ve srovnání s původní generací, jsou nové substráty a rovněž nově vyvinuté MT-CVD a PVD povlaky. Například v oblasti soustružení je to řada T9300 s MC-CVD povlakem, která se skládá ze dvou členů:

- T9315 s trvanlivostí 14 pcs ($v_c = 205 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 0,3 \text{ mm.ot}^{-1}$, $a_p = 2,5 \text{ mm}$),
- T9325 s trvanlivostí 12 pcs ($v_c = 180 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 1 \text{ mm.ot}^{-1}$, $a_p = 3,5 \text{ mm}$).

Základ materiálu tvoří funkčně gradientní substrát, jehož povrchová vrstva je obohacena kobaltovým pojivem. Toto řešení kombinuje vysokou tuhost, tvrdost a odolnost vůči plastické deformaci s mimořádnou odolností ke vzniku a šíření trhlin [4] [5] [6].

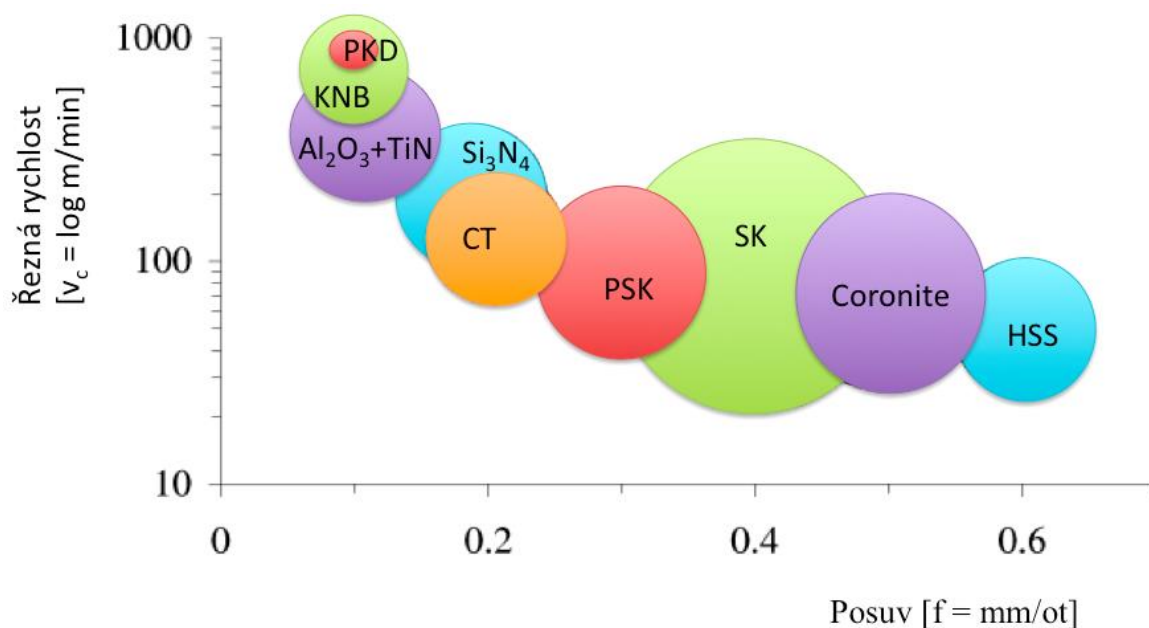
Řada s PVD povlakem se sestává ze tří členů:

- T8315 s tvrdostí 200 HB ($v_c = 165 \text{ a } 190 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm.ot}^{-1}$, $a_p = 2,0 \text{ mm}$),
- T8330 – 170 HB ($v_c = 100 \text{ a } 150 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm.ot}^{-1}$, $a_p = 1,5 \text{ mm}$),
- T8345 mající tvrdost 204 HB ($v_c = 85 \text{ a } 110 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm.ot}^{-1}$, $a_p = 2,5 \text{ mm}$).

Tyto materiály jsou založeny na kombinaci submikronového substrátu s různým množstvím kobaltové pojiví fáze. Na materiálu je nanesen nový PVD povlak. Povlak vyniká díky optimální kombinaci tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a rovněž díky výborné adhezi k matici ze slinutého karbidu [4] [5] [6].

Dosud neexistuje žádný univerzální materiál, který by byl vhodný na všechny obráběné materiály. Každý z řezných materiálů je vhodný jen pro určité aplikace. Obr. 1 shrnuje vlastnosti moderních materiálů a jejich popis je v tab. 1. Materiál nástroje, jeho geometrie, rozměry a další parametry musí splňovat vysoké (často i protichůdné) požadavky a jeho výběr záleží zejména na [1]:

- rozměrech obrobku, jeho tvaru, druhu obráběného materiálu, sériovosti výroby,
- technologii výroby polotovaru, stavu povrchové kůry, druhu vměstků, jejich distribuci,
- tvaru a druhu řezu – řez plynulý nebo přerušovaný, podmínkách chlazení a mazání,
- obráběcím stroji – druhu, fyzickému stavu, jeho ekonomické provozní náročnosti,
- finanční náročnosti řezného materiálu, nákladů na jeho provoz a údržbu,
- odolnosti proti opotřebení – fyzikálnímu i chemickému, zvláště zatížení za tepla,
- požadavcích na kvalitu obrobku,
- požadavcích na spolehlivost, bezpečnost a ekologii obráběcího provozu,
- možnosti recyklace nebo likvidace bezpečné likvidace opotřebovaného nástroje.



Obr. 1 Schématické znázornění poměrných vlastností mezi různými nástrojovými materiály [7]

Tab. 1 Moderní nástrojové materiály [7] (některé označení nejsou standardizované).

Označení	Materiál	Popis
PSK	Povlakovaný slinutý karbid	Tvrde povlaky (TiC, TiN, Al_2O_3 a TiCN) zvyšují odolnost proti opotřebení. Tyto povlaky mohou být vícevrstvé. Mají vysokou teplotní i chemickou stabilitu mezi pracovním prostředím a nástrojem.
SK	Nepovlakovaný slinutý karbid	Tvoří společně s PSK a CT druhou běžnou technickou skupinu materiálů (přibližně 45%). SK je tuhý materiál, skládající se z karbidové matrice (WC, TiC, TaC a NbC) a pojivové fáze (Co).
CT	Cermet	CT má tvrdou matici (TiC, TiCN a/nebo TiN) s kovovou nebo keramickou pojivovou fází.
PKD	Polykrystalický diamant	Nástroj ze syntetického diamantu dosahuje maximální tvrdosti a má silnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Teplota v řezné zóně je limitována 600°C . Tento materiál není vhodný pro obrábění železných materiálů, kvůli chemické afinitě. Poskytuje dobrý povrch a tolerance.
KNB	Kubický nitrid bóru	Materiál s vysokou tvrdostí při vysoké řezné teplotě. Řadí se mezi kalené oceli, litiny a práškové kovy.
HSS	Rychlořezná ocel	Stále nejvíce používaný materiál (cca 50%). Rychlořezná ocel je velmi tuhá.
	Coronite	Skládá se z malé TiN matrice v ocelové pojivové fázi. Využívají se pro malé stopkové frézy.

Nejvíce namáhaná část řezného nástroje je břit. Břit musí odolávat velkému mechanickému namáhání, velkým měrným tlakům a teplotám. Proto základními požadavky na nástrojový materiál je vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení za pracovní teploty a dostatečná houževnatost. Používají se nástrojové oceli různého druhu, odlévané slitiny Co-Cr-W, slinuté karbidy i nekovové materiály [8]. Díky povlakům na břitových destičkách lze

snížit opotřebení břitu tím, že povlak lépe klouže po obrobku, snižuje se tím tření resp. teplota při řezání. Snížením opotřebení nástroje se zvyšuje jeho životnost.

Opotřebení se označuje jako poškození nástroje, úbytkem materiálu z povrchu nástroje způsobeným vzájemným pohybem nástroje a obrobku. Projevem opotřebení je trhлина nebo lom, vznikající přetížením nástroje (jednorázovým přetížením nebo cyklickým namáháním).

Houževnatost resp. lomová houževnatost je materiálová charakteristika. Jedná se o odpor materiálu vůči vzniku a následnému růstu trhliny. Lomovou houževnatost lze z praktického hlediska charakterizovat jako schopnost materiálu absorbovat energii před porušením nebo před dosažením tzv. mezního stavu. Houževnatost lze vyjádřit velikostí mechanické práce potřebné k vytvoření deformace nebo porušení.

Tvrdość materiálu je popisována jako odpor materiálu vůči vnikání cizího tělesa. Nejčastější zkoušky tvrdosti jsou zkoušky podle Vickerse, Rockwella a Brinella. Berkovich. Jako příloha 2. je úryvek z článku, od N. A. Sakharova, J. V. Fernandes, J. M. Antunes, M. C. Oliveira z publikace International Journal of Solid and Structures 46 (2009), pojednávající o výzkumu vlivu geometrie indikátorů na výsledky zkoušek tvrdosti.

Pro výrobu řezných částí nástrojů se obecně používá těchto nástrojových materiálů [9]:

- nástrojové oceli uhlíkové,
- nástrojové oceli nízkolegované,
- rychlořezné oceli, vysokolegované, (obsahují 0,65 až 1,45% C, 3,8 až 4,8% Cr, 5,5 až 19% W, 0,5 až 5,5% Mo, 1,0 až 4,7% V, 4,2 až 10% Co),
- stellite,
- coronite,
- slinuté karbidy,
- slinuté karbidy s tvrdými povlaky,
- cermety,
- keramické nástrojové materiály, KM,
- polykrystalický kubický nitrid bóru, KNB,
- polykrystalický diamant, PKD,
- přírodní diamant.

V aplikaci na automatizované výrobní linky a obráběcí centra se zpravidla používají nástroje s vyměnitelnými destičkami ze slinutého karbidu, včetně povlakovaných destiček, a to v rozsahu cca 80%. Ve zbývajícím rozsahu nástroje z rychlořezné oceli, zejména v aplikaci na tzv. osové nástroje (vrtáky, výhrubníky, výstružníky, tvarové nástroje) [9].

1.1 Nástrojové oceli uhlíkové

Tyto oceli (např. ČSN 19 083, 19 096, 19 103, 19 125, 19 132, 19 133, 19 152, 19 191, 19 192, 19 221, 19 222, 19 255) jsou kaleny z austenitizačních teplot (790-830°C) rychlým ochlazením ve vodě nebo oleji, čímž se dosahuje martenzitické struktury [1].

Řízená přeměna zbytkového austenitu kombinací obvyklých technologií tepelného zpracování se zmrazováním je často technicky i ekonomicky nejvhodnější metoda, jak dosáhnout požadovaných vlastností materiálu. Kapalný dusík (-196°C) lze využít několika způsoby. Mezi základní varianty patří např. přímé zmrazování ponorem, mražení pomocí sekundární organické látky (metylcyklohexan nebo trichloretylen) a v současné době nejpoužívanější zchlazování nástřikem kapalného dusíku do chladicího prostoru mrazicí skříně [10].

Uhlíkové nástrojové oceli se úspěšně aplikují jako čepelové oceli (kalené pásy), pro které se využívají nadeutektoidní oceli, které obsahují nadeutektoidní cementit o tvrdosti vyšší než martenzit. Při obrábění oceli a litiny se musí pracovat velmi malými řeznými rychlostmi a jejich použití ve strojní výrobě a obrábění kovových materiálů je obecně neefektivní [1].

1.2 Nástrojové oceli legované

Hlavním smyslem legovaných nástrojových ocelí je dosáhnout vyšší prokalitelnosti nástrojových ocelí a snížení intenzity ochlazování tak, aby byly nástroje z těchto materiálů zakaleny (až do tlouštěk 130-150 mm) samovolně již na vzduchu, případně proudem vzduchu a měly dostatečnou odolnost proti abrazi. Dominantní použití je např. při výrobě forem, tvarových nástrojů, stříhadel, atd. [11].

Vysocelegované oceli (s velkým obsahem Cr, Mn) bývají často subledeburitické nebo ledeburické, s velmi malou rozměrovou změnou nástrojů po kalení a odolné proti opotřebení [11].

1.3 Nástrojové oceli rychlořezné

Tvrdost vysokolegovaných ocelí je dána zakalením na martenzit a přítomností karbidů legujících prvků Cr, W, Mo, V, které se slučují s uhlíkem obsaženým v oceli. Vzniklé karbidy jsou velmi tvrdé a forma, jakou jsou karbidy vyloučeny, ovlivňuje tvrdost oceli. Vysokou prokalitelnost umožňuje vysoký obsah legujících prvků. Nízká možnost vzniku deformací je díky relativně nízkým ochlazovacím rychlostem. Ochlazování se zpravidla provádí stupňovitě, tj. postupně v několika prostředích o různé teplotě [9].

Vysokolegované rychlořezné oceli mohou být užity při pracovní teplotě přibližně až 600°C . Proto jsou používány pro výkonné řezné nástroje vystavené nárazům při přerušovaném řezu, jako jsou nože, tvarové nástroje, frézy, vrtáky, závitořezné nástroje, výstružníky a další [9].

1.4 Stelity

Tvrdost a řezivost těchto řezných slitin je dána přítomností velkého množství karbidů chromu a wolframu. Stelity obsahují 2 až 4% C, 20 až 40% Cr, 10 až 30% W, 30 až 55% Co, dále menší množství niklu, molybdenu a dalších prvků. Přítomnost železa ve stellitech nemá být vyšší než 10% a jeho přítomnost je brána jako nečistota. Stelity jsou křehké, běžnými nástroji neobrobitelné, nekujné a tepelné zpracování se u nich neprovádí. Nástroje ze stellitů se odlévají a to buď v celku nebo jako břitové destičky a po odlití se pouze přebrousí [9].

1.5 Coronite

Coronite (produkt Sandvik Coromant) překlenuje mezeru mezi HSS a slinutými karbidy. Tyto nástroje, vyráběné práškovou metalurgií, sestávají z ocelového jádra (z pružinové oceli), obvodovou vrstvou z tepelně zpracované směsi HSS a zrn TiN (tloušťka činí 15% průměru a obsahuje až 50% TiN, což znamená přibližně 2x více než klasická HSS) a vnějšího povlaku TiN, resp. Ti(C,N). Velmi jemné a tvrdé fáze dávají břitu ostrost a fáze HSS možnost jemného výbrusu i houževnatost. Mezi povlakem a substrátem se dosahuje velmi pevné vazby bez rizika delaminace. U těchto nástrojů (převážně stopkových fréz čelních) byl pozorován i určitý druh „samoostření“, podobný jevu při broušení.

Řezný materiál je vhodný pro obrábění slitin titanu, lehkých neželezných kovů a šedé litiny [11].

1.6 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou řezné materiály obsahující částice tvrdých karbidů či nitridů (wolframkarbid, titankarbid, karbid tantalu, nitrid titanu, kubický karbonitrid), navzájem vázané kovovým pojivem, tvořeným ve většině případů kobaltem [12].

Velikost tvrdých částic se pohybuje zhruba od 0,1 μm do 10 μm a jejich množství představuje 80 – 95 % celkového objemu. Druh, velikost, rozmístění tvrdých částic a jejich procentní podíl spolu s druhem pojiva určují tvrdost a další mechanické a tepelně-chemické vlastnosti slinutého karbidu. Vyšší podíl tvrdých částic způsobuje vyšší tvrdost a vyšší odolnost proti opotřebení; vyšší podíl pojiva zvyšuje houževnatost, ale i náchylnost k plastické deformaci. Odolnosti vůči plastické deformaci napomáhá gradientní složení slinutého karbidu, kdy velmi tvrdé karbonitridy se koncentrují v blízkosti břitu, kde je vysoká tvrdost nejvíce zapotřebí a naopak, vyšší podíl pojiva ve větší vzdálenosti od břitu brání vzniku trhlin a lomů. Nejmenší velikost tvrdých částic zvyšuje pevnost ostré řezné hrany a odolnost proti tepelným trhlinám a cyklickému namáhání; typickými aplikacemi jsou proto monolitní stopkové nástroje [12].

Skupina K (resp. slinuté karbidy typu WC-Co), obsah kobaltu bývá 4-12% a rozměry zrn karbidů jsou v rozsahu od 0,2 až 10 μm . Tato skupina je určena pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobnou třísku (zejména pro litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály) [11].

Skupina P (typ WC+TiC/TaC+Co) je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku, jako jsou uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli [11].

Skupina M obsahuje velké množství různých karbidů, má univerzální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jakou jsou lité oceli austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Vzhledem k relativně vysoké houževnatosti se SK této skupiny též často používají pro těžké hrubovací a přerušované řezy [11].

Skupina N je určena pro obrábění měkkých materiálů jako jsou slitiny hliníku.

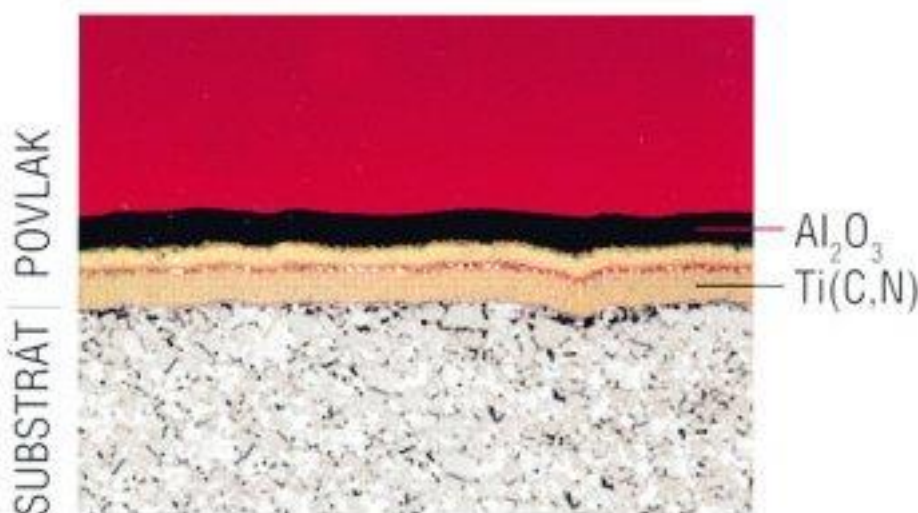
Skupina S je určena pro obrábění žárovzdorných slitin.

Skupina H je určena pro obrábění tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů.

1.7 Slinuté karbidy s tvrdými povlaky

Jsou kombinované materiály sestávající z tvrdých karbidů, jsou však křehké a mají sklon k vydrolování. Díky karbidům se získá vysoká tvrdost při vysokých teplotách a odolnost proti opotřebení. Tvrdost a odolnost se zvyšuje použitím povlaku karbidu titanu TiC, nitridu titanu TiN nebo oxidu hlinitého Al_2O_3 [24]. Ukázka naneseného povlaku je na obr. 2. Dále jsou také povlaky na bázi (Ti, Al)N, (Ti, Al, Si)N a (Al, Ti)N [11].

Při optimálním poměru jednotlivých složek lze dnes vytvořit termodynamicky poměrně stabilní struktury s unikátními fyzikálními vlastnostmi. Např. u systému nanokrystalických kompozitů na bázi (Al, Ti)N- Si_3N_4 může tvrdost povlaku dosáhnout nad 50 GPa a blížit se tvrdosti diamantu. V praxi se uplatňují povlaky obecně monovrstvé, vícevrstvé a gradientní. Podmínkami úspěšné aplikace těchto vrstev je mj. jejich tvrdost, adheze k substrátu a drsnost ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$) [11].



Obr. 2 Složení materiálu 2230 (Pramet Tools) [12].

Povlakované slinuté karbidy jsou vyráběny tak, že na podkladový materiál (původně běžný SK typu K, P nebo M, dnes speciální SK) se nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení (povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě). Tyto výhodné vlastnosti vyplývají zejména z toho, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů (póry, dutiny) a tvoří bariéru proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje [13].

1.8 Cermety

Cermety jsou řezné materiály, u kterých je WC nahrazen převážně TiC, TiN nebo Ti(C, N) s niklovým nebo Ni/Co pojivem. Vynikají vysokou odolností proti difuznímu oxidačnímu opotřebení, vysokou chemickou stabilitou, tvrdostí za tepla a odolností vytvářet nárůstek. Jsou vhodnými materiály pro dokončovací obrábění vysokými reznými rychlostmi a nízkými průřezy třísek [11].

Vysoký výkon při soustružení uhlíkových a slitinových ocelí přináší nově vyvinuté cermetové materiály společnosti Tungaloy Corporation s označením NS9530 a GT9530

(obr. 3). Vylepšením oproti předešlým materiálům je soudržnost mezi základním cermetem a povrchovou vrstvou.



Obr. 3 Tungaloy Corporation povlakované a nepovlakované destičky [14].

První novinkou s označením NS9530 je nepovlakovaný cermet využívající povrchovou technologii PremiumTec, která snižuje mikronerovnosti na povrchu destičky, což přispívá k prodloužení životnosti nástroje. Tento materiál je doporučen pro dokončovací až střední obrábění.

Materiál GT9530 je více vhodný pro aplikace soustružení při vysokých řezných podmínkách. Stejně jako NS9530 je i GT9530 schopný odolávat opotřebení a vylamování ostří v širším rozsahu otáček a posuvů. Výhodou obou druhů cermetových materiálů je, že lze využít s prakticky celým spektrem utvařečů u pozitivních i negativních destiček [14].

1.9 Keramické řezné materiály

Hlavní uplatnění keramických nástrojů je při obrábění šedé litiny, tvárné litiny, cementačních ocelí, nástrojových a rychlořezných ocelí, slitin odolných proti žáru a zčásti i ocelí [9].

Oxidová keramika, se skládá z oxidu hlinitého (Al_2O_3), s přísadou oxidu zirkoničitého (ZrO_2), která brání vzniku a šíření trhlin. Takto vytvořený materiál je chemicky velice stabilní, ale postrádá odolnost proti tepelným šokům.

Smíšená keramika (obr. 4a) je vyztužená přísadou kubických karbidů nebo karbonitridů (TiC , $Ti(C,N)$), tím je dosaženo zvýšení houževnatosti a zlepšení tepelné vodivosti.

Keramika vyztužená whiskery (obr. 4b), jmenovitě whiskery karbidu křemíku (SiC_w), se vyznačuje razantním nárůstem houževnatosti a umožňuje použití řezné kapaliny. Řezná keramika vyztužená whiskery je ideální pro obrábění slitin niklu.

Keramika z nitridu křemíku (Si_3N_4) (obr. 4c) představuje další skupinu keramických materiálů. Krystaly podlouhlého tvaru tvoří materiál se schopností "samovyztužení" a s vysokou houževnatostí. Keramika na bázi nitridu křemíku je velmi vhodná pro obrábění šedé litiny, ale nedostatečná chemická stabilita limituje její použití pro ostatní typy obráběných materiálů.



Obr. 4 Keramické řezné materiály: a) smíšená keramika; b) keramika vyztužená whiskery; c) keramika z nitridu křemíku [15].

Sialon (SiAlON) je keramika, která kombinuje pevnost “samovyztužitelné” sítě z nitridu křemíku a vysokou chemickou stabilitu. Sialonové keramiky jsou ideální pro obrábění žárovzdorných slitin [15].

1.10 Kubický nitrid bóru

Přírodní nitrid bóru je pro řezné účely nevhodný pro svou hexagonální mřížku. Až po tepelné transformaci mřížky na kubickou se stává kubický nitridy bóru druhým nejtvrdějším materiálem vedle diamantu [16].

Nástroje a vyměnitelné břitové destičky osázené KBN se používají při obrábění bílé litiny s tvrdostí nad 50 HRC, legované litiny a tvrdých návarů [16]. Dále se nástroje KBN využívají pro obrábění ocelových výkovek, kalené oceli a litiny, povrchově kalené obrobky, slinované materiály na bázi kobaltu a železa a žáruvzdorné slitiny [1].

Při opracování těmito nástroji je jeho životnost mnohonásobně vyšší než u podobných nástrojů ze slinutého karbidu (SK) či řezné keramiky. Tím se sníží neproduktivní čas, potřebný pro výměnu nástroje a zvýší se rozměrová přesnost důsledkem nižšího otěru destičky [16].

1.11 Polykrystalický diamant

PKD se skládá z diamantových částic slinutých dohromady pomocí kovového pojiva. Diamant je nejtvrděší, a tudíž proti otěru nejodolnější, ze všech materiálů. Jako nástrojový materiál má velmi dobrou odolnost proti otěru, ale postrádá chemickou stabilitu za zvýšených teplot a má vysokou afinitu k železu [17].

Diamanty dělíme zásadně na dvě skupiny - přírodní a syntetické. Oba uvedené druhy se vyskytují ve tvaru monokrystalickém a polykrystalickém. Přírodní diamanty mají pro obrábění podřadný význam, neboť jsou nejen nesmírně drahé, ale i technologicky méně výhodné než diamanty vyráběné synteticky [16].

Nástroje a vyměnitelné břitové destičky (VBD) osázené PKD (obr. 5) se používají pro obrábění neželezných kovů a slitin, jako jsou např. hliník a jeho slitiny, měď, mosaz, bronz, titan a jeho slitiny. Jedná se vesměs o materiály, jejichž teplota tavení leží pod 700 °C a nemají afinitu k uhlíku. Stále více se tyto nástroje užívají při obrábění keramických a plastických hmot, grafitových hmot, gumy a jiných kompozitních materiálů s abrazivní složkou. Vynikající výkonnost a trvanlivost řezných nástrojů osázených PKD nabízejí možnosti použití zejména ve velkosériové výrobě [16].



Obr. 5 Výměnitelná břitová destička s PKD břitem [17].

1.12 Diamant

Diamant je nejtvrdší ze všech materiálů. Jeho vysoká tvrdost vychází z jeho struktury, ve které je každý uhlíkový atom kovalentně vázán k dalším čtyřem atomům, umístěných ve vrcholech čtyřstěnu. Jeho tvrdost odpovídá přibližně hodnotě 6 000 až 10 000 HV [11].

Monokrystalické přírodní diamanty se využívají v řadě průmyslových odvětví jako součást měřicích přístrojů – indentory, doteky. Pro obrábění lze z těchto přírodních diamantů získat dokonalé ostří, umožňující obrábět součásti s velkou přesností [11].

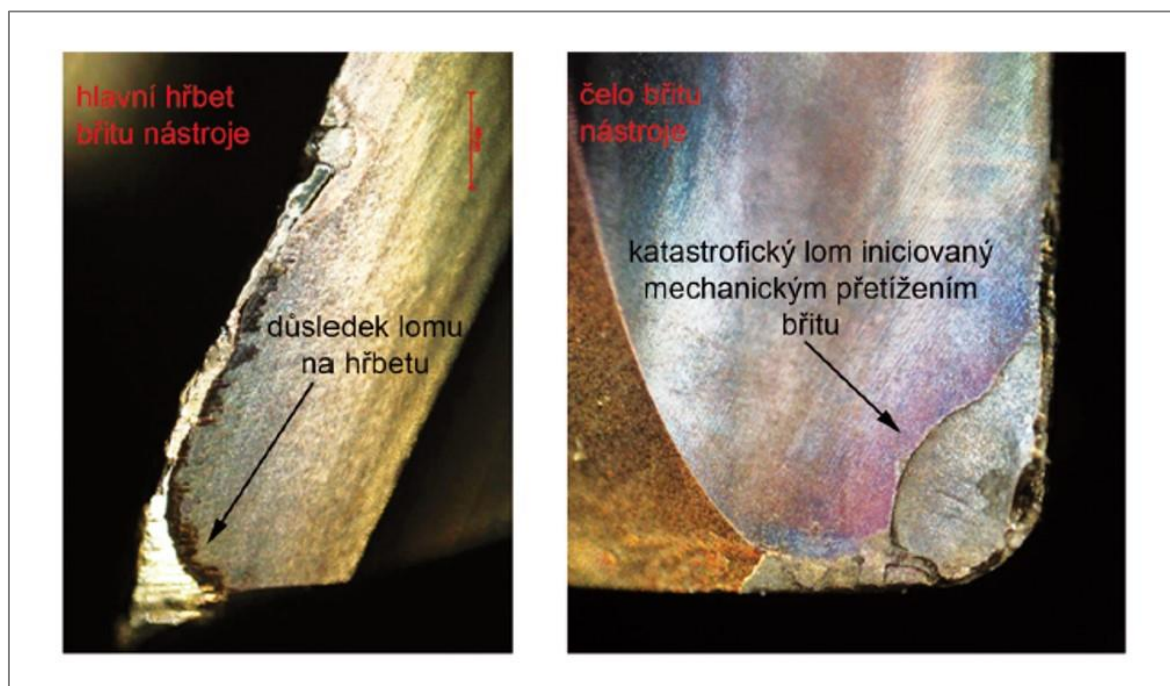
Diamant se rychle opotřebovává i při obrábění niklových slitin. Obecně není tento materiál doporučován pro obrábění materiálů s vysokým bodem tavení. Na druhé straně je diamant vhodný pro obrábění nekovových materiálů, umělých hmot, keramiky, materiálů vyztužených skelnými, aramidovými, kevlarovými, uhlíkovými vlákny a dalších [11].

V devadesátých letech byla zvládnuta technologie nanášení diamantu metodou CVD. Tloušťka takto nanášené vrstvy je 2 až 5 μm a nanáší se na nástroje ze slinutého karbidu, které se iontově čistí a zbavují kobaltu v povrchových vrstvách (leptáním) pro kvalitní zakotvení tvrdé a otěruvzdorné vrstvy [11].

2 TEORETICKÝ ROZBOR NAMÁHÁNÍ NÁSTROJE

Řezný nástroj je v bezprostředním kontaktu s obrobkem. Působí na něj určitou silou za určité rychlosti. To zapříčiňuje vysoké mechanické, tepelné a chemické namáhání řezných nástrojů. Mechanické zatížení nástroje souvisí s rozložením řezných sil, které způsobují namáhání nástroje. Ke zvýšení mechanického zatížení přispívá tepelné namáhání, které může způsobovat pnutí materiálu. Působením tepla v některých případech dopomáhá k chemickému namáhání ve formě reakcí a difuze [20]. Vlivem namáhání nástroje dochází k opotřebení (obr. 6) funkčních částí nástroje, které vede ke konci doby trvanlivosti.

Opotřebení je běžným důsledkem funkce všech strojních součástí, které jsou ve vzájemném silovém kontaktu a relativním pohybu. Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu nástroj-obrobek a nástroj-tříška, i ke kontaktu nástroje s obrobkem (na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje) a docházející třískou (na čele nástroje), což musí nutně vést k opotřebení nástroje. Podmínky práce řezného nástroje se zásadně liší od podmínek práce běžných strojních součástí [1].



Obr. 6 Opotřebení hlavního hřbetu a čela řezného nástroje [2].

Při obrábění načisto je hlavní požadavek vysoká kvalita obrobeného povrchu, proto už relativně malé šířky plošek opotřebení na břitu mohou tuto kvalitu zhoršit a břit je považován za opotřebovaný. Naproti tomu u hrubovacích operací, kde sice dochází k vyššímu opotřebení, ale není zde požadavek na kvalitu obrobeného povrchu, se kritériem opotřebení stává neschopnost kontrolovaného odvodu třísky nebo hrozící riziko náhlého lomu destičky [11].

Opotřebení břitu nástroje je nevyhnutelné, a jako takové není bezpodmínečně negativním jevem. Dosáhl-li břit za přijatelnou dobu značného objemového výkonu obrábění, pak je to samozřejmě pozitivní část procesu. Obrat negativním směrem nastane teprve při předčasném poklesu výkonu, nebo při lomu nástroje [11].

Proces opotřebení nástroje závisí na mnoha faktorech – na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu (zejména druh polotovaru), druhu obráběcí operace a řezu (plynulý nebo přerušovaný), geometrii nástroje, řezných podmínkách, atd. [1] [11].

Trvanlivost řezného nástroje T (min) lze definovat jakou součet všech čistých časů řezání, od začátku obrábění, až po opotřebení břitu nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (kritérium opotřebení a jeho hodnota musí být stanoveny tak, aby vyráběný obrobek měl požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu a to po celou dobu trvanlivosti nástroje). Trvanlivost nástroje, podobně jako opotřebení nástroje, závisí zejména na metodě obrábění (soustružení, frézování, vrtání, atd.), vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách (řezná a posuvová rychlost, šířka záběru ostří, řezné prostředí) [1].

Životnost nástroje Z (min) je pak definována jako součet všech jeho trvanlivostí, nebo též jako celková doba funkce nástroje od prvního uvedení do činnosti až do jeho vyřazení (nástroje, které lze ostřit jsou vyřazeny v případě, že byla odbroušena celá jejich funkční část, vyměnitelné břitové destičky v případě, že byly použity všechny jejich břity). Z tohoto hlediska lze tedy životnost n -krát přebroušovaného nástroje vyjádřit vztahem [1]:

$$Z = 1 + \sum_{1}^{n} T_i \quad (2.1)$$

Životnost vyměnitelné břitové destičky nástroje lze vyjádřit vztahem:

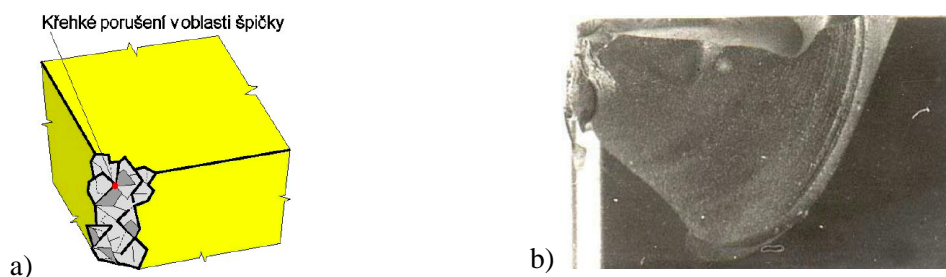
$$Z = p \cdot \sum_{1}^{n} T_i \quad (2.2)$$

kde n vyjadřuje počet využitelných břitů na jedné straně destičky a p vyjadřuje, zda je břitová destička jednostranná ($p=1$) nebo oboustranná ($p=2$).

Není jednoduché předpovídat formu nebo mechanismus opotřebení řezného nástroje, ale na jeho průběhu závisí ekonomika a výnosnost výroby [1].

2.1 Mechanismy fyzikálně-mechanické

Křehký lom břitu – je důsledkem vysokého mechanického zatížení nebo krátkodobého přetížení břitu, např. v důsledku nárazu břitu na tvrdou fázi, vměstek v obráběném materiálu, při přerušovaném řezu nebo náhlé změně průřezu třísky (obr. 7) [1].



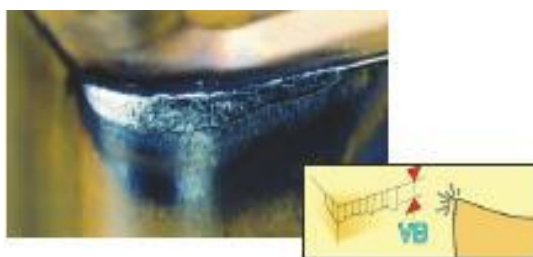
Obr. 7 Křehký lom: a) schéma; b) křehký lom nástroje z řezné keramiky $Al_2O_3 + TiC$

Plastická deformace – je důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, které se může projevit extrémně i ve formě tzv. lavinového opotřebení. Zahrnuje odpevnění substrátu (např. martenzitu v HSS), nebo deformaci pojiva (kobaltu/niklu u slinutých karbidů) (obr. 8) [1].



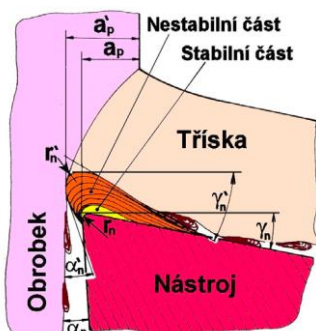
Obr. 8 Plastická deformace řezného nástroje [18]

Abraze – brusný ořez vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročásticemi nástroje, uvolněných z břitu (obr. 9). Schopnost břitu odolávat abrazivnímu ořezu je z větší části závislá na jeho tvrdosti. Řezný materiál, který obsahuje hustou strukturu tvrdých částic, bude abrazivnímu ořezu odolávat dobře, avšak nemusí stejně dobře odolávat také jiným mechanismům opotřebení [1].

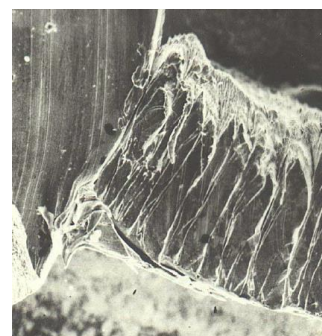


Obr. 9 Abrazivní opotřebení hřbetu destičky [18]

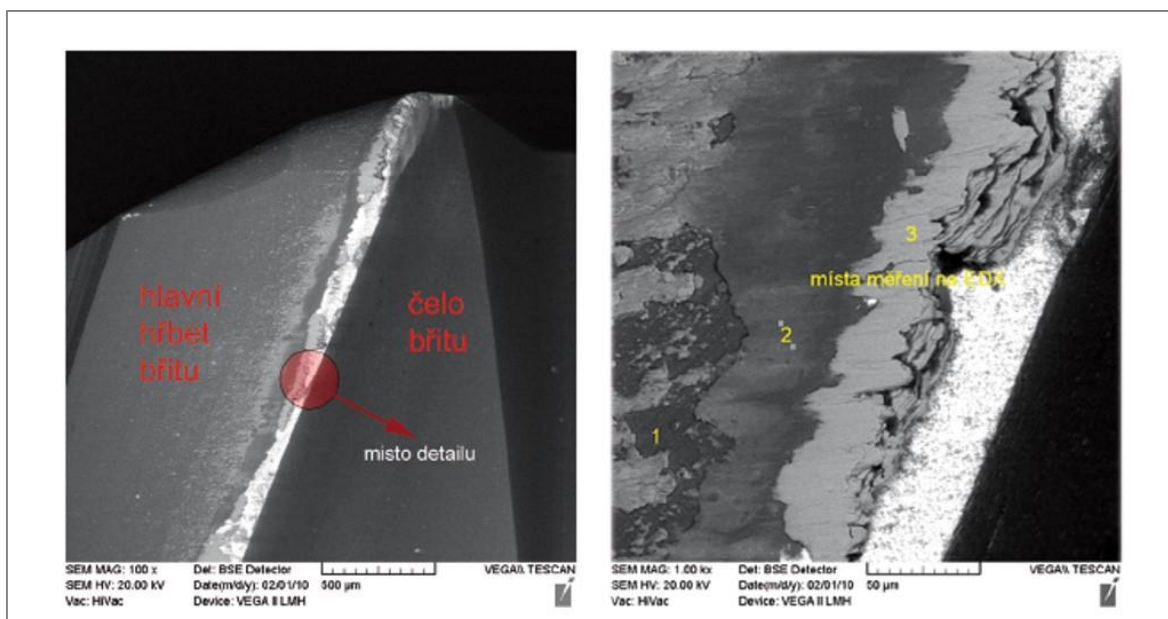
Adheze – tento typ opotřebení je způsobován tlakovým navařováním částí třísky na břitovou destičku (obr. 12). Nejčastěji k němu dochází při obrábění materiálů snadno ulpívajících na břitu, jako jsou nízkouhlíkové oceli, korozivzdorné oceli nebo hliník [18]. Je významný při nižších řezných rychlostech, kdy vzniká bodový styk mezi třískou a nástrojem a kdy je umožněno adhezní spojení obou materiálů. Prohlubuje se tak sklon ke vzniku nárůstku na břitu nástroje, který je znázorněno na obr. 10 a 11. Za určité (kritické) řezné rychlosti může mít velmi intenzivní průběh, naopak zvýšením řezné rychlosti může prakticky zaniknout [1].



Obr. 10 Nárůstek



Obr. 11 Nárůstek u kořene třísky



Obr. 12 Rozbor adheze materiálu břítu k materiálu a povlaku:

- (1) povlak se stopami materiálu; (2) povlak s ulpělou souvislou vrstvou materiálu obrobku;
 (3) obnažený karbid s ulpělým materiálem [2]

Teplotní trhliny – vytváření hřebenovitých trhlin kolmých na dilatující část břítu na čele i hřbetě nástroje (obr. 13) [1].



Obr. 13 Teplotní trhliny na břítu nástroje [18].

Delaminace vrstev CVD, PVD – v důsledku nevhodné technologie výbrusu nebo povlakování (velká zbytková napjatost), kontaminace mezifázového rozhraní, nevhodného režimu čištění substrátu před povlakováním [1].

Poškození břitů nástrojů v důsledku **chvění a vibrací soustavy** stroj-nástroj-obrobek.

Únava materiálu – v důsledku cyklického namáhání řezného nástroje.

2.2 Mechanismy chemické

Difúze – migrace atomů z obráběného materiálu do nástrojového a naopak, v důsledku které se vytváří nežádoucí mezikovové sloučeniny ve struktuře nástroje. K difúzi železa do kobaltu a kobaltu do železa dochází u slinitých karbidů již za teploty 680°C, velmi intenzivní je za teplot cca 900°C (u f.c.c. mřížky železa), další prvky difundují za vyšších teplot – wolfram (900°C-950°C), titan (1050°C-dosociace, 1200-1500°C-reaktivní difúze), přičemž se vytváří karbidy obecného typu M_6C - Fe_3W_3C , $(Fe,W)_6C$ nebo $M_{23}C$ $(Fe,W)_{23}C$, které jsou velmi křehké a degradují vlastnosti řezného materiálu. Uvolněný

uhlík při obrábění oceli přechází do železa, kde vytváří tuhý roztok (v b.c.c. i f.c.c. mřížce) a je odváděn třískou. Teplota řezání, chemické vlastnosti nástrojového materiálu a jeho afinita vůči materiálu obrobku jsou rozhodujícími činiteli pro vznik a průběh difúzního opotřebení. Na tomto procesu má tvrdost materiálu jen relativně malý podíl. O podílu difúzního opotřebení na celkovém opotřebení rozhoduje chemické složení řezného nástrojového materiálu a materiálu obrobku [1].

Tvorba chemických sloučenin – oxidace (reaktivní vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku např. přítomnosti kyslíku a oxidace v okolním prostředí) [1].

Interkrystalické zeslabování pojivových vazeb – v důsledku odleptání pojiva (kobaltu, niklu) nebo koroze mezifázového rozhraní [1].

Termo-elektrické opotřebení – odstraňování elektricky vodivého materiálu z funkčních povrchů nástroje – např. při obrábění elektrotechnické čisté mědi [1].

Kombinace výše uvedených mechanismů – Jednotlivá pásma dávají možnost rozlišit abrazivní a adhezni otěr, resp. chemické reakce při opotřebování nástroje. Intenzita dílčích mechanismů souvisí s teplotou řezání, ale i koncentračními gradienty mezi třískou a nástrojovým materiálem, zbytkovou napjatostí, druhem chlazení, mazání a dílčí mechanismy se mohou časově překrývat, střídat nebo jinak měnit [1].

Na skutečnost, zda se nástroje bude více opotřebovávat na hřbetě nebo na čele (příp. na špičce), mají výrazný vliv i další faktory, jako je např. geometrie nástroje, druh operace (hrubování, dokončování) a v neposlední řadě i řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, hloubka řezu a chlazení) [1].

Řezné podmínky v kombinaci s třením mezi nástroji a obrobkem vyvolávají velké koncentrace tepla na řezné hraně a taktéž na celé straně nástroje, což je jednou z hlavních příčin nástrojového opotřebení. Jedním z velmi úspěšných opatření proti těmto nepříznivým jevům byl vývoj tvrdých otěruvzdorných povlaků na ochranu nástrojových povrchů. V současné době jsou na trhu k dostání kvalitní povlaky jako TiN, TiCN, TiAlCrN a TiAlN pro řezné nástroje. Tyto povlaky se vyznačují velkou tvrdostí a mimořádně hladkým povrchem. TiN povlak má například tvrdost okolo $2\,000\text{ kg}\cdot\text{mm}^{-2}$, což je téměř dvakrát více než elektroplátovaný tvrdý chrom (cca $980\text{ kg}\cdot\text{mm}^{-2}$) nebo tepelně chemicky zpracovaná legovaná ocel (cca $1\,120\text{ kg}\cdot\text{mm}^{-2}$). Tato tvrdost činí povlaky otěruvzdornými, což zvyšuje nástrojovou životnost a tím také produktivnost a efektivnost výroby [19].

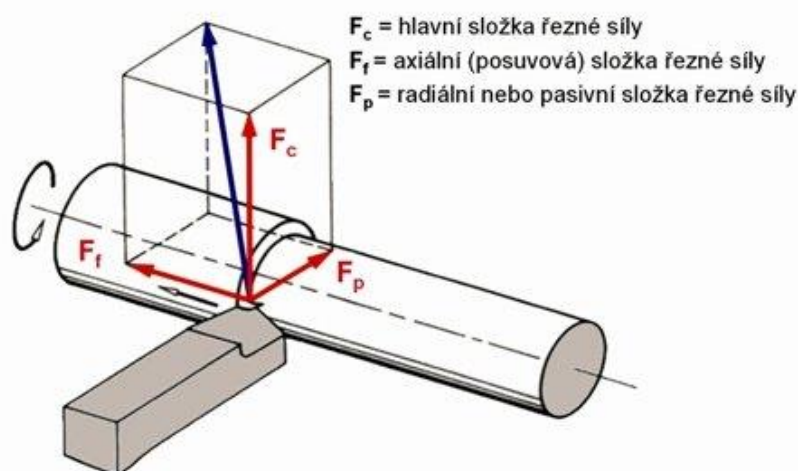
Hladkost zase zlepšuje tření v dotykových bodech mezi nástrojovým čelem a obrobkem, které snižuje řezné síly a taktéž výkon při řezání. Navíc se ještě zlepšuje odvod třísky v tom smyslu, že se snižuje dotyková délka třísky na čele nástroje. Tím se zlepšuje odvod tepla a taktéž se snižuje tepelná koncentrace na řezné hraně a na čele nástroje a zvyšuje se nástrojová trvanlivost. Některé povlaky, například ty, které jsou založeny na TiAlCrN, umožňují úspěšně řezat ocele a litiny bez použití chladicí kapaliny. Z výše uvedeného vyplývá, že povlaky jako takové jsou výhodnou aplikací v nástrojovém směru [19].

2.3 Řezné síly při obrábění

Síly při obrábění působí podél celého aktivního povrchu řezného nástroje ve smyslu roviny, rozložení a polohy. Řezné síly spolu s řeznou rychlostí mají za následek spotřebu energie v přetvářeném materiálu obrobku a na kontaktních plochách mezi nástrojem a

obrobkem. Při použití vhodného povlaku na ostří nástroje se převážná část energie spotřebovávaná v obráběcím procesu rozptýlí v materiálu obrobku a je soustředěna do deformačních zón obráběcího procesu [20].

V každé řezné operaci působí na nástroj různé síly. Například při soustružení (obr. 14, poměr mezi silami $F_c:F_f:F_p$ je 4:2:1), tváření, vyvrtávání působí hlavní řezná síla, síla posuvu a tahová síla. Točivý moment a tahová síla působí při vrtání, vystružování, závitování. Při frézování působí tangenciální a radiální síly, při broušení působí normálová a tangenciální síla [21].



Obr. 14 Schéma řezných sil při soustružení [22].

Řezné síly lze stanovit experimentálně a/nebo je modelovat pro různé podmínky obráběcího procesu, jako jsou např. řezné parametry, geometrie nástroje a materiál obrobku [20]. Pro analýzu silových poměrů řezného procesu se celková řezná síla F rozkládá do příslušných geometrických složek v závislosti na záměrech takové analýzy [9].

Aktivní síla F_a je určena průmětem celkové řezné síly F do pracovní boční roviny P_{fe} .

Pasivní síla F_p je složka celkové řezné síly F kolmá na pracovní boční rovinu P_{fe} a na směr výslednice řezného pohybu.

Složky celkové řezné síly definované v pracovní rovině vztahující se ke směru výslednice řezného pohybu jsou [9]:

Pracovní síla F_e je vyjádřena pravoúhlým průmětem celkové řezné síly F do směru řezného pohybu a je tudíž definována v pracovní boční rovině P_{fe} .

Kolmá pracovní síla F_{eN} je složka pracovní síly F_e , dána vztahem (2.3), kolmá na vektor výsledného řezného pohybu v pracovní boční rovině P_{fe} :

$$F_a^2 = F_e^2 + F_{eN}^2 \quad (2.3)$$

Kvantifikace řezných sil při soustružení [9]*Pomocí empirických vztahů*

Výpočet vybraných složek celkové řezné síly je možné provést na základě empiricky vyšetřených závislostí. Např. pro podélné soustružení válcové plochy jsou závislosti:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (2.4)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad (2.5)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad (2.6)$$

Konstanty C_{Fc} , C_{Fp} , C_{Ff} a exponenty x_{Fc} , x_{Fp} , x_{Ff} , y_{Fc} , y_{Fp} , y_{Ff} jsou pro dané podmínky řezného procesu stanovené empiricky. Např. pro soustružení oceli ČSN 12 050, DIN C45, nástrojem s břitovou destičkou SK je uváděna závislost (2.7):

$$F_c = 2007 \cdot a_p^{0,98} \cdot f^{0,71} \quad (2.7)$$

Výsledná řezná síla F_e dána vektorovým součtem (2.8):

$$F_e = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (2.8)$$

Aplikaci měrné řezné síly

Pro známou velikost měrné řezné síly k_c je možné vypočítat řeznou sílu F_c na základě upraveného vztahu (2.9):

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot h_D \cdot b_D \quad (2.9)$$

Měrná řezná síla k_c se výrazně mění v závislosti na obráběném materiálu, ale také s jmenovitou tloušťkou průřezu třísky h_D .

Empirická závislost $k_c = f(h_D)$ má tvar (2.10):

$$k_c = \frac{C_{kc}}{h_D^{u_{kc}}} \quad (2.10)$$

C_{kc} , u_{kc} – empiricky stanovené konstanty.

3 EXPERIMENTALNI ZKOUŠKY A HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJŮ

Řezivost je funkce nástroje ubírat materiál za ustálených řezných podmínek a při splnění těchto parametrů [23] [24]:

- geometrická a rozměrová přesnost,
- integrita obrobeneho povrchu,
- velikost složek řezných sil,
- úroveň teploty řezání.

Řezivost úzce (neoddělitelně) souvisí s obrobiteľnosťou materiálu. Řada kritérií obrobiteľnosti je súčasne i kritérií řezivosti. Obrobiteľnosť závisí na mnoha faktorech z nichž nejdůležitější jsou [25]:

- způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- chemické a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- metoda obrábění,
- pracovní prostředí,
- geometrie nástroje,
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu.

Z hlediska charakteristik řezivosti a obrobiteľnosti, lze řezivost a obrobiteľnosť rozdělít na obrobiteľnosť a řezivost absolutní a relativní.

Absolutní obrobiteľnosť, resp. řezivost jsou charakterizovány buď funkčním vztahem a parametry spolu souvisejícími nebo určitou velikostí dané veličiny charakterizující obrobiteľnosť, resp. řezivost [25].

Relativní obrobiteľnosť, resp. řezivost jsou charakterizovány bezrozměrnými čísly, které udávají poměr velikosti určité veličiny, a sice poměr této veličiny vztahující se k danému materiálu obrobku, resp. k nástroji a velikostí této veličiny odpovídající etalonovému (referenčnímu) materiálu obrobku, resp. nástroji [25].

Obrobiteľnosť, resp. řezivost hodnotíme podle intenzity opotřebení břitu, z hlediska teplotního, silového, technologického a kvalitativního. Nejčastěji však podle intenzity opotřebení břitu. Kritéria opotřebení břitu jsou jednoduchý Taylorův vztah (3.3), hodnota řezné rychlosti v_T odpovídající určité trvanlivosti břitu (toto kritérium patří do absolutní kategorie) a nejčastější kritérium je komplexní Taylorův vztah (3.6). K dalším charakteristikám, které vycházejí z intenzity opotřebení břitu patří index obrobiteľnosti K_v (3.1) [25].

$$K_v = \frac{V_{T/VB} \text{ zkoušeného materiálu}}{V_{T/VB} \text{ etalonového materiálu}} \quad (3.1)$$

případně

$$K_V = \frac{C_{V_{zk.mat.}}}{C_{V_{et.mat.}}} \cdot T^{\left(\frac{1}{m_{et}} \cdot \frac{1}{m_{zk}}\right)} \quad (3.2)$$

kde:

$V_{T/VB}$ zkoušeného materiálu odpovídá v_{15zk} (m.min⁻¹), což je řezná rychlost v_c při trvanlivosti $T_n = 15$ min pro zkoušený (sledovaný) materiál,

$V_{T/VB}$ etalonového materiálu odpovídá v_{15et} (m.min⁻¹), což je řezná rychlost v_c při trvanlivosti $T_n = 15$ min pro referenční (etalonový) materiál.

Formy opotřebení řezných nástrojů

Opotřebení nástroje se obvykle projevuje ztrátou materiálu nástroje na čele nebo na hřbetě. Toto opotřebení lze hodnotit **přímo** pomocí [1]:

- změn opotřeбенých rozměrů břitu v závislosti na čase (na mikroskopu),
- měřením hmotnostního úbytku nástroje (konvenčně nebo radioizotopovou metodou).

Dále je možno opotřebení hodnotit **nepřímo** pomocí [1]:

- velikosti změny sil, působících při obrábění,
- nárůstu výkonu, potřebného k obrábění,
- změny teploty obrobku, nástroje nebo třísek,
- změny barvy a tvaru třísek,
- výskytu ostřin na hranách obrobku,
- výskytu lesklých proužků na obrobeném povrchu, zhoršení drsnosti povrchu,
- změny rozměrů na obráběné součásti,
- nadměrné hlučnosti při obrábění,
- analýzy vibrací systému stroj-nástroj-obrobek (SNO), rozborem chvění a kmitání.

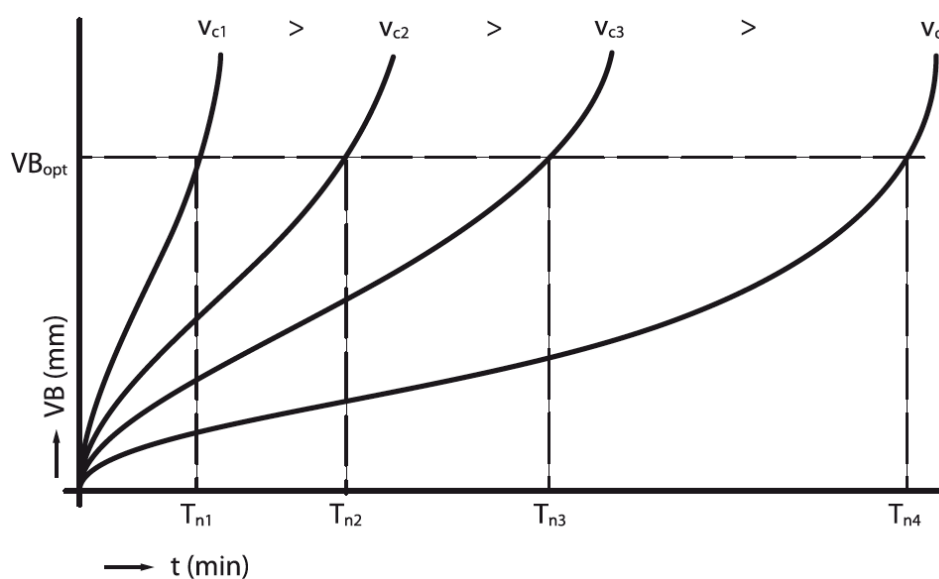
Možnosti rychlého, efektivního a relativně přesného stanovení obrobiteľnosti [25]:

- míra závislosti na řezné rychlosti,
- dosažená drsnost obrobené plochy,
- velikost opotřebení břitu nástroje,
- množství energie potřebné k odřezání dané vrstvy materiálu,
- vztah k dosahované teplotě řezání,
- druh a tvar tvořící se třísky.

3.1 Dlouhodobá zkouška trvanlivost

Dlouhodobá zkouška trvanlivosti je v podstatě jen jedna, je však považována za základní a podle ní se posuzuje míra objektivit ostatních zkoušek. Její nevýhodou je velká spotřeba obráběného materiálu a její časová náročnost [25].

Kritériem je zde hodnota řezné rychlosti, odpovídající určité dohodnuté době trvanlivosti (např. v_{c15} , v_{c30}). Provádí se soustružením nebo frézováním dohodnutými konstantními řeznými parametry, druhem řezného nástroje a geometrií více odstupňovanými řeznými rychlostmi až do stanoveného opotřebení hřbetu (obr. 15) [25] [1].



Obr. 15 Časový rozvoj velikosti hřbetního opotřebení v závislosti na řezné rychlosti, $a_p = \text{konst.}$, $f = \text{konst.}$ [25]

Pro časovou závislost (t) rozvoje opotřebení lze využít s výhodou regresních vztahů ve tvaru

$$\text{lineární regresní funkce} \quad VB = a_0 + a_1 \cdot t, \quad (3.3)$$

$$\text{polynomu druhého stupně} \quad VB = a_0 + a_1 t + a_2 t^2, \quad (3.4)$$

$$\text{polynomu třetího stupně} \quad VB = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad (3.5)$$

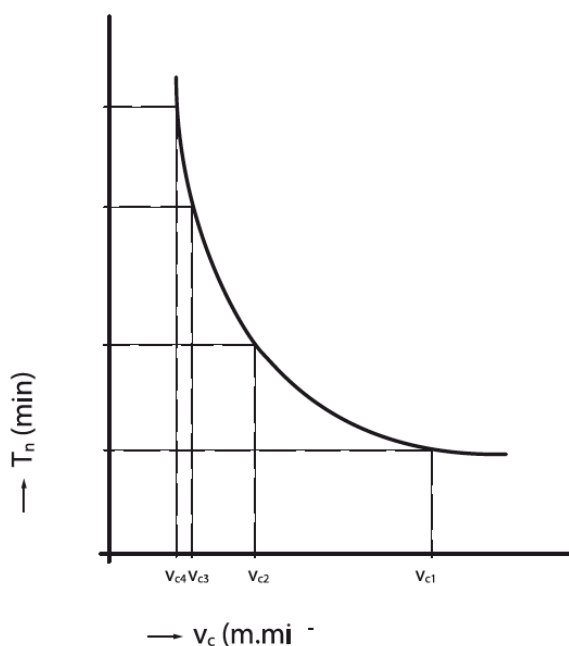
$$\text{nebo exponenciální regresní funkce} \quad VB = a_0 \cdot a_1^t \quad (3.6)$$

Pokud se nenalezne dostatečně vhodná matematická funkce, pro kterou by měl být index statistické determinace (korelace) co nejbližší číslu 1, pak lze využít metod kubických splinů nebo dalších metod numerické matematiky [1].

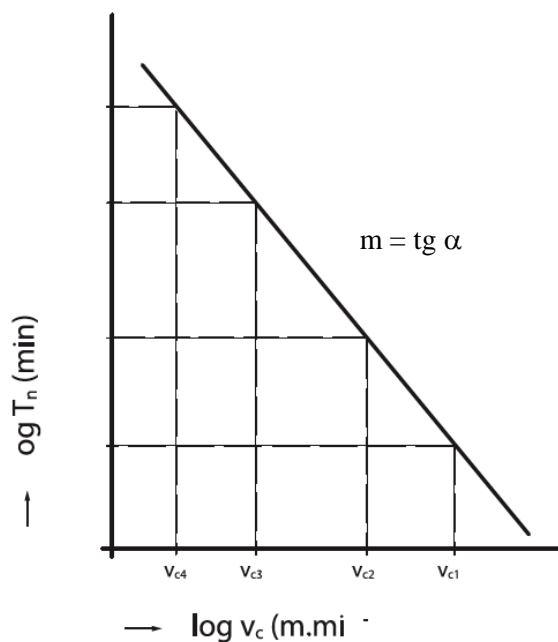
Dlouhodobá zkouška obrobiteľnosti má tento průběh [25]:

- 1) Změří se časový průběh opotřebení na hřbetu nástroje VB_B pro několik hodnot rychlostí při konstantních řezných parametrech a sestrojí se křivky opotřebení (obr. 15).

- 2) Určí se kritérium opotřebení VB_{opt} a tím se stanoví pro každou řeznou rychlost odpovídající trvanlivost břitu (obr. 16).
- 3) Sestrojí se závislost $T_n = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích a pro vybranou trvanlivost je možné stanovit index obrobitelnosti při srovnání řezné rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí materiálu etalonového (obr. 17).



Obr. 16 Polytropický pokles trvanlivosti s růstem řezné rychlosti (pro $VB = \text{konst.}$ a ostatní řezné podmínky konstantní) [25].



Obr. 17 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti v logaritmovaném tvaru [25].

Matematicky je získána $\mathbf{T-v_c}$ závislost známá pod názvem „ $\mathbf{T-v_c}$ závislost“ („Taylorův vztah“) a je popsána základními vztahy [1]:

$$v_c \cdot T^m = C_v, \quad v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}}, \quad T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (3.7)$$

Která se často využívá při přepočtu trvanlivostí ve tvaru

$$T_1 \cdot v_1^m = T_2 \cdot v_2^m = C_T \quad (3.8)$$

Hodnotu konstanty C_T pro daný materiál obrábění a řezné podmínky f a a_p lze odečíst na ose \mathbf{T} pro řeznou rychlost $v_c = 1 \text{ m.min}^{-1}$, hodnotu C_v na ose v_c pro trvanlivost $T = 1 \text{ min}$, exponent m vyjadřuje směrnici vytvořené přímky (odečítanou v záporném směru), $m = \text{tg } \alpha$. Podmínkou platnosti uvedených základních vztahů $\mathbf{T-v_c}$ závislosti je omezení následujícími podmínkami [1]:

- šířka záběru ostří $a_p = \text{konst.}$,
- posuv na otáčku $f = \text{konst.}$,
- opotřebení $VB = \text{konst.}$,

- chlazení, mazání, stav polotovaru, stroje, atd. = konst.

Konstanty i exponent m je ovlivněn řadou činitelů, a proto se také mění. Významná je hodnota exponentu m , která se mění s vlastnostmi materiálu břítu nástroje. Jeho velikost udává jaká je citlivost nástrojového materiálu na změnu řezné rychlosti, resp. teploty řezání (tab. 2) [1].

Tab. 2 Hodnoty exponentu m v závislosti na řezném materiálu (při obrábění uhlíkaté oceli 0,6%C) [1].

Nástrojový materiál	Exponent m [-]	Maximální teplota obrábění [°C]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
Nástrojová ocel	6,0-10,0	260	5-8
Rychlořezná ocel	5,0-8,0	560	15-35
Slinutý karbid třídy P	2,0-5,0	900-1000	100-300
Oxidická řezná keramika	1,2-2,5	1200	300-1000

Tento základní vztah může být upraven tak, že bere v úvahu ještě posuv f a šířku záběru a_p , pro určitou stanovenou trvanlivost T (12-15 minut u slinutých karbidů, 30-60 minut u HSS – tab. 13.3). Tento rozšířený Taylorův vztah má tvar [1]:

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad (3.9)$$

Rozšířený Taylorův vztah může být dále zobecněn tak, že bere v úvahu trvanlivost T , hodnotu opotřebení VB a celou řadu dalších multiplikačních konstant k_{vci} [1]:

$$v_c = \frac{C_{v1} \cdot VB^n}{T^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \prod_1^n K_{vci} \quad (3.10)$$

kde

$$\prod_1^n K_{vci} = k_{vc1} \cdot k_{vc2} \cdot k_{vc3} \dots k_{vcn} \quad (3.11)$$

dílčí koeficienty představují vliv třídy obrobitelnosti, stavu polotovaru, druhu řezu, fyzického stavu stroje, vliv geometrie nástroje, vliv řezného prostředí, atd [1].

3.2 Krátkodobá čelní zkouška opotřebení

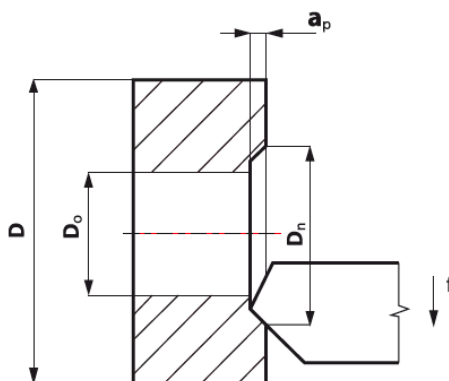
Principem této zkoušky je dosáhnout obráběním předem určené hodnoty opotřebení a ve výsledku porovnat řezné rychlosti zkoumaného materiálu a řezné rychlosti etalonového materiálu (3.12). Soustruží se mezikruží na čele disku o průměru D_0 a D . Soustruží se z průměru D_0 při konstantních otáčkách, posuvu a hloubce řezu. Měrná hodnota je zde průměr D_n (obr. 18) [25].

$$K_v = \frac{V_{Czk}}{V_{Cet}} \quad (3.12)$$

kde:

V_{Czk} ... řezná rychlost zkoumaného materiálu [$m \cdot min^{-1}$]

V_{Cet} ... řezná rychlost etalonového materiálu [$m \cdot min^{-1}$]



Obr. 18 Schéma čelní zkoušky opotřebení [25].

Nevýhodou této zkoušky je nutnost výroby obrobku s velkým poměrem průměru ku délce disku.

3.3 Stupně obrobitelnosti materiálů

Pomocí stupňů obrobitelnosti je snaha kvantifikovat obrobitelnost pro různé materiály. Stupně obrobitelnosti jsou vyjádřeny procentuálně nebo v normalizovaných hodnotách. American Iron and Steel Institut (AISI) určují stupně obrobitelnosti široké škály materiálů přímo při procesu obrábění. Zkoumané materiály se dále porovnávají se základním materiálem B1112, který je tažen za studena má tvrdost 160 HB a je obráběn 180 m/min. Materiál B1112 má normalizovanou hodnotu obrobitelnosti 1.0 (100%) a ostatní materiály jsou vztahovány k této hodnotě [26] [27].

Materiály s hodnotou obrobitelnosti kolem 1.0 jsou snadno obrobitelné. Naopak materiály s hodnotou obrobitelnosti menší než je 1.0 jsou hůře obrobitelné. Např. materiál Inconel[®] je slitina, která se dá jen velmi těžko obrábět a má hodnotu obrobitelnosti 0.09 [27]. V příloze 1 jsou uvedeny souhrnné tabulky stupně obrobitelnosti podle zdroje [27].

Dále jsou tyto materiály zařazeny do různých technologických tříd, označovány malými písmeny:

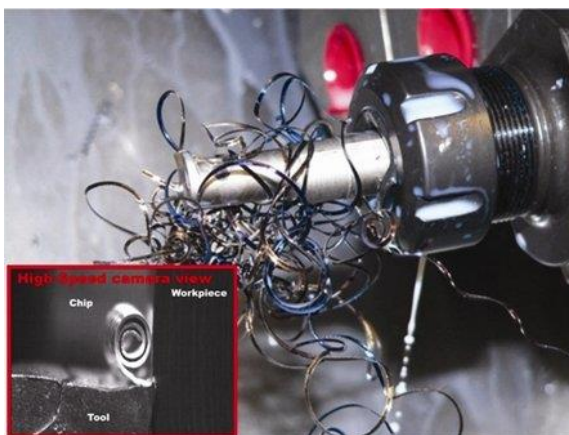
- a – litiny,
- b – oceli,
- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi),
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku),
- e – plastické hmoty,
- f – přírodní nerostné hmoty,
- g – vrstvené hmoty,
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců.

Stupně obrobiteľnosti lze využít ve spojení s Taylorovým vztahem pro životnost nástroje, aby byla určena řezná rychlost nebo životnost nástroje. Je známo že materiál B1112 má životnost 60 min s řeznou rychlostí $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. S tímto lze snadno určit řezné podmínky pro materiál s obrobiteľností např. 70%. Se stejnou životností (60 min) bude jeho řezná rychlost $70 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ [26].

3.4 Měření vhodného utváření třísky

Vedle trvanlivosti břitu je další důležitá vlastnost vhodné utváření třísky. Zejména při automatizované výrobě vede špatně utvářené třísky k poškozování obrobku a také nástroje. V popředí zájmu je vývoj a testování utvařečů třísek pro obrábění těžkoobrobiteľných materiálů. Na nástrojích z řezných materiálů typu slinutý karbid, řezná keramika nebo polykrystalický diamant se zkoumá výroba utvařečů třísky laserovými technologiemi [29].

Vedle klasických experimentální metod hodnocení funkce nástroje je možné využití snímání vysokorychlostní kamerou (obr. 19) či simulačního softwaru, případně metalografických metod vyhodnocení struktury třísky [29].



Obr. 19 Použití vysokorychlostní kamery [29].

3.5 Měření tvrdosti povlaku

Pro tenké vrstvy i ostatní materiály je tvrdost definována jako „odolnost proti pronikání cizích předmětů“. Běžný způsob opotřebení nástrojů je dán abrazivním otěrem. Právě proto je vysoká tvrdost základním parametrem otěruvzdorných vrstev. Tvrdosti nejběžnějších vrstev jsou shrnuty do tab. 2.

Tab. 2 Tvrdosti nejběžnějších vrstev [30].

Vrstva	Tvrdost [GPa]
TiN	23
TiCN	30
CrN	17
TiAlN	33
DLC	25
TiAlSiN	45

Běžná tloušťka PVD vrstev je pouze několik mikrometrů. Při měření tvrdosti je třeba zajistit, aby měřicí hrot (obvykle Vickers) proniknul maximálně do 1/10 tloušťky vrstvy.

Velikost zátěže při měření tvrdosti vrstev se proto volí v řádu desítek mN. Hloubka vtisku při takové zátěži je pod 0,5 μm . Tím se zabezpečí, že měření tvrdosti vrstvy není ovlivněno vlastnostmi podkladového materiálu. Vzniklé stopy je velmi obtížné vyhodnocovat mikroskopem. Proto se využívají speciální přístroje – mikrotvrdoměry, které souběžně se zatěžováním hrotu měř. hloubku jeho pronikání do vrstvy s přesností na jednotky nm [30].

Podle [47] byla zkoumána mikrotvrdost povlaku (Ti, Al)N. TiN patří do skupiny tvrdých kovových materiálů, zatímco AlN souvisí se skupinou tvrdých kovalentních materiálů. V povlaku (Ti, Al)N jsou atomy Ti v TiN mřížce částečně nahrazeny atomy Al, což zapříčiňuje zvýšení tvrdosti, při dodržení poměru Al/Ti kolem $\approx 1,0$.

3.6 Měření tloušťky povlakované vrstvy

Z hlediska praktické aplikace je volba tloušťky povlaku na břitech řezných nástrojů jednou z nejdůležitějších charakteristik. Ta může v konečném důsledku ovlivňovat jak trvanlivost nástroje, tak i řezné síly během obrábění [30].

Tloušťka vrstvy na břitu nástroje se výrazně liší od tloušťky vrstvy na rovných nebo válcových plochách. Současně je ovlivňována průměrem nástroje a způsobem naložení povlakovací komory [30].

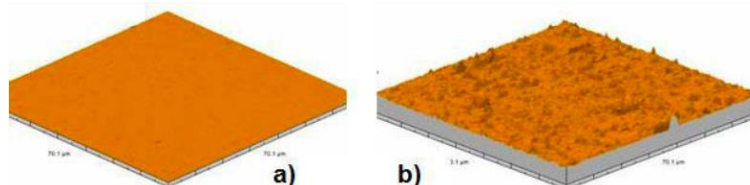
V současnosti neexistuje pro vyhodnocení přesná, jednoduchá a zároveň nedestruktivní metoda. Pro měření rovinných částí nástrojů se využívá tzv. kalotester (příloha 3). Princip měření je jednoduchý. Z průměru kuličky a mikroskopem změřených kulových vrchlíků je možné výpočtem stanovit tloušťku nanesené vrstvy. Toto měření je z důvodů vyšší přesnosti vhodné provádět na vyleštěných etalonech. Pro stanovení tlouštěk na břitech se používá klasická metalografie založená na leštění vybrané části substrátu [30].

3.7 Měření drsnosti povlaku

V případě nanášení PVD vrstev je výsledná drsnost ovlivněna jak kvalitou opracování nástroje, tak povlakem. Při měření drsnosti se neuvažují vady povrchu, tj. náhodné, ojediněle se vyskytující a nepravidelné nerovnosti (rysky, trhlinky, důlky apod.), které vznikají v důsledku vad materiálu, poškození aj. [30].

Zdrojem zvýšení drsnosti vrstev jsou makročástečky, které vznikají během technologického procesu povlakování. Drsnost povlaku (obr. 20) zvyšuje řezné síly, a tak dochází k tepelnému a mechanickému namáhání břitů nástrojů. Tento negativní jev se většina výrobců vrstev snaží minimalizovat úpravou technologie povlakování, popř. dodatečnou úpravou nástrojů po povlakování [30].

Měření je vhodné provádět na vyleštěných substrátech s výchozí drsností $R_a 0,01 - 0,02 \mu\text{m}$ běžným dílenským drsnoměrem. Existují i jiné metody vyhodnocování drsnosti povrchu, např. pomocí AFM (Atomic Force Microscopy) [30].



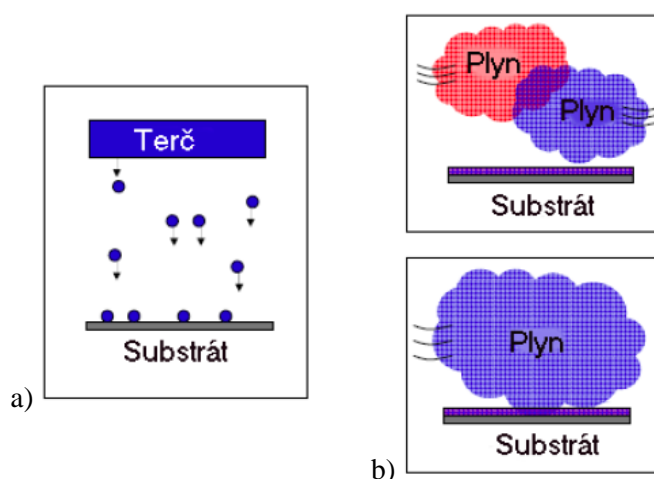
Obr. 20 Drsnost vrstev připravovaných a) magnetronovým napařováním, b) obloukovým napařováním [45].

4 POVLAKOVÁNÍ SLINUTÝCH KARBIDŮ

Nanášení tenkých vrstev je až finální proces a nanáší se na už hotové, tepelně zpracované VBD z běžného slinutého karbidu typu K, P nebo M (v současné době jsou již povlaky většinou nanášeny na podkladové SK, vyrobené speciálně k tomuto účelu). Tenké vrstvy jsou nanášeny buď fyzikální (PVD) nebo chemickou (CVD) cestou (obr. 21) rychlostí 0,5 až 2 nm.s⁻¹. Povlak má vyšší tvrdost i pevnost než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě a má vynikající odolnost proti opotřebení. Tyto výhodné vlastnosti vyplývají zejména z toho, že povlakovaný materiál ve srovnání se substrátem neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů (póry, dutiny), navíc tvoří bariéru proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje a povrchové vrstvy povlaku brání tvorbě nárůstku na břitů nástroje [3] [28] [44].

Obvykle jsou v literatuře uváděny následující vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů [13]:

1. generace: jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou asi 7 μm a špatnou soudržností podkladu a povlaku.
2. generace: jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN) bez eta-karbidu na přechodu podklad - povlak, tloušťka až 13 μm.
3. generace: vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v tomto pořadí (od podkladu k povrchu): TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN, TiCN-Al₂O₃-TiN.
4. generace: speciální vícevrstvý povlak (velmi často i více než 10 vrstev a mezivrstev), s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami (užívají se stejné materiály povlaků jako u 3. generace). Výroba takového povlaku je umožněna cíleným řízením atmosféry v povlakovacím zařízení, podle potřeb technologického postupu povlakování.



Obr. 21 Schéma metod a) PVD, b) CVD [44]

Podle tvrdosti jsou povlaky obvykle děleny do dvou skupin: tvrdé povlaky s tvrdostí <40 GPa a supertvrdé povlaky s tvrdostí >40 GPa. Ve srovnání s velkým počtem tvrdých povlaků lze do skupiny supertvrдых povlaků zahrnout pouze několik materiálů – kubický

nitrid boru, DLC (Diamond Like Carbon, v doslovném překladu „uhlík podobný diamantu“ – jedná se o amorfni uhlík, který nevykazuje signál rentgenové difrakce, který by bylo možné připsat diamantu, ale má fyzikální vlastnosti jako diamant) amorfni nitrid uhlíku ($a\text{-CN}_x$) a polykrystalický diamant. V tabulce 3 jsou uvedeny základní parametry nátěrových hmot [3].

Tab. 3 Strukturální, mechanické a tepelné vlastnosti některých nátěrových hmot [31].

Materiál	Tvrdość [kg.mm ⁻²]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Poissonovo číslo	Koeficient tepelné expanze [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]	Teplota tavení a depozice [°C]
TiN	2000≤3680	440	0,25	9,35	2949
TiC	2900≤4000	450	0,19	7,4	3067
TiB ₂	3370	480		8,0	
VN	1500	460		8,1	2177
VC	2900	430			2648
ZrM	1500≤4500	510	0,25	7,2	2982
NbN	1400	480		10,1	2204
NbC	2400	580	0,22	6,6	3600
TaN	1000			3,6	3093
CrN	1100	400		2,3	1500
Cr ₃ C ₂	1300	400		10,3	1810
HfN	1600≤4700			6,9	3387
HfC	2700≤3900	460	0,18	6,6	3928
WC	2100	695	0,185	4,3	2776
Al ₂ O ₃	≤2100	400	0,23	9,0	2300
SiC	2600≤4000	480		5,3	
BN	3000-5000	660			
B ₄ C	3000-4000	440	4,5-5,6		
C, diamant	9000	440-590		0,8	

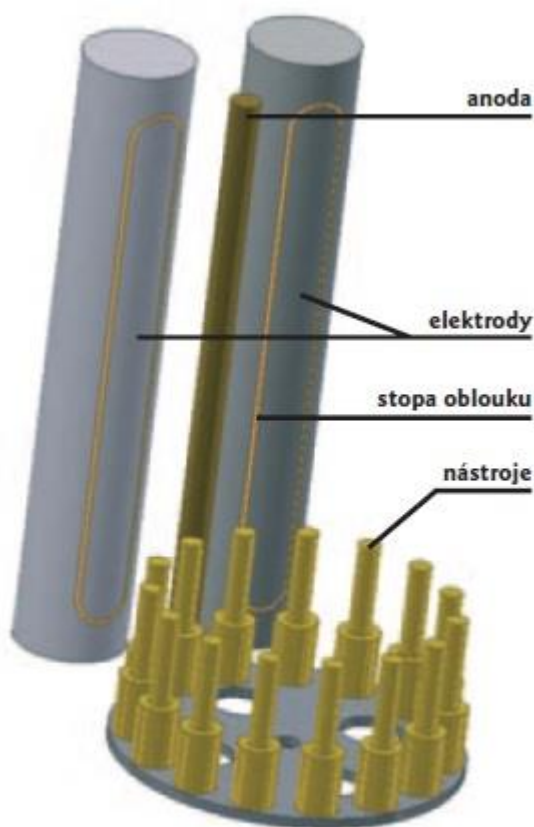
Supermřížkové povlaky jsou tvořeny nanovrstvami složenými ze dvou různých materiálů, které se střídají se supermřížkovou periodou (např. celková tloušťka vrstvy dvou materiálů se pohybuje v rozsahu 5 – 10 nm). Jednotlivé dvojvrstvy těchto povlaků mohou být tvořeny kovy, nitridy, karbidy nebo oxidy různých materiálů, nebo kombinací jedné vrstvy kovu, nitridu, karbidu nebo oxidu a druhé vrstvy jiného kovu. Podle složení dvojvrstvy mohou být supermřížkové povlaky rozděleny do pěti skupin [3]:

- kovové supermřížky;
- nitridové supermřížky;
- karbidové supermřížky;
- oxidové supermřížky;
- nitrodové, karbidové nebo oxidové supermřížky/kovové supermřížky.

4.1 Metoda PVD

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování, obr. 22) je charakteristická nízkými pracovními teplotami (pod 500°C). Tato metoda byla původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí (nízká teplota zaručuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění nástroje), v posledním období dochází k velmi významnému rozvoji metod PVD a rozšiřování jejich aplikací také pro slinuté karbidy. Povlak je nejčastěji vytvářen [3]:

- napařováním (evaporation) – přímé, reaktivní, aktivované reaktivní, s asistencí iontového paprsku,
- napařováním (sputtering) – doutnavý výboj (stejnoseměrná nebo RF dioda, trioda, magnetron), iontový paprsek (jediný, dvojité),
- iontovou implantací (ion-plating) – doutnavý výboj (stejnoseměrná nebo RF dioda, trioda, výboj v duté katodě, napařování), iontový paprsek (přímý iontový paprsek, iontový paprsek, skupinový iontový paprsek).



Obr. 22 Schéma PVD zařízení [36]

U metody PVD jsou povlaky vytvářeny za sníženého tlaku (0,1 – 1,0 Pa) kondenzací částic (atomů, případně shluků atomů), které jsou uvolňovány ze zdroje částic (terčů, targetů) fyzikálními metodami. Současně se do pracovní komory vypouští inertní a reaktivní plyny (např. Ar a N₂). S těmito plyny reagují uvolněné částice, které jsou ionizovány a díky zápornému předpětí (řádově ve stovkách voltů) jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde

se usazují ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku s vysokou přilnavostí (1 – 5 μm , v atmosféře obsahující dusík se tvoří povlak TiN) [44] [3] [11].

Výhody této metody je povlakování ostrých hran (s poloměrem zaoblení pod 20 μm), vysoká odolnost vrstev, nízký koeficient tření, možnost různých kombinací vrstev, malé a snadno reprodukovatelné tloušťky a tvorba přesné tloušťky vrstev [44] [3].

Mezi nevýhody patří relativně složitý vakuový systém a tzv. stínový efekt. Na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částic se povlak tvoří nerovnoměrně, případně se povlak netvoří vůbec. K zabránění stínového efektu slouží otáčení povlakovanými předměty (pomocí rotačních držáků nástrojů), aby se povlak rovnoměrně ukládal po celém povrchu [3].

Depoziční proces PVD metody lze rozdělit do těchto kroků [44]:

- převedení deponovaného materiálu do plynné fáze,
- transport par ze zdroje k substrátu,
- vytváření vrstvy na povrchu substrátu.

Na přelomu 80. a 90. let je zřejmý růst počtu břitových destiček s vícevrstevnými povlaky 3. a 4. generace i narůstající počet povlaků vyrobených jinou metodou, než je CVD. Zřetelný posun k metodám PVD a PCVD je způsoben výbornými vlastnostmi takto vyrobených povlaků při přerušovaném řezání (např. frézování). Uvedené trendy nejenže přetrvaly až do současnosti, ale v důsledku zdokonalování stávajících metod a vývoje nových povlakovacích metod jsou neustále zesilovány [13].

4.2 Metoda CVD

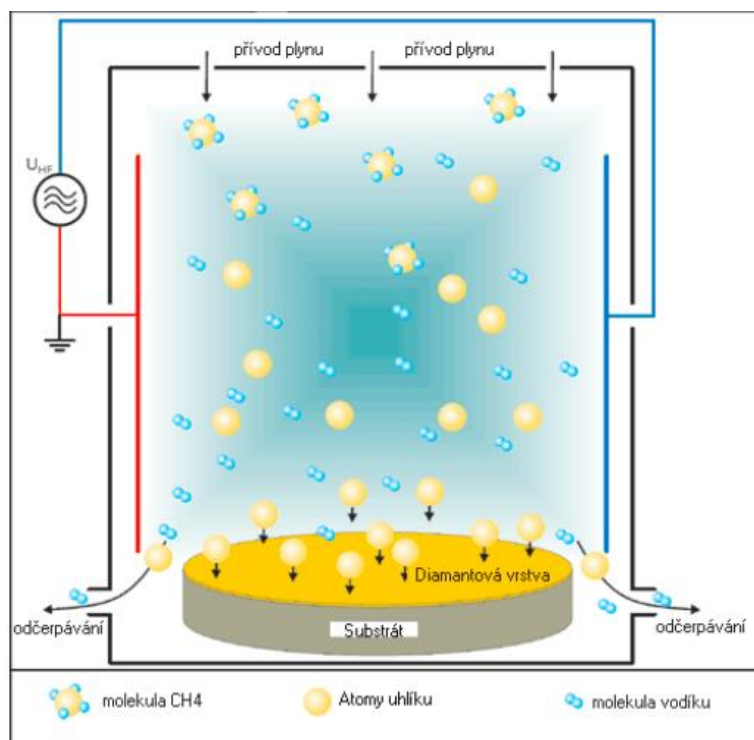
Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování z plynné fáze, obr. 23), která probíhá z vysokých teplot (1 000 – 1 200°C). Tato metoda může být realizována ve čtyřech variantách [3]:

- tepelně indukovaná,
- plazmaticky aktivována,
- elektronově indukována (paprsek elektronů),
- fotonově indukována (např. laserem).

Jedná se o chemický proces povlakování, který je založen na reakci plynných chemických sloučenin v plazmě, která se tvoří v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového slinutého karbidu, a následném uložení produktů heterogenní reakce na tomto povrchu. Základním požadavkem přitom je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale přitom prchlavou sloučeninu, která se v důsledku přivedené energie (ohřevem, plazmovým obloukem, laserem) chemicky rozkládá (např. kovový halogenid, TiCl_4 , AlCl_3). Produkty jejího rozkladu jsou pak ukládány na ohřátý povrch povlakovaného předmětu a působí zde jako katalyzátor. Aby proběhla požadovaná reakce (vytvoření vrstvy povlaku), musí být v plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn (např. N_2 , NH_4 , CH_4) [3].

K jejím výhodám patří možnost vytvářet povlaky s vysokou hustotou, tepelnou stabilitou a výbornou adhezí mezi podkladem a povlakem, možnost nanesení vrstev o větší rovnoměrné tloušťce (10 - 13 μm), povlakování předmětů složitějších tvarů, nepřístupných

dutin a drážek, má všestranný účinek a variabilitu typů povlaků (Al_2O_3 , uhlíkové kluzné vrstvy, diamantové vrstvy). Umožňuje depozici rozmanitých vrstev kovů a různých chemických sloučenin v krystalickém či amorfním stavu, jež jsou vysoce čisté a mají požadované vlastnosti. Další výhodou jsou relativně nízké pořizovací a provozní náklady [3] [13] [44].



Obr. 23 Metoda CVD [44].

Za nevýhody lze považovat ovlivnění podkladového materiálu (snížení ohybové pevnosti) díky vysoké depoziční teplotě (může dojít k degradaci substrátu) a tahová zbytková pnutí v povlaku (rozdílný koeficient tepelné roztažnosti). Z vysoké teploty depozice dále vyplývá vysoká energetická náročnost, dlouhý pracovní cyklus (8 – 10 hodin). Metoda CVD neumožňuje povlakovat ostré hrany, při této metodě dochází k zaoblování hran. Další nevýhodou je použití toxických chloridů při povlakovacím procesu [3] [13] [44].

Zásadní kvalitativní změnu v technologii vytváření tenkých ořezvzdorných vrstev přinesly tzv. plazmaticky aktivované CVD metody (označení PCVD, nebo též PACVD – Plasma CVD, PECVD – Plasma Enhanced CVD, MWP-CVD – MicroWave Plasma CVD, mikrovlnná plazmatická CVD metoda), které se od klasické CVD metody liší nízkými pracovními teplotami, přičemž nemění její princip, tj. vytváření povlaku z plynné fáze. U metody PCVD jsou molekuly reaktivního plynu ionizovány plazmovým výbojem, který doutná v komoře reaktoru při tlaku 100 – 300 MPa (výboj je vyvolán přiložením negativního pólu elektrického napětí na povlakovaný předmět). Tím lze dosáhnout snížení teploty povlakování na hodnoty 400 – 600 °C [3].

Metoda PACVD je povlakování nástrojů při mnohem nižších teplotách než u konvenčních CVD technik. Plazmou aktivovaný CVD proces umožňuje snížit teplotu potřebnou pro vznik vrstvy na povrchu substrátu na 470–530 °C. Nástroje jsou povlakovány až po konečném zušlechťení na požadovanou tvrdost a v průběhu povlakování nedochází

k rozměrovým změnám. Touto metodou lze povlakovat i dutiny. PACVD povlaky se vyznačují extrémně nízkým koeficientem tření – až 0,1 [32].

Další metodou, která je založena na principu snížení vysokých pracovních teplot CVD metody, je tzv. MTCVD metoda (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition – CVD za středních teplot). Na rozdíl od konvenční CVD technologie, kde teploty nanášení povlaků přesahují hodnoty 1 000°C, umožňuje technologie MTCVD nanášet povlaky z plynné fáze za teplot podstatně nižších, 700 – 850°C. Zatímco u metody CVD je používán plynný metan CH₄ (zdroj uhlíku) a čistý dusík, MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH₃CN, zdroj uhlíku a dusíku), nebo též vysoce toxický a hořlavý metylcyanid. Zdrojem titanu je u obou metod chlorid titančitý (TiCl₄) [3].

5 MODERNÍ TRENDY POVLAKOVÁNÍ

Původní požadavky směřovaly ke zvýšení otěruvzdornosti řezných nástrojů z rychlořezné oceli. To byl snad první impuls v tomto oboru. Později, v devadesátých letech, byly požadavky rozšířeny na ještě vyšší tvrdosti, tepelnou stabilitu a nízký koeficient frikce. Dnes je rozsah aplikací PVD povlaků tak velký, že i tradiční požadavky doznaly značného rozšíření. Povlaky musí být dostatečně houževnaté, musí kombinovat vysokou tvrdost i nízký koeficient frikce, musí mít různou chemickou afinitu k obráběným či tvářeným a jinak zpracovávaným materiálům, musí mít odlišnou barvu dle oblasti použití, musí se dát snadno odstranit v případech renovací povlakovaných nástrojů atd. K tomu nám dnes slouží velmi flexibilní technologie, která umožňuje kombinovat mnoho složek v jednom procesu, vytvářet multivrstvené a nanovrstvené struktury, kombinovat PVD a PACVD technologie a především přesně a opakovatelně řídit celý proces [33].

Není pochyb o tom, že PVD vrstvy na bázi (Ti, Al)N mají v posledních letech dominantní postavení na trhu s řeznými nástroji určenými pro vysoce výkonné obrábění [34].

Podíl PVD vrstev na bázi (Ti, Al)N na trhu s povlakovanými nástroji pro vysoce produktivní obrábění je mezi 25 % až 55 %. Důvodů pro tak vysoký podíl je mnoho [34]:

- velmi vysoká tvrdost kolem 25 až 38 GPa při relativně nízkém zbytkovém napětí vrstev mezi
- 3 až 5 GPa;
- vysoká odolnost vůči teplotě
- ztráta tvrdosti pouze 30 až 40 % při teplotách kolem 800 °C;
- vysoká odolnost proti oxidaci při vysokých teplotách
- pracovní teploty jsou až 850 °C proti 400 °C u TiCN, resp. 550 °C u TiN vrstev;
- nízká tepelná vodivost – ve srovnání s konvenčními TiN vrstvami až o 30 % nižší.

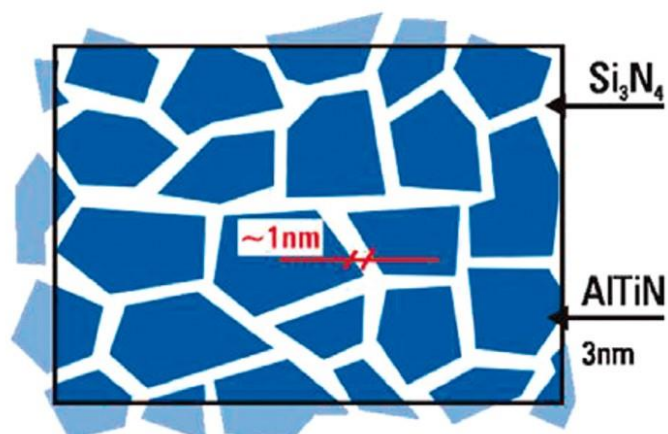
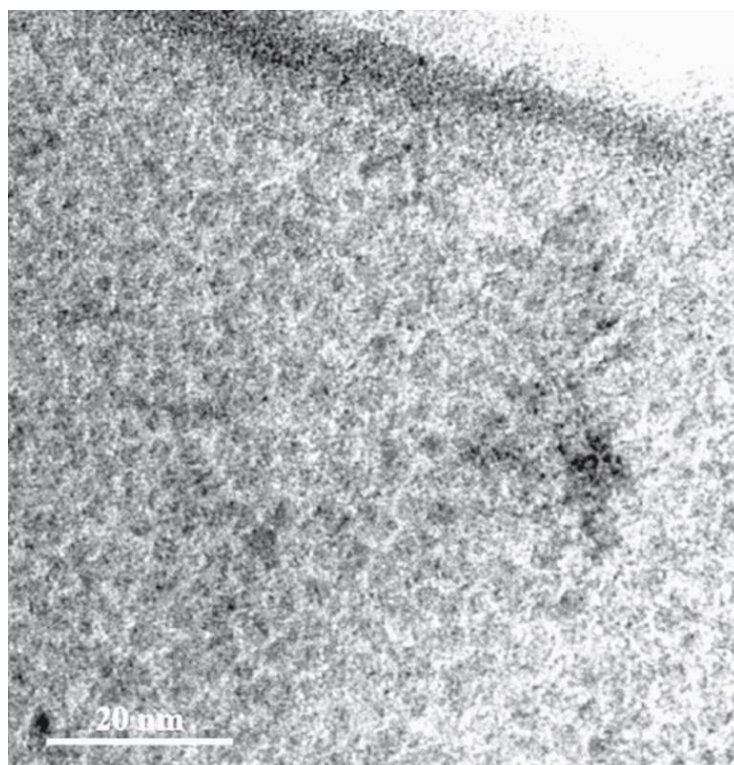
Vývoj vrstev na bázi (Ti, Al)N však neustrnul na úrovni jednoduchých systémů. Existuje rozsáhlá řada velmi moderních řešení kombinujících různé poměry Ti : Al, využívajících výhod multivrstveného uspořádání a zaměřených na využití výhod různých technologií přípravy PVD vrstev včetně doplňkových prvků ve struktuře [34]:

- kombinace obloukového napařování a magnetronového napařování;
- filtrace makročástic u obloukových technologií;
- optimalizace povlakovacích parametrů, které ovlivňují výsledné vlastnosti vrstvy i při stejném složení;
- optimalizace krystalické struktury vrstev, která má zásadní vliv na korozivní vlastnosti a odolnost vůči oxidaci;
- přidání některých prvků do struktury vrstev pro zlepšení oxidačních vlastností, zjemnění struktury, zlepšení adheze atd. – Cr, Y, Zr, V, Hf, B, Si atd.

V současné době je nejpoblárnější rozvoj (Ti, Al)N systémů s vysokým obsahem Al pro zlepšení odolnosti vůči oxidaci za vysokých teplot a tzv. nanovrstev s vysokou houževnatostí [34].

5.1 Nanokrystalické kompozity

Nanokrystalický kompozitní povlak je systém tvořený malými monokrystaly v rozsahu pod 10 nm (v případě povlaků MARWIN se jedná o $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$); v případě povlaků ALWIN se jedná o $(\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$), které jsou zakotvené ve vhodné amorfni matrici (v případě obou povlaků se jedná o Si_3N_4) s tenkými mezikrystalickými hranicemi pod 1 nm (obr. 24). Jedná se o termodynamicky stabilní materiály a to i z hlediska zrnitosti. Nedochozí tedy k růstu zrnitosti ani za vyšších teplot. Hranice zrn slouží jako efektivní bariéra proti šíření poruch – tím je dána vysoká tvrdost těchto materiálů [35].



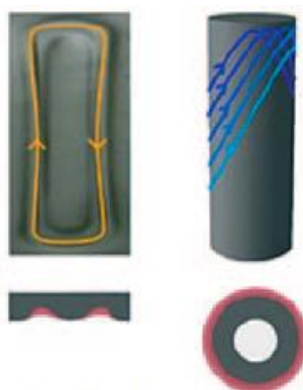
Obr. 24 Struktura nitridického nanokompozitu [2].

Příkladem jsou vrstvy (Ti, Al, Si)N, které tvoří nanokrystaly (Ti, Al)N s velikostí kolem 5 nm, umístěné v amorfni matrici Si₃N₄. Tvrdost těchto komerčně vyráběných materiálů dosahuje 40 až 50 GPa a její hodnoty jsou zachovány až do teplot 1100 °C [34].

Technologie pro přípravu nanokrystalických kompozitů

Podstatou přípravy nanokrystalických kompozitů, např. nc-(Ti_{1-x}Al_x)N/a-Si₃N₄, je splnění požadavku na řízené odpaření velkého množství částic a jejich velkou ionizaci. Tato podmínka platí nejenom pro materiál elektrod, ale i pro částice atmosféry. Obě lze splnit využitím poměrně silného magnetického pole, které potřebným způsobem ovlivní hoření oblouků při relativně vysokých parciálních tlacích reakčních atmosfér [36].

Konvenční PVD zařízení jsou vybavena tzv. planárními elektrodami (plochými, ve tvaru desek či malých kruhů, obr. 25) a na nich při použití silného magnetického pole dochází k nadměrné a soustředěné erozi a k jejich podstatně dřívějšímu vyřazení z procesu. Silné magnetické pole rovněž redukuje tvorbu makročástic, a tím je i výhodné z hlediska vrstev se sníženou drsností. Problém eroze však lze technicky vyřešit pomocí rotujících válcových elektrod, jejichž účinná plocha je v podstatě π krát větší a díky rotaci nedochází ke zmíněné statické erozi. Řešení válcových elektrod splnilo podmínku přípravy nc-vrstev TiAl-SiN při současném prodloužení životnosti terčů [36].



Obr. 25 Planární a válcový terč [36].

5.2 Nanovrstvená struktura

Nanovrstvy nebo supermřížky jsou tvořeny soustavou střídajících se velmi tenkých vrstev (typu TiN-TiCN, TiN-TiAlN) s různými vlastnostmi. Přitom tloušťka jednotlivých vrstev je rozhodující pro výslednou vlastnost povlaku a její optimum se pohybuje v rozsahu 3 až 10 nm podle prvkového složení povlaku. Výsledkem jsou povlaky s velmi vysokou tvrdostí a odolností vůči šíření mikrotrhlin. Každé rozhraní dvou vrstev slouží jako bariéra, která šíření trhlin zpomalí nebo úplně zastaví. Systém takto navrstvených vrstev má velmi malou drsnost a proto snižuje tření mezi třískou a čelem nástroje, což vede k podstatnému snížení množství vzniklého tepla [36] [46].

Podle [47], dosažení vysoké teplotní stability a odolnost proti oxidaci lze dosáhnout jedině za vysokého tlaku dusíku a depozičních teplot $\geq 550^\circ\text{C}$.

Pokud se dodrží podmínka přesné a konkrétní tloušťky jednotlivých vrstev, ovlivní se krystalografická struktura vrstev a dosáhne se výrazně zvýšené tvrdosti vrstvy. Potom lze připravit i vrstvy (Al, Ti)N s vysokým obsahem Al s kubickou mřížkou, přestože za

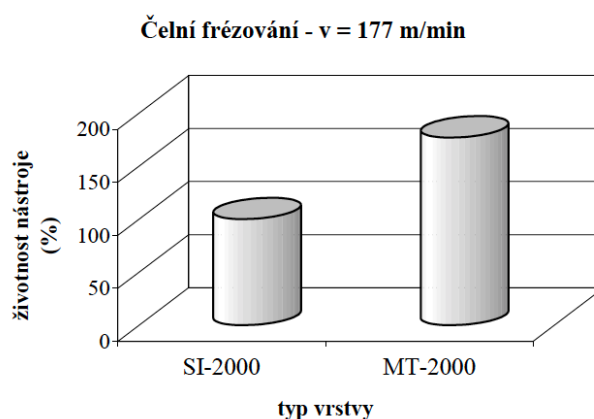
normálních podmínek by např. při obsahu Al asi 70 % byla struktura hexagonální. Přitom pouze kubická struktura (Al, Ti)N představuje tvrdou, a tedy otěruvzdornou vrstvu [34].

5.3 Marwin®

Marwin SI je nanokompozitní typ povlaku a Marwin MT je nanovrstvený typ povlaku s měnícím se poměrem Ti a AlSi [37].

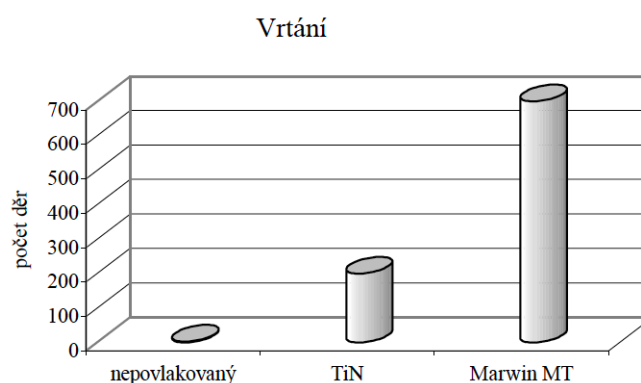
Marwin je nanášen technologií PVD a řadí se mezi tvrdé a super tvrdé povlaky odolné proti opotřebení [37]. Tento povlak je výsledkem vlastního výzkumu společnosti SHM, s. r. o., se sídlem v Šumperku.

Dle [38] byly provedeny řezné zkoušky povlaku Marwin v aplikaci na vyměnitelné břitové destičce ze slinutého karbidu. Srovnání obou verzí vrstev Marwin pro čelní frézování je uvedeno na obr. 26.



Obr. 26 Řezná zkouška – frézování: obráběný materiál – 12050.9, HB = 202 – 214, VBD – SPUN 120308, S26; řezná rychlost $v_c = 177 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f = 0,244 \text{ mm.ot}^{-1}$, hloubka třísky $a_p = 2 \text{ mm}$ [38].

Další zkoušky dle [38] probíhaly na nástrojích z HSS. Na obr. 27 je uveden závěrečný příklad série zkoušek vrtáním. Cílem série zkoušení byl výběr vhodného povlaku vzhledem k daným řezným podmínkám. Výsledkem byla optimalizace tloušťky vrstvy, výběr varianty povlaku (výběr z TiN, Marwin MT a nepovlakovaný nástroj) a dodatečná povrchová mechanická úprava.



Obr. 27 Řezná zkouška – vrtání: obráběný materiál – ocel 15 241.6, $R_m = 900$ až 950 MPa , šroubovitý vrták $\varnothing 6,00 \text{ mm}$, RN profil, křížový výbrus DIN 1412 tvar C; otáčky 1 800/min, řezná rychlost $v_c = 35 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f = 0,12 \text{ mm.ot}^{-1}$, hloubka díry = $3 \cdot D = 18 \text{ mm}$, chlazení [38].

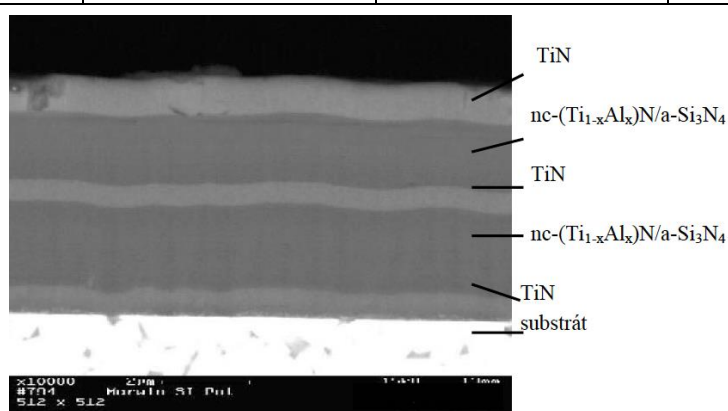
Marwin SI

Marwin SI (obr. 28) je nanokompozitní povlak TiAlSiN tvořený základní vrstvou s vysokou tvrdostí a povrchovou vrstvou s vysokou tepelnou a chemickou stabilitou. Doporučený podkladový materiál je HM [39].

Povlak Marwin vychází z nanokrystalického kompozitu nc-(Ti_{1-x}Al_x)N/a-Si₃N₄ [37]. Jeho základní vlastnosti jsou shrnuty v tabulce 4.

Tab. 4 Základní vlastnosti povlaku Marwin SI [39].

Mikrotvrdost (GPa)	Tloušťka (μm)	Drsnost Ra (μm)	Tepelná stabilita (°C)
45	2 - 3	0,10 - 0,20	>1000



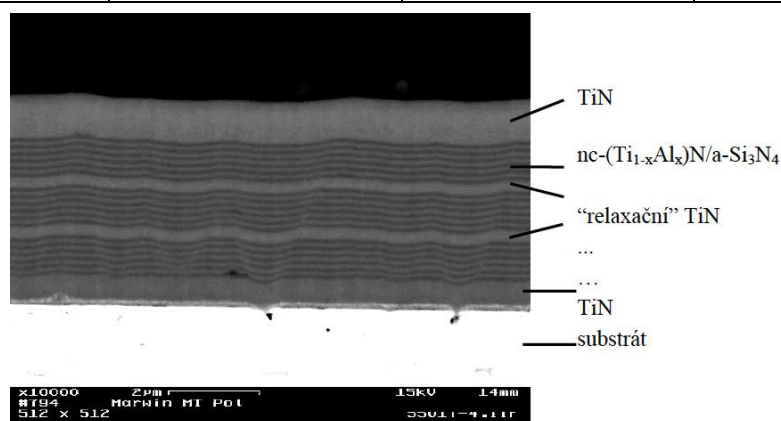
Obr. 28 Marwin SI – SEM foto, leštěný vzorek [38].

Marwin MT

Povlak Marwin MT (obr. 29) je nanovrstvený gradientní systém AlTiN tvořený vrstvou s plynulou změnou složení. Doporučený podkladový materiál je pro tuto vrstvu HM a HSS. Využívá se při frézování, vrtání, tváření a stříhání [39]. Jeho vlastnosti jsou v tabulce 5.

Tab. 5 Základní vlastnosti povlaku Marwin MT [39].

Mikrotvrdost (GPa)	Tloušťka (μm)	Drsnost Ra (μm)	Tepelná stabilita (°C)
38	2 - 3	0,10 - 0,20	>900



Obr. 29 Marwin MT – SEM foto, leštěný vzorek [38].

5.4 Alwin®

PVD povlak na bázi CrAlSiN s vysokým obsahem chromu. Povlak Alwin je pod společností SHM, s. r. o., se sídlem v Šumperku [39].

Doporučeným podkladovým materiálem je HM a HSS. Používá se tam, kde je potřeba oxidační odolnost a odolnost vůči nalepování obráběného materiálu na nástroj. Oblasti použití jsou frézování – odvalovací frézy, vrtání, tlakové lití hliníku, tváření a stříhání [39]. Vlastnosti povlaku jsou v tabulce 6.

Tab. 6 Základní vlastnosti povlaku Alwin [39].

Mikrotvrdość (GPa)	Tloušťka (μm)	Drsnost Ra (μm)	Tepelná stabilita (°C)
35	2 - 4,5	0,15 - 0,20	>1000

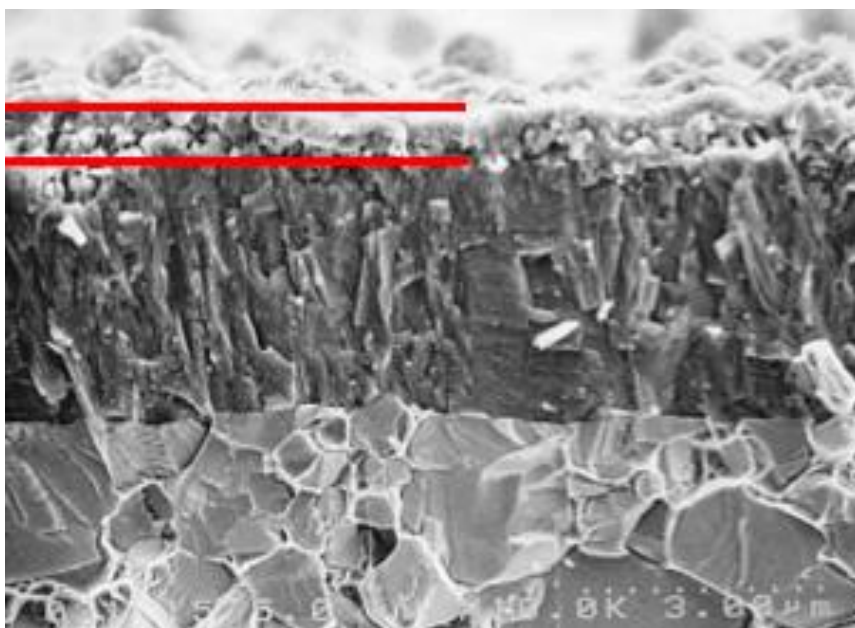
5.5 Darwin®

Technologie povlaku Darwin vytváří velmi hladký povlak AlTiN s vysokým obsahem hliníku. Jako podkladový materiál je u této technologie doporučována nástrojová ocel (HM) a rychlořezná ocel (HSS). Povlakování metodou Darwin se využívá u náročných aplikací vyžadujících velmi nízkou drsnost povrchu nástroje, jako jsou: vrtání, hluboké vrtání, závitování, frézování a vystružování [39].

Základní vlastnosti povlaku jsou shrnuty v tabulce 7 a znázorněn je na obrázku 30.

Tab. 7 Základní vlastnosti povlaku Darwin [39].

Mikrotvrdość [GPa]	Tloušťka [μm]	Drsnost Ra [μm]	Tepelná stabilita [°C]
43	1-6	0,05-0,10	>900



Obr. 30 AlTiN povlak s vyznačenou tloušťkou [40].

5.6 Lubrik[®]

Vrstva Lubrik pochází z vlastního vývoje české firmy SHM, s. r. o., se sídlem v Šumperku. Jedná se o kluznou vrstvu, nanášenou PVD technologií, která představuje důležitou skupinu průmyslových povrchových úprav. Její technické přínosy lze shrnout do těchto bodů [41]:

- zlepšení kluzných vlastností,
- výrazné snížení „přilnavosti“ mezi vrstvou a obrobkem,
- rovnoměrnější zaběhnutí nástroje,
- snížení řezných sil a jejich plynulejší průběh,
- omezení tvorby nárůstků, zejména při obrábění neželezných kovů.

Složení a struktura

Ve struktuře vrstvy Lubrik je hlavní fáze Al_2O_3 s příspěvkem TiC. Z pohledu kluzných vlastností je důležitá přítomnost vazeb C-C, C-O a C=O, přičemž převážná část složek je amorfní, což je vlastnost pro oxidy typická. K ukotvení vrstvy k substrátu slouží adhezní fáze TiN [41].

Tvrдост

Tvrдост je fakticky nezávislá na obsahu Al a je srovnatelná s tvrdostí ostatních typů kluzných vrstev (CBC 20 GPa, PLC 12 – 20 GPa, DLC nad 20 GPa, WC/C 10 – 15 GPa) [41].

Aplikace

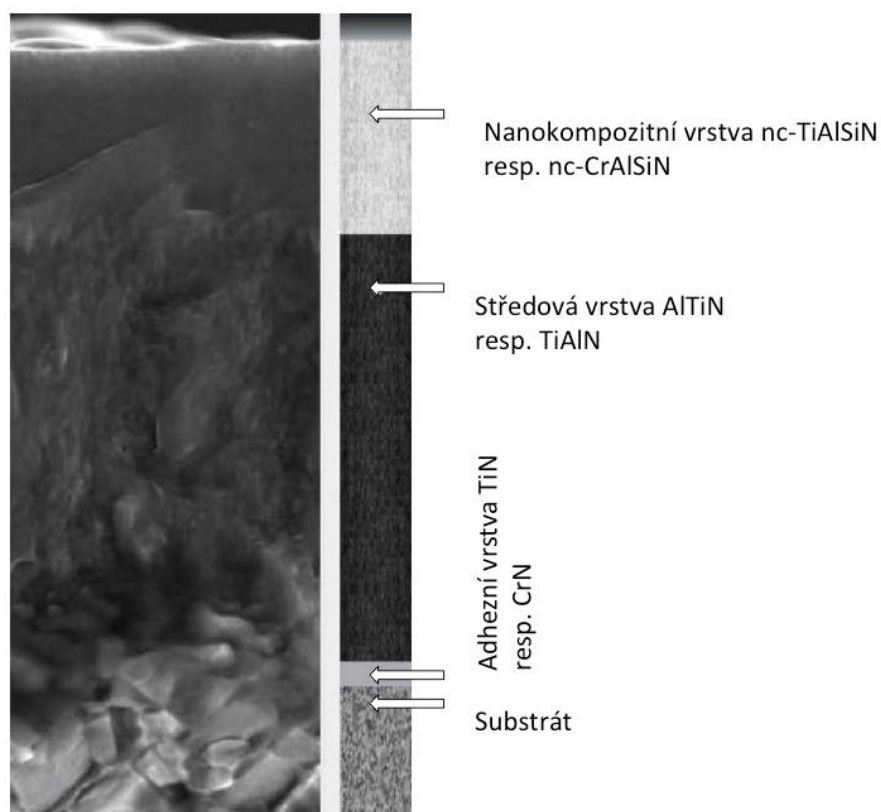
Povlak Lubrik se aplikuje jako závěrečná část již zavedených povlaků Marwin SI a Marwin G. Odtud také vychází označení povlaku Lubrik SI a Lubrik G. Typická tloušťka kluzné vrstvy se pohybuje mezi 0,3 do 0,5 μm . V technicky opodstatněných aplikacích ji lze bez komplikací připravit i nad tloušťku 4 μm [41].

5.7 TripleCoatings³[®]

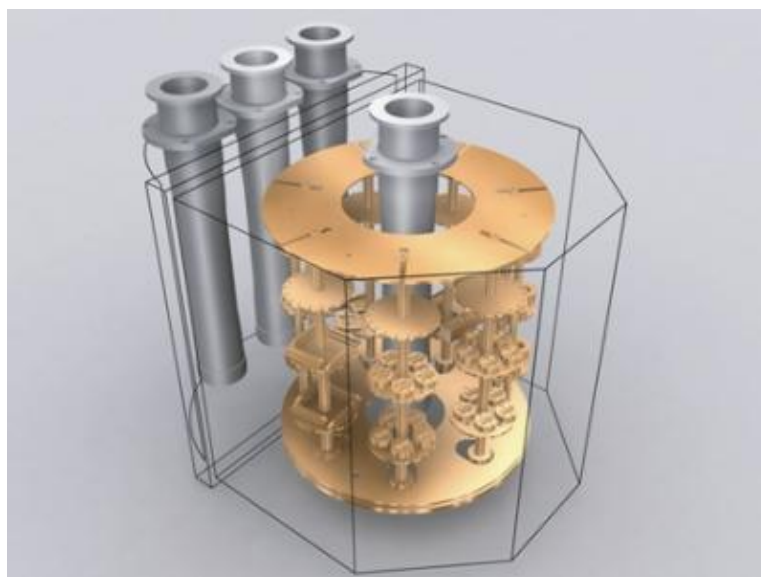
Povlaky TripleCoatings³ představují nejmodernější povlaky na trhu, které kombinují vynikající houževnatost a tvrdost vrstev AlTiN a extrémně vysokou tvrdost nanokompozitních vrstev [35].

TripleCoatings³ mohou být připraveny především díky obloukové technologii pracující s rotačními, většinou neslitinovými terči. Základní konfigurace povlakovacího zařízení Pi300 pracuje s 3+1 katodami. Tři LARC katody (Lateral Rotating Cathodes) jsou ve dveřích a jedna CERC katoda (Central Rotating Cathode) je uprostřed povlakovací komory. Schéma povlakovacího zařízení je na obr. 32. Struktura a složení povlaků jsou volně programovatelné. Struktura TripleCoatings³ je následující (obr. 31) [42]:

- tenká (~200 nm) adhezní vrstva je deponována z čistého Ti nebo Cr terčů (katody),
- houževnatá základní vrstva (TiAlN-AlTiN) je deponována s pomocí centrálního (AlTi) terče (katody) a z Ti terče (katody) umístěného ve dveřích,
- povrchová velmi tvrdá a otěruvzdorná vrstva může být tvořena CrAlN/SiN, resp. TiAlN/SiN nanokompozitním povlakem. Povrch je tak extrémně tvrdý a tepelně odolný.



Obr. 31 Schéma navrstvení povlaku TripleCoatings³ [40].



Obr. 32 Rozmístění katod v povlakovacím zařízení Pi300 [42].

Standardní TripleCoatings³ jsou reprezentovány povlaky $n\text{ACo}_3$, $n\text{ACrO}_3$, $n\text{ACOX}_3$. $n\text{ACo}_3$ byl prvním z povlaků ze strukturou TripleCoating³. Vrchní funkční část je tvořena ověřenou nanokompozitní mikrostrukturou povlaku $n\text{ACo}$, která je tvořena dvěma vzájemně nerozpustnými fázemi. Kovovou fází tvoří AlTiN a po hranicích zrn je vyloučena amorfni fáze Si_3N_4 . Vrchní vrstva má odolávat degračním mechanismům při obrábění se zaměřením na oteruvzdornost a tepelnou odolnost. Střední – funkční – vrstvu tvoří povlak

AlTiN s vhodnou tvrdostí a houževnatostí. Tato vrstva tvoří přiměřený podklad pro tvrdší a méně houževnatou vrstvu nAlCo. Na povrchu nástroje je nanášena adhezni vrstva TiN, která zabezpečuje dobrou adhezi povlaku. Tloušťka takto připraveného povlaku je standardně 0,003 mm a povlak je vhodný pro aplikace vrtání a frézování.

Povlak nAlCOX₃ je speciálně vyvinut pro aplikace suchého soustružení. Nyní se tato novinka testuje v oblasti obrábění vysoce abrazivních materiálů [43].

5.8 Larc®

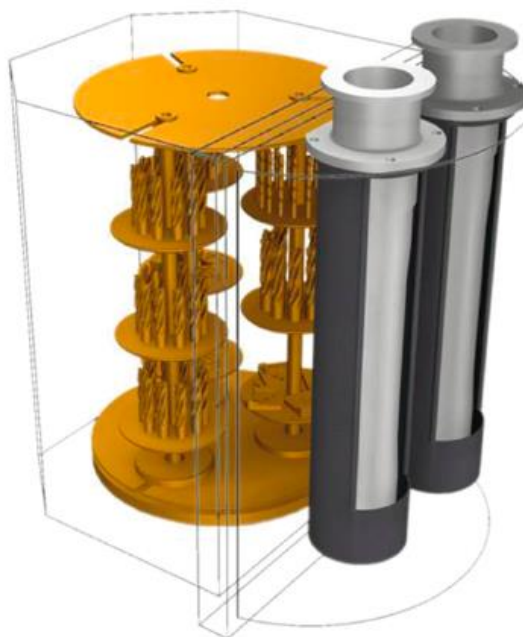
Aby bylo možné připravit nanokompozitní vrstvu kombinací různých materiálů nanášených z více terčů, musí zařízení splňovat tyto základní podmínky [34]:

- terče odpařovaného materiálu musí být v těsné blízkosti;
- ionizace plazmatu musí být vysoká.

Tento problém optimálně řeší technologie používající rotační elektrody.

Vývoj technologie proběhl ve spolupráci švýcarské firmy PLATIT AG a české firmy SHM, s. r. o., v několika posledních letech. Výsledkem je nová technologie LARC uplatněná na zařízení π^{80} , nabízeném na světovém trhu firmou PLATIT od konce roku 2002.

Jako zdroj odpařovaného materiálu slouží dvě rotační elektrody umístěné těsně vedle sebe (obr. 33) – při použití planárních elektrod by odpovídající odpařovací systém zabíral zhruba třikrát více místa a nedocházelo by k promíchání obou složek vrstvy. Magnetické pole je vytvářeno kombinací permu lze odpařovat materiál v silném magnetickém poli, což zajistí vysokou ionizaci plazmatu a nízký počet makročástic – planární elektrody mají v silném magnetickém poli nesrovnatelně nižší životnost. Konstrukce elektrod umožňuje navíc originální způsob čištění elektrod před vlastním procesem pomocí tzv. virtuální uzávěrky (Virtual Shutter) [34].



Obr. 33 Rotační obloukové elektrody technologie LARC® v povlakovacím zařízení Pi111 [2].

Přínosy technologie

Nejvýznamnější výhody, které technologie LARC přináší, jsou odvozeny od rotujících katod a jejich vzájemně blízké pozice a lze je stručně shrnout takto [34]:

- optimální adheze s použitím virtuální závěrky je umožněna díky otočnému magnetickému poli bez citlivých mechanických částí, rychlému čištění targetů mimo povlakované substráty a čisté depozici materiálu terčů na substrát od samého počátku procesu,
- jemný povrch povlaku s minimalizovaným obsahem makročástic je dosažen díky rychlému pohybu katodové skvrny, umožněnému vysokým magnetickým polem a rotací elektrod a také rovnoměrné erozi odpařovaných terčů,
- příprava nanokompozitních vrstev je možná vysokou ionizací plazmatu s vysokou intenzitou magnetického pole a vytvořením dvou fází, např. nc- (TiAl)N/a-Si₃N₄ nebo nc- TiN/a-Si₃N₄,
- programovatelná stechiometrie povlaků zase umožňuje gradientní vrstvy s proměnným složením, a tím kombinaci různých typů vrstev – to vše bez nutnosti výměny targetů během procesu a s použitím levných typů targetů, např. Ti, Al, AlSi atd.,
- díky optimálnímu využití prostoru s válcovými, rotačními katodami umístěnými na straně povlakovací komory lze získat multi nebo nanovrstevné struktury v jednom zařízení a procesu,
- zásluhou válcového tvaru je dosaženo maximální efektivní šířky terčů – $d \times \pi$.

ZÁVĚR

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, povrchové úpravy mohou významně ovlivnit výkonnost a trvanlivost řezných nástrojů. Ostří nástrojů lze vybrousit nebo vyleštit, čímž se dosáhne snadnějšího obrábění s nižší energetickou spotřebou. Ovšem mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti celého břitu jsou i nadále limitovány základním materiálem. Proto byla tato práce zaměřena na nanášení tenkých vrstev povlakováním, které překonávají vlastnosti základního materiálu, neboť mají jemnou strukturu, neobsahují pojivo, jsou tvrdé a teplotně odolné zvláště při vysokých kontaktních tlacích.

Jednou z význačných inovací v této technologii bylo vyvinutí nanovrstvených struktur, které představují velmi tenké vrstvy rozdílného složení a struktur, nanesených na sobě. Vrstvy mohou být takového chemického složení, které zaručí dobrou kohezi k podkladu a směrem k povrchu je lze různě kombinovat, což ovlivňuje výsledné vlastnosti povlaku i celého břitu. Dále lze ovlivnit chemickou a krystalografickou strukturu vrstev, což umožňuje např. zvýšení obsahu hliníku v povlaku a tím i dosáhnout větší tvrdosti a trvanlivosti břitu.

Díky nanovrstveným strukturám byly objeveny nanokrystalické kompozity, což jsou malé monokrystaly (TiN) zakotvené ve vhodné amorfní matici (Si_3N_4). I tyto materiály bude nutné dále studovat, neboť mohou být citlivé na čistotu vstupních materiálů pro tvorbu povlaku a na kvalitu mezifázového rozhraní povlak-substrát.

Další oblastí výzkumu v technologii bude optimalizace rozmístění terčů v povlakovací komoře. Lze je umístit do středu komory centrálně k povlakovacím nástrojům, nebo mohou být ve dveřích povlakovací komory a nebo na obou místech. Tímto rozmístěním terčů, aplikací vhodných hodnoty proudů na elektrodách a jejich poměrem lze měnit stechiometrii, rychlost růstu a částečně i drsnost vrstev bez fyzické výměny materiálu elektrod. Dalším faktorem ovlivňující vlastnosti povlaků je pohyb terčů. Jejich planetární pohyb ovlivňuje řezný výkon povlaku, synchronizace rychlosti rotace ve vztahu k proudům na elektrodě lze dosáhnout z hlediska tvrdosti i optimalizované tloušťky povlaku.

Dalším možným výzkumem v povlakovací technologii může být snížení nečistot v oceli a jiných kovů. Zejména kyslík rozložený na hranice zrn způsobuje tvorbu křehkých oxidů, což má za následek katastrofické selhání soudržnosti povlaku. Přítomnost kyslíku také může bránit segregaci fází do nc-TiN a Si_3N_4 a stabilizovat nadměrně amorfní struktury.

Pro dosažení dalšího pokroku v technologii povlakování bude potřeba dodržet vhodné termodynamické a kinetické podmínky tvorby fází při jejich depozici, což si bude žádat jak řešení složitých nestacionárních termodynamických úloh, tak jejich experimentální ověření.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
2. *Jemná mechanika a optika*. Praha: Fyzikální ústav Akademie věd ČR, 2010, 7 - 8. ISSN 0447-6441. Dostupné z: <http://jmo.fzu.cz/2010/Jmo-07-08/JMO-201007-08.pdf>
3. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
4. Pramet Tools, s. r. o. [online]. [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.pramet.com/cz/o-spolecnosti/aktuality.html/5_2469-up-grade-vaseho-obrabeni/1
5. *Nové soustružnické materiály řady T9300*. Pramet Tools, s. r. o., Šumperk, Česká Republika. Duben 2013 [online]. [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.pramet.com/cz/o-spolecnosti/aktuality.html/5_2469-up-grade-vaseho-obrabeni/1
6. *Nové soustružnické materiály řada T8300*. Pramet Tools, s. r. o., Šumperk, Česká Republika. Duben 2013 [online]. [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.pramet.com/cz/o-spolecnosti/aktuality.html/5_2469-up-grade-vaseho-obrabeni/1
7. STJERNSTOFT. *Machining of Some Difficult-to-Cut Materials with Rotary Cutting Tools*. Stockholm: The Royal Institute of Technology, KTH, 2004. ISBN 91-7283-669-5. Dostupné z: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:9531/FULLTEXT01>
8. DORAZIL, Eduard. *Strojírenské materiály a povrchové úpravy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, únor 1988. ISBN 55-607-88.
9. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
10. SVATOŠ, Jiří. *Řezné nástroje: 16*. Technický týdeník [online]. Praha: SpringerMedia, 2012 [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-16_19230.html
11. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
12. BORO VAN, Petr. *Řezné nástroje: 2*. Technický týdeník [online]. Praha: SpringerMedia, 2011 [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-2_8514.html
13. *Trendy v povlakování slinutých karbidů*. MM Průmyslové spektrum: Výroba/Obrábění. 2011, č. 7, str. 43. DOI: 010705. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>

14. KARKOŠ, Michal. *Cermety s vysokou tuhostí*. MM Průmyslové spektrum: Výroba/Obrábění. 2013, č. 10, str. 65. DOI: 131031. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/cermety-s-vysokou-tuhosti.html>
15. Sandvik CZ, s. r. o. *Řezná keramika* [online]. [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/ceramics/pages/default.aspx
16. ČEP, Róbert. *Výkonné řezné materiály*. MM Průmyslové spektrum: Trendy/Obrábění. 2003, č. 4. DOI: 030432. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vykonne-rezne-materialy.html>
17. Sandvik CZ, s. r. o. Polykrystalický diamant [online]. [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_diamond/pages/default.aspx
18. Sandvik CZ, s. r. o. *Opotřebení břitu* [online]. [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx
19. AUDY, Jaromír. *Důležitost povlakování řezných nástrojů pro ekonomické obrábění*. MM Průmyslové spektrum: Trendy/Obrábění. 2009, č. 12, str. 46. DOI: 091206. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezitest-povlakovani-reznych-nastroju-pro-ekonomicke-obrabeni.html>
20. DE VOS, Patrick. MM Průmyslové spektrum: Trendy/Obrábění. Příručka pro technology: Profesionální obrábění kovů ... mýtus nebo realita?. 2013, č. 12, str. 52. DOI: 131215. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-profesionalni-obrabeni-kovu-mytus-nebo-realita.html>
21. RAO, R. Decision making in the manufacturing environment: using graph theory and fuzzy multiple attribute decision making methods. London: Springer, c2007, xviii, 373 p. ISBN 978-184-6288-197.
22. DE VOS, Patrick. MM Průmyslové spektrum: Výroba/Obrábění. *Příručka pro technology: Jak je to s řeznými silami?*. 2012, č. 3, str. 68. Dostupné z: <file:///Users/Miridy/Desktop/citace/22-%5B63%5DPř%C3%ADručka%20pro%20technology%20-%20Jak%20je%20to%20s%20řeznými%20silami%3F.webarchive>
23. POPOV, Alexey. *Teorie obrábění: Obrobitelnost materiálů a řezivost řezných nástrojů*. Technická Univerzita v Liberci, 2012, 20 s. Dostupné z: http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM_TO_PR_13_CZE_Popop_Obrobitelnost_materialu_a_rezivost_reznych_nastroju.pdf
24. ŠIMŮNEK, Dalibor, Antonín KŘÍŽ a Olga BLÁHOVÁ. *Hodnocení opotřebení břitu nástrojů s tenkou otěruvzdornou vrstvou*. Hradec nad Moravicí, 2003. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_03/papers/192.pdf. Západočeská univerzita v Plzni fakulta strojní.

25. ČEP, Róbert, Michal HATALA a Imrich ORLOVSKÝ. Automobil Industry. *Metody zkoušek obrobiteľnosti materiálů*. 2009, č. 3, s. 4. Dostupné z: <http://infocube.cz/cs/automobil-industry-32009-3/>
26. Wikipedie. *Machinability* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Machinability>
27. BUILDER. *Machinability Ratings*. Quaker Knowledge Network, 2007, 6 s.
28. A.S. Argon , M.G.J. Veprek-Heijman , R.F. Zhang , S. Vepřek , S.H. Sheng *Superhard nanocomposites: Origin of hardness enhancement, properties and applications*. Surface & Coating Technology 204 (2010), pp. 1898-1906.
29. ZEMAN, Pavel. MM Průmyslové spektrum: Trendy/MSV 2013. *Řezné nástroje a testování jejich vlastností*. 2013, č. 9, str. 84. DOI: 130944. Dostupné z: <file:///Users/Miridy/Desktop/citace/29-%5B50%5DŘezné%20nástroje%20a%20testován%C3%AD%20jejich%20vlastnos t%C3%AD.webarchive>
30. ŠÍMA, Michal a Ondřej ZINDULKA. MM Průmyslové spektrum. *Měření vlastností povrchů na nástrojích*. 2004, č. 6, str. 30-31. Dostupné z: <http://www.kom.tul.cz/to/sdilene/merenipovlaku.pdf>
31. BUNSHAH, Rointan F. *Handbook of Hard Coating*. New York: Wialam Andrew Publishing, 2001, 550 s. ISBN 08-155-1438-7.
32. HOŘEJŠ, Slavomír. MM Průmyslové spektrum: Trendy/Povrchové úpravy. *Povlakování nástrojů metodou PACVD*. 2008, č. 4, str. 60. DOI: 080436. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-nastroju-metodou-pacvd.html>
33. HOLUBÁŘ, Pavel. MM Průmyslové spektrum: Komerční příloha/Povrchové úpravy. *20 let vývoje průmyslových PVD technologií*. 2013, č. 5, str. 94. DOI: 130514. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/20-let-vyvoje-prumyslovych-pvd-technologie.html>
34. MM Průmyslové spektrum: Trendy/Povrchové úpravy. *Nová průmyslová technologie povlakování*. 2003, č. 4, str. 48. DOI: 030430. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-prumyslova-technologie-povlakovani.html>
35. SHM, s. r. o. *Nanokrystalické kompozity* [online]. [vid. 2014-03-23]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/vav-centrum/nanokrystalicke-kompozity/>
36. ZINDULKA, Ondřej. MM Průmyslové spektrum: Trendy/Povrchové úpravy. *Moderní metody povlakování nástrojů*. 2004, č. 10, str. 28. DOI: 041051. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-metody-povlakovani-nastroju.html>
37. ŠÍMA, Michal, Mojmir JÍLEK, Pavel HOLUBÁŘ a Ondřej ZINDULKA. *NANOKRYSTALICKÉ OTĚRUVZDORNÉ nc-(Ti1-XAIX)N/a-Si3N4 NANÁŠENÉ PVD TECHNOLOGIÍ*. Brno: SHM, s. r. o., 2002, 4 s. Dostupné z: <http://csnmt.fme.vutbr.cz/nano02/sbornik/210.pdf>

38. HOLUBÁŘ, Pavel, Mojmír JÍLEK a Michal ŠÍMA. *Nanokompozitní otěruvzdorné PVD vrstvy*. Ostrava: METAL, 2001, 9 s. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_01/papers/10.pdf
39. SHM, s. r. o. PVD povlaky [online]. [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/>
40. HOLUBÁŘ, Pavel a Mojmír JÍLEK. *Představení firem SHM a PIVOT*. Masarykova Univerzita, Přírodovědecká fakulta, Ústav Fyzikální Elektroniky, 2011, 47 s. Dostupné z: <http://is.muni.cz/el/1431/podzim2011/F5900/um/prezen/SHM-1.pdf>
41. ZINDULKA, Ondřej, Pavel HOLUBÁŘ, Mojmír JÍLEK a Roman JANKŮ. MM Průmyslové spektrum: Odborná příloha/Povrchové úpravy. *Nový systém kluzných PVD povlaků*. 2005, č. 4, str. 88. DOI: 050433. Dostupné z: http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/03/2005_04.pdf
42. HOLUBÁŘ, Pavel, Michal ŠÍMA a Vladimír MAIXNER. MM Průmyslové spektrum: Komerční příloha: Povrchové úpravy / Technologie povrchových úprav. *Aplikace nových modifikací třívrstevých PVD povlaků*. 2011, č. 4, str. 52. DOI: 110444. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-novych-modifikaci-trivrstvych-pvd-povlaku.html>
43. SONDOR. MM Průmyslové spektrum: Trendy/Obrábění. *Průmyslové aplikace nových povlaků*. 2012, č. 5, str. 49. DOI: 120538. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-aplikace-novych-povlaku.html>
44. KŘÍŽ, Antonín. *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam - materiálový výzkum. 2006 [vid. 2014-05-25]. Dostupný z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
45. ZAPLETAL, Zdeněk. *Prášková metalurgie a její využití*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2002 [vid. 2014-05-25]. Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/praskova-metalurgie-a-jeji-vyuziti>
46. KŘÍŽ, Antonín. *Nové trendy vývoje tenkých vrstev vytvořených PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam – materiálový výzkum. [vid. 2014-05-25]. Dostupný z: http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf
47. TÖNSHOFF, H.K., KARPUSCHEWSKI, B., MOHLFELD, A., SEEGER, H.: Influence of Subsurface Properties on the Adhesion Strength of Sputtered Hard Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 1999, Vol. 116-119, pp. 524-529.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
AISI		American Iron and Steel Institut
Al₂O₃		oxid hlinitý
Al		hliník
Ar		argon
B		bor
BN		nitrid boru
C		uhlík
CERC		CEntral Rotating Cathodes
CNB		kubický nitrid bóru
Co		kobalt
Cr		chrom
Cr₃C₂		karbid chromu
CrN		nitrid chromu
CT		Cermet
CVD		Chemical Vapour Deposition
DLC		Diamond like Carbon
HB		tvrdost dle Brinella
Hf		hafnium
HfC		karbid hafnia
HRC		tvrdost dle Rocwella
HSS		rychlořezná ocel
HV		tvrdost dle Vickerse
CH₃CN		acetonitril
CH₄		methan
KM		keramické řezné nástroje
LARC		LAteral Rotating Cathodes
M₂₃C		karbid chromu
Mn		mangan
Mo		molybden

MT-CVD		Middle Temperature Chemical Vapour Deposition
N₂		plyn dusíku
NbC		karbid niobu
NbN		nitrid niobu
NH₄		amoniak
Ni		nikl
PACVD		Plasma CVD
PECVD		Plasma Enhanced CVD
PKD		polykrystalický diamant
PSK		povlakovaný slinutý karbid
PVD		Physical Vapour Deposition
Si		křemík
Si₃N₄		nitrid křemičitý
SiC		karbid křemíku
SiCw		whiskery karbidu křemíku
SK		slinutý karbid
SK		nepovlakovaný slinutý karbid
TaN		nitrid tantalu
TiB₂		titan diboridu
TiC		karbid titanu
TiCl₄		chlorid titančitý
TiCN		titanium carbon-nitrid
TiN		nitrid titanu
V		vanad
VBD		vyměnitelní břitová destička
VC		karbid vanadu
VN		nitrid vanadu
W		wolfram
WC		karbid wolframu
Y		yttrium
Zr		zirkonium

ZrN		nitrid zirkonu
a-CN_x		amorfní nitrid uhlíku
b.c.c.		mřížka krychlová prostorově středěná
f.c.c.		mřížka krychlová plošně středěná

Symbol	Jednotka	Popis
Ra	[μ m]	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rq	[μ m]	střední kvadratická hodnota drsnosti
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
f	[mm.ot ⁻¹]	posuv
a_p	[mm]	hloubka řezu
°C		stupeň Celsia
GPa		giga pascal
T	[min]	trvanlivost řezného nástroje
Z	[min]	životnost řezného nástroje
n	[-]	počet využitelných břitů na jedné straně destičky
p	[-]	vyjádření jestli je VBD jedno nebo vícestranná
F_c	[N]	hlavní složka řezné síly
F_f	[N]	axiální složka řezné síly
F_p	[N]	radiální složka řezné síly
F_a	[N]	aktivní síla
P_{fe}	[-]	pracovní boční rovina
F_e	[N]	pracovní síla
F_{CN}	[N]	kolmá pracovní síla
C_F	[-]	konstanta
x_F	[-]	exponent podmínky řezného procesu stanoven empiricky
k_c	[-]	měrná řezná síla
h_D	[mm]	jmenovitá tloušťka průřezu
C_{kc}	[-]	empiricky stanovená konstanta
u_{kc}	[-]	empiricky stanovená konstanta

K_v	[-]	intenzita opotřebení bříty
t		časová závislost rozvoje opotřebení
m		směrnice přímky
nm		nanometr
Pa		pascal
MPa		mega pascal

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 BUILDER. *Machinability Ratings*. Quaker Knowledge Network, 2007, 6 s.
- Příloha 2 SAKHAROVA, N A. *Comparison between Berkovich, Vickers and conical indentation tests: A three-dimensional numerical simulation study*. [online]. 2009 [vid. 2014-05-24].
- Příloha 3 KŘÍŽ, Antonín. *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam - materiálový výzkum. 2006 [vid. 2014-05-25]. Dostupný z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf.

