

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Výrobní a materiálové inženýrství

Diplomová práce

POVLAKY PRO STŘIŽNÉ NÁSTROJE

2017

Bc. MARCEL LINHART





Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 25. 1. 2017

.....

podpis



PODĚKOVÁNÍ

Především bych chtěl velmi poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Františku Tatičkovi, za velmi užitečnou metodickou pomoc a podnětné rady při zpracování práce.

Další díky patří firmě TE Connectivity konkrétně paní Ing. Janě Roubalové. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině a blízkým za podporu při psaní diplomové práce.

V Praze dne 25. 1. 2017

.....

podpis



ANOTACE

Jméno autora: Bc. Marcel Linhart
Název DP: **Povlaky pro střížné nástroje**

Rozsah práce:
Akad. rok vyhotovení: 2015/2016
Ústav: Ústav strojírenské technologie
Vedoucí DP: Ing. František Tatíček, Ph.D.
Konzultant:
Zadavatel tématu: ČVUT FS, Ú12133
Využití: Střížné a lisovací nástroje

Klíčová slova: technické materiály, kovy, povlaky, povrchová úprava, střížné nástroje, lisovací nástroje

Anotace: Zpracování teoretické a praktické části o návrhu povlaků pro střížné nástroje používaných ve firmě TE Connectivity. Navrhnuté povlaky budou aplikovány na střížné nástroje a následně provedeno hodnocení struktury na metalografických vzorcích a zkoušky tvrdosti. Po vyhodnocení metalografických vzorků bude následovat diskuze o vhodnosti použití daných povlaků, možná aplikace a použití v provozu.



ANOTACE

- Author:* Marcel Linhart
- Title:* **Coatings for cutting tools**
- Range:*
- Academic Year:* 2015/2016
- Department:* Institute of Manufacturing Technology
- Tutor:* Ing. František Tatíček, Ph.D
- Consultant:*
- Title submitter:* ČVUT FS, Ú12133
- Usage:* Measurement of the temperature behavior of machine tools
-
- Keywords:* Technical materials, metals, coatings, coating, cutting tools, dies
-
- Annotation:* Processing the theoretical and practical part of the design of coatings for cutting tools used in the company TE Conektivity. Proposed coatings will be applied to cutting tools and subsequently evaluated the structure on metallographic samples and hardness tests. After evaluation of metallographic samples will be followed by a discussion about the appropriateness of the use of such coatings, applications and possibly used in the operation.



Obsah

Úvod.....	8
1. TEORIE TVÁŘENÍ	9
1.1 Podstata a hlavní znaky tvářecích procesů.....	9
1.2 Krystalová porucha mřížky.....	10
1.2.1 Hranová dislokace	10
1.2.2 Šroubová dislokace	11
1.3 Plastické deformace kovů	12
1.4 Deformační zpevnění při tváření za studena.....	13
2. METODY PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ	16
2.1 Stříhání	16
2.1.1 Princip stříhání.....	17
2.1.2 Střížná vůle.....	19
2.1.3 Střížná síla.....	22
1.1.1 Střížná práce	25
1.1.2 Přesnost povrchu při stříhání.....	27
3. METODY POVLAKOVÁNÍ NÁSTROJŮ	28
3.1 Metoda PVD.....	32
3.1.1 Naprašování	33
3.1.2 Napařování.....	36
3.1.3 Přehled PVD povlaků	38
3.2 Metoda CVD	42
3.2.1 Modifikace metody CVD	45
4. KONTROLA POVLAKŮ	47
4.1 Měření tvrdosti povlaku	47
4.2 Měření tloušťky povlakované vrstvy	48
4.3 Měření drsnosti povlaku	48



4.4	Přilnavost povlaků	49
4.4.1	Mercedes test	50
4.4.2	Scratch test	51
4.4.3	Pin on disc	53
4.4.4	Pozorování při reálných provozních podmínkách	53
4.5	Vliv povlaků na strukturní změny základního materiálu	54
4.5.1	Úpravy nástrojů před povlakováním	54
4.5.2	Čištění nástrojů v průběhu samotných PVD procesů	56
4.5.3	Méně využívané metody úprav nástrojů	56
5.	PRAKTICKÁ ČÁST	58
5.1	Vytipované nástroje	58
5.2	Volba povlaků	63
5.3	Výpočty pro zvolené razníky	65
5.3.1	P2 Kotva	65
5.3.2	JHO MSR	66
5.4	Vyhodnocení metalografických vzorků	68
5.5	Vyhodnocení tvrdosti	70
5.6	Testování při reálných podmínkách	74
	Závěr	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM TABULEK	82
	POUŽITÁ LITERATURA	83



Úvod

Tváření je proces zpracování materiálu, který se zabývá změnou tvaru polotovaru, a to bez vzniku objemu. Tvářecím procesem můžeme dosáhnout požadovaných objemových nebo plošných změn tvarů, ale také dělit materiál. Všechny tyto operace provádíme buď tzv. za studena, nebo za tepla, to udává pásmo teplot, v jakých se během samotného procesu pohybujeme. Společně s volbou vhodných technologií, nástrojů a postupů je tváření velice komplexní proces. Proto, jako i ve všech ostatních odvětvích, jsou na materiály tvářecích nástrojů vzneseny různé požadavky na vlastnosti, které je potřeba pro dosažení správné funkčnosti dodržet. Tyto požadavky jsou rozdílné téměř pro každou součást tvářecího nástroje, jehož konstrukce bývá v některých případech značně komplikovaná. Při návrhu tvářecího nástroje je proto potřeba přistupovat k výběru vhodného materiálu jak z hlediska technologického, tak z hlediska ekonomického, aby bylo možné výrobní náklady snížit na minimum a tím zvýšit celkový zisk. Z toho důvodu je snaha o minimalizaci využití ekonomicky nákladných materiálů pouze na části nástroje, kde je to nezbytně nutné. To sice může vést k složitější konstrukci samotného nástroje, ale také k nižším pořizovacím nákladům. V poslední době se hodně využívají tepelné a povrchové úpravy materiálů, které dávají levnějším materiálům požadované vlastnosti. Lze tak dosáhnout dalšího snížení nákladů. Proto se pro konstrukci tvářecích nástrojů používá široké spektrum materiálů, od konstrukčních ocelí, přes ušlechtilé a legované až po nástrojové, a dále pak různé neželezné materiály. Cílem této práce je se konkrétně zaměřit na úpravy povrchů tvářecích nástrojů vedoucí ke zvýšení užitných vlastností, porovnat různé metody a složení povlaků vedoucí ke zvýšení životnosti funkční části nástroje, které následně budou doporučeny firmě TE Connectivity Trutnov.



1. TEORIE TVÁŘENÍ

Technologie tváření je proces, který mění výchozí tvar materiálu za působení síly bez změny objemu materiálu.

Ve strojírenství je tváření proces s vysokou produktivitou i hospodárností, a tedy i s velkou perspektivou ve všech možných odvětvích. Výrobky vyrobené tvářeními jsou velice pevné, lehké a díky použitým technologiím velmi hospodárné, s nejmenším podílem odpadu. V porovnání s jinými technologiemi, například obráběním, je poměr odpadu o 20 až 40 % menší.

[1]

1.1 Podstata a hlavní znaky tvářecích procesů

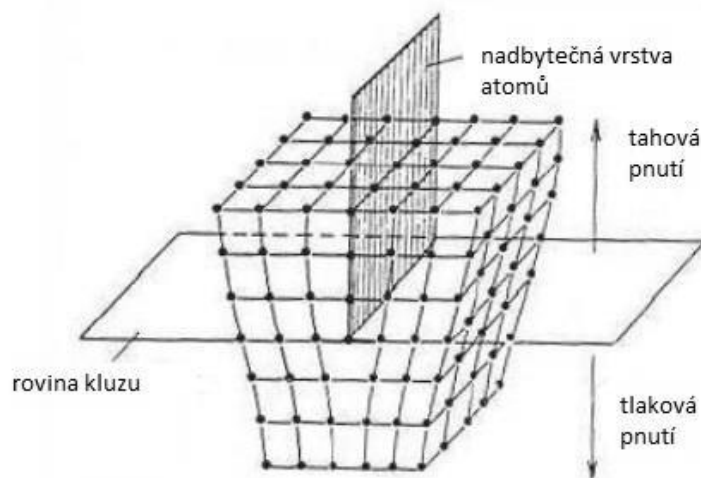
Základem všech tvářecích procesů jsou plastické deformace, které probíhají v materiálu. Jedná se o trvalou změnu tvaru a rozměrů tvářeného polotovaru, vyvolanou účinkem vnějších sil vyvozených tvářecím nástrojem a strojem na materiál. Aby došlo k deformaci, vnější síla musí vyvolat takový stav napjatosti, aby byla překročena mez kluzu a následně tak vznikla trvalá a nevratná deformace v požadovaném směru a požadované velikosti bez jakéhokoliv porušení soudržnosti vyčerpání zásoby plasticity.

Tváření, zvláště tváření za studena, je doprovázeno fyzikálními a strukturálními změnami materiálu, které se projevují především změnou jejich vlastností, ať už fyzikálních nebo mechanických. Výsledného tvaru o daných rozměrech docílíme postupným přemísťováním materiálu v jeho tuhém stavu. Při tváření se řeší velikosti tvářecích sil, tvářitelnost, dosažené mechanické vlastnosti apod. Při tváření platí řada zákonitostí jako je např. zákon o stálosti objemu.

[2]

1.2 Krystalová porucha mřížky

Pod pojmem krystalová porucha mřížky rozumíme nepravidelnosti v uspořádání krystalů při krystalizaci. Poruchy krystalové mříže lze rozdělit podle různých hledisek. Nejpřirozenější se zdá rozdělení podle dimenze, tj. na poruchy bodové (bezrozměrné), čárové (jednorozměrné), plošné (dvojezměrné) a objemové (trojrozměrné). Pro teorii tváření jsou nejvýznamnější poruchy čárové neboli dislokace, které je možno dále rozdělit na dislokaci hranovou a šroubovou.



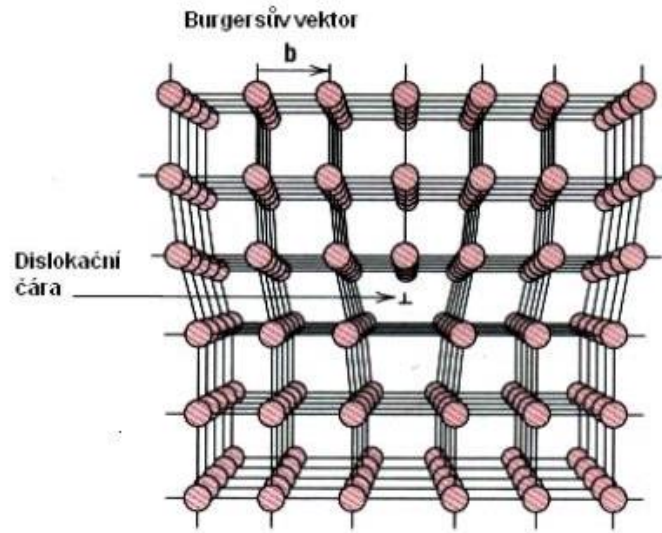
Obrázek 1- Porucha mřížky

1.2.1 Hranová dislokace

Na obr. 2 je znázorněna hranová dislokace, kde je zakreslen tzv. Burgersův vektor b , který zkonstruujeme tak, že kolem dislokace vytvoříme Burgersovu smyčku, skládající se ze stejného počtu kroků doprava jako doleva a nahoru jako dolů. Volný vektor b , který smyčku uzavírá, je kolmý na dislokační čáru (hranu nadbytečné poloroviny) a vytváří s ní tzv. skluzovou rovinu, v níž se hranová dislokace pohybuje. Pohyb dislokace je velmi „úsporný“. Probíhá tak, že v důsledku kmitů mříže se naruší vazby v okolí dislokace a ta se posune o jednu meziatomovou vzdálenost (úspornost pohybu dislokace je důvodem, proč je experimentální kritické skluzové napětí mnohokrát nižší, než vypočtené – Frenkelův model vycházel z předpokladu posuvu části krystalu nad

skluzovou rovinou vůči části pod ní jako celek, tedy předpokládal narušení obrovského počtu vazeb najednou).

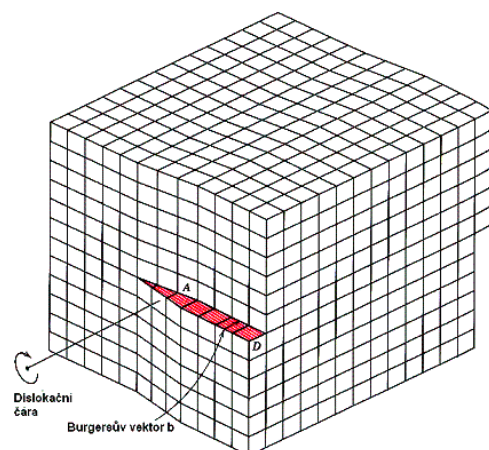
[5]



Obrázek 2- Hranová dislokace

1.2.2 Šroubová dislokace

Šroubová dislokace obr. 3 vznikne tak, že rozříznutý krystal podrobíme stříhové deformaci. Burgersův vektor této dislokace je rovnoběžný s dislokační čarou a existuje tedy velký počet skluzových rovin, v nichž se dislokace může pohybovat (dislokační čára je osou svazku všech těchto skluzových rovin).



Obrázek 3 - Šroubová dislokace

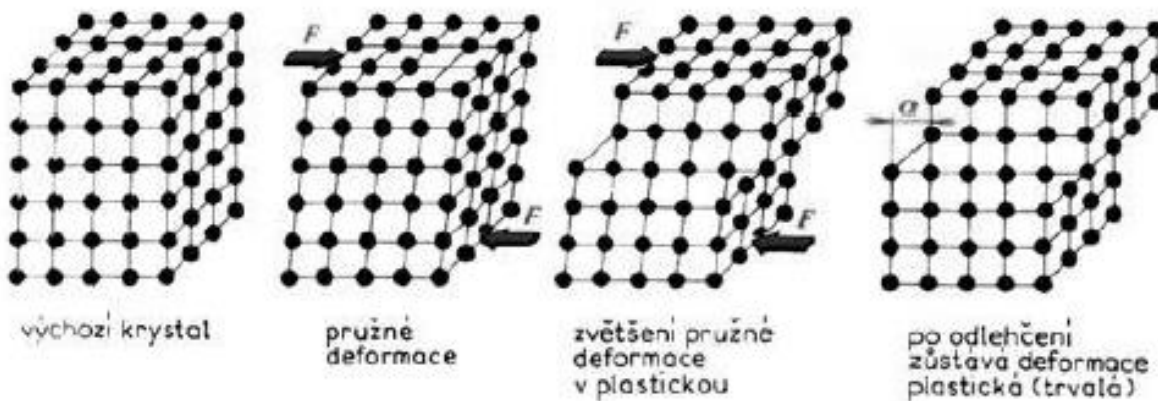
1.3 Plastické deformace kovů

Podle fyzikální povahy je možné deformaci rozdělit na pružnou (elastickou) a plastickou. Při pružné deformaci se materiál bude vracet do původního stavu, pokud na něj přestane působit síla, která tuto deformaci způsobila. Při plastické deformaci je změna tvaru nezvratná a je zachována i po odstranění příčin deformace.

Plastická deformace se odehrává za pomoci dislokací, tak není nutno překonávat vazebné síly mezi atomy na celé skluzové rovině, ale vždy pouze v jedné řadě viz obr. 4. Plastická deformace je v podstatě pohyb jednotlivých částí kovů vůči sobě v rovinách, aniž by mezi nimi přestala působit koheze.

Mechanismus vzniku plastických deformací nám popisuje dislokační teorie, která hovoří o pohybech a vzniku mřížkových poruch.

[2]



Obrázek 4 - Mechanismus kluzu

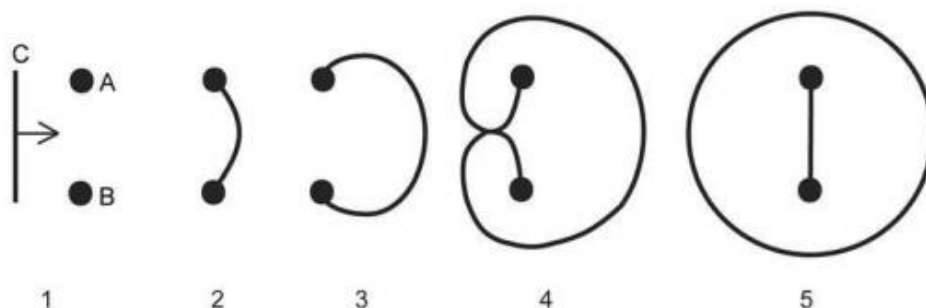
1.4 Deformační zpevnění při tváření za studena

Základní mechanismy zpevnění

- Plastická deformace - dislokace, nebo vady materiálu, které brání v pohybu dislokací
- Legování - přidání prvků, které vytváří roztoky intersticiální nebo substituční
- Tepelné zpracování - kalení

K deformačnímu zpevnění dochází, jestliže kovový materiál plasticky deformujeme (tváříme) za studena, tzn. za teploty nižší než je teplota rekrytalizace. Při plastické deformaci dochází ke skluzu dislokací, ale zároveň vznikají nové dislokace ze stávajících dislokací.

Příkladem zdroje nové dislokace je Frankův-Readův zdroj viz obr. 5. Nutnou podmínkou zdroje je existence překážek, které brání pohybu dislokace. Těmi mohou být například tvrdé částice nebo jiné fáze v mikrostruktuře. Jestliže dislokace při svém skluzovém pohybu narazí na tyto překážky, chová se pružně a způsobí její prohýbání. Výsledkem tohoto procesu je vznik nové dislokace ve tvaru smyčky. Zbylý úsek zakotvený mezi částicemi se znovu prohýbá a celý proces se opakuje. Z jedné dislokace tak může vzniknout až několik set nových dislokací.

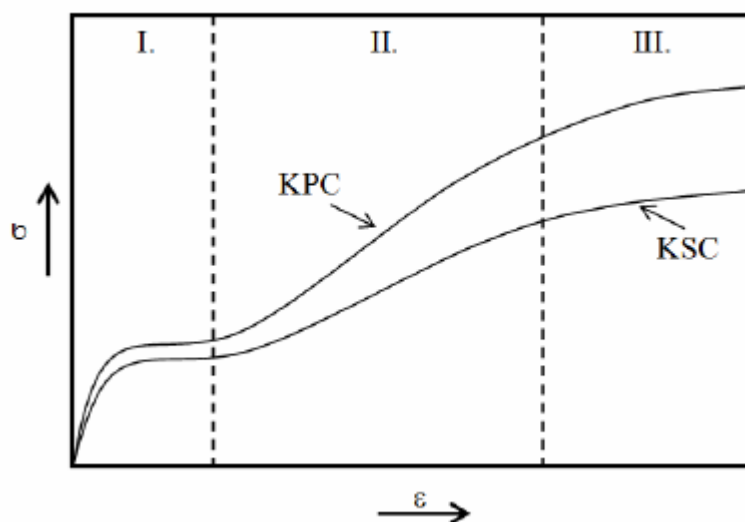


Obrázek 5 - Znáznornění Frankova-Readova zdroje dislokací: A, B – překážky pohybu dislokace C, 1 – skluz dislokace, 2-4 – prohýbání dislokace, 5 – vznik nové dislokační smyčky

Deformační zpevnění monokrystalu

Na obr. 6 je znázorněno deformační zpevnění monokrystalu křivkou KSC, které je rozděleno do třech oblastí [9]:

- I. oblast - jedná se o oblast snadného skluzu. Pro tuto oblast je charakteristický malý koeficient zpevnění. Délka této oblasti obecně závisí na velikosti a orientaci krystalů.
- II. oblast - kov se zpevňuje prakticky lineárně a součinitel zpevnění má maximální hodnotu. Hustota dislokací se postupně zvyšuje a zkracuje se jejich volná dráha. Hlavní příčinou jsou dislokace Lomer-Cottrellova typu, které jsou nepohyblivé a vytvářejí dislokační síť.
- III. oblast - křivka zpevnění má následkem uplatnění příčného kluzu parabolický průběh, který umožňuje šroubové dislokaci obejít překážku přechodem do jiné kluzové roviny. Při vysoké hodnotě energie vrstevných chyb je šířka rozštěpené dislokace menší, a proto je menší napětí nutné k zaškrcení rozštěpené dislokace a jejímu převedení do roviny se snadnějším pohybem dislokace a vzniká příčný kluz.



Obrázek 6 - Křivky deformačního zpevnění



Deformační zpevnění polykrystalu

Na obr. 6 je deformační zpevnění polykrystalu křivkou KPC. Tvar této křivky je dán průměrnými hodnotami napětí a deformace v důsledku různé orientace krystalové mřížky v jednotlivých místech. U deformačního zpevnění polykrystalů se uplatňují stejné mechanismy jako u monokrystalů. Podstatný vliv na deformační zpevnění má velikost zrna. Závislost deformačního napětí σ_K na velikosti zrna d je dána Hall-Petchovým vztahem.

$$\sigma_K = \sigma_o + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

σ_K - mez skluzu polykrystalu
σ_o - napětí potřebné k překonání překážek při pohybu dislokací v monokrystalu
k – Hall-Petchova konstanta
d - velikost zrna polykrystalu

Během každé plastické deformace dochází k postupnému vyčerpání plasticity materiálu. Dochází k nakupení dislokací a tvrdých částic na hranicích zrn, to vyvolává napěťový stav. Vznik napěťových špiček vede ke vzniku mikrotrhlin a dutin. Tyto nespojitosti se ve fázi zpevňování šíří a vedou k následnému porušení za studena zpevněného kovu.

[3]

2. METODY PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ

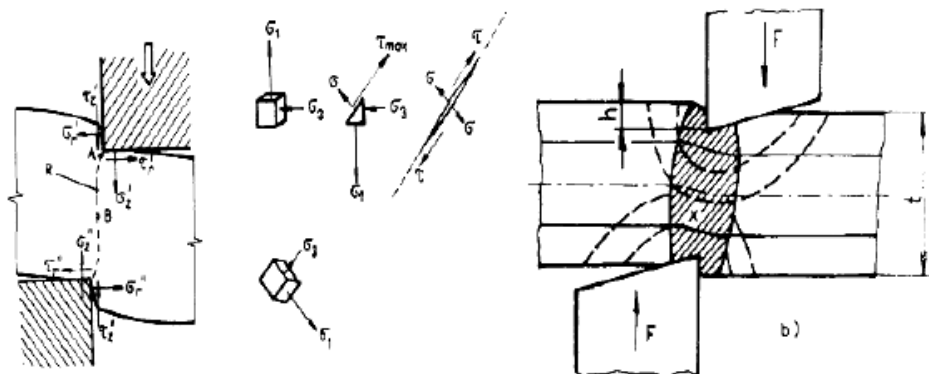
Plošné tváření je technologický proces, při kterém je deformace v třetí hlavní ose malé až zanedbatelné. V této kapitole rozvedeme nejčastější technologie pro plošné tváření.

2.1 Stříhání

Stříhání je označováno jako nejrozšířenější operací tváření, jeho využití je široké, od přípravy polotovarů, stříhání profilů, tabulí plechu až po stříhání různorodých otvorů do materiálu, jako před-operace dalších technologií nebo rovnou vytvoření finálního výrobku. Stříhání tedy rozdělujeme na objemové (stříhání tyčí a trubek) a plošné (stříhání plechových pásů).

Dle teploty se dělí na stříhání za studena (vhodné zejména pro měkké ocele a plechy) a stříhání za tepla (aplikované pro materiály o větší tloušťce a pevnosti), kdy dochází k přehřevu na teplotu cca 700°C. Stříhání je tedy jedinou tvářecí technologií, u níž je žádoucí porušení materiálu za účelem vytvoření konkrétního výrobku. Na obr. 7 je vidět napěťový stav při stříhu.

[33], [34]

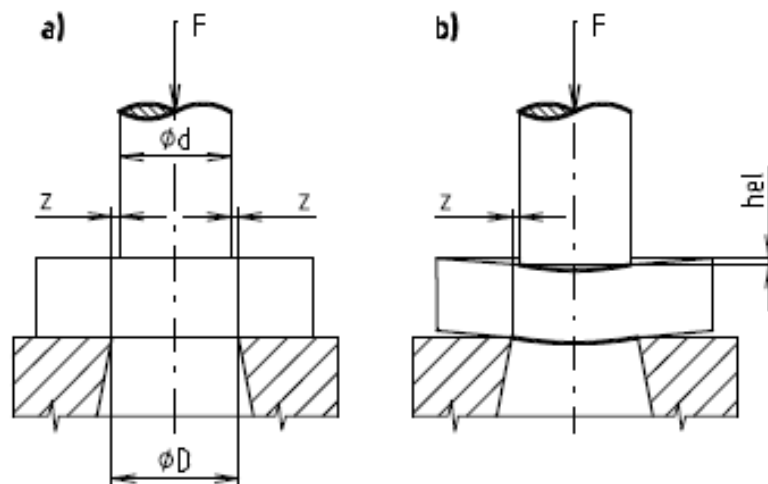


Obrázek 7- Napěťový stav při stříhu

2.1.1 Princip stříhání

Stříhání je proces, při kterém se oddělují části materiálu působením protilehlých střížných hran, které působí v rovině řezu smykové napětí. Samotný střížný proces rozdělujeme do těchto tří fází:

- V první fázi se pohybuje v oblasti pružných deformací, kdy se materiál vtlačuje a ohýbá do dutiny střížnice mezi střížnicí a střížníkem při dosednutí střížníku na povrch stříhaného materiálu vlivem silových dvojic viz obr. 8b, které vznikají v kolmých rovinách na plochu stříhu. Hloubka vniku nástroje se pohybuje v rozmezí 5 až 8% tloušťky stříhaného materiálu.

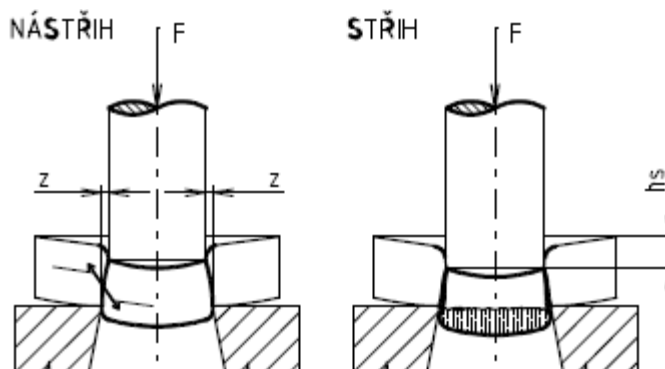


Obrázek 8 - První fáze stříhání (oblast pružné deformace) [33]

- V druhé fázi se nacházíme v oblasti plastických deformací. Střížník, který je působením síly vtlačován do plechu, vyvolá napětí. Toto napětí je větší než mez kluzu (R_e) a způsobuje trvalé plastické deformace. Hloubka vniku v této fázi se odvíjí od mechanických vlastností stříhaného materiálu a bývá 10 až 25% tloušťky plechu.

- V třetí fázi dojde ke vzniku trhlin tak, že napětí ve stříhu (s) dosahuje meze pevnosti (R_m). Nejprve dochází ke vzniku tzv. nástřihu, kdy dojde k vytvoření mikrotrhlin, které se vlivem tahového normálového napětí šíří tak dlouho, až dojde k oddělení materiálu. Rychlost šíření je ovlivněna nejen mechanickými vlastnostmi materiálu výlisku, ale také velikostí střížné vůle.

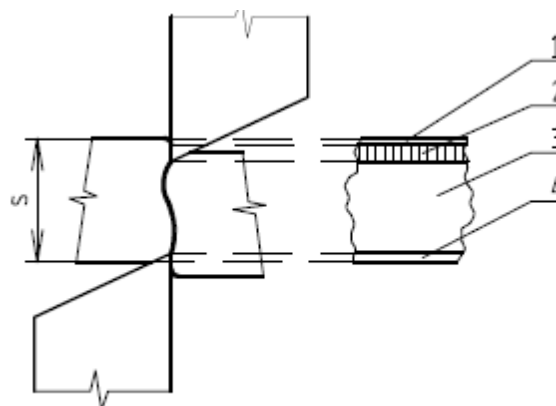
[33], [34]



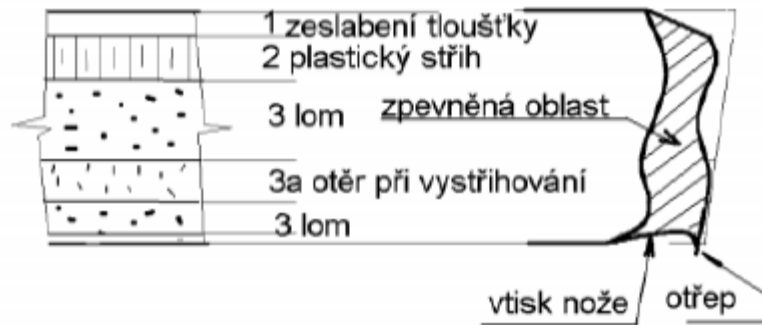
Obrázek 9 - Třetí fáze (oddělení materiálu) [33]

Při průběhu stříhání je výstřížek oddělen od výchozího materiálu ještě předtím, než střížník projde celou tloušťkou materiálu, proto stříhaná plocha není rovinná, ale má spíše „esovitý“ tvar. Tím vznikají deformační pásma na ostřížené ploše materiálu (viz obr. 10).

[33], [34], [35]



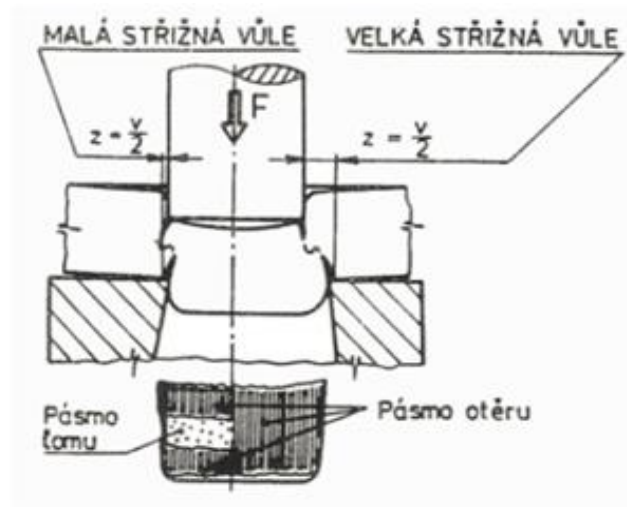
Obrázek 10 - Deformační pásma na střížné ploše (1 - Zaoblení, 2 - Utržení, 3 - Smyk, 4 - Otláčení) [35]



Obrázek 11 - Střížná plocha

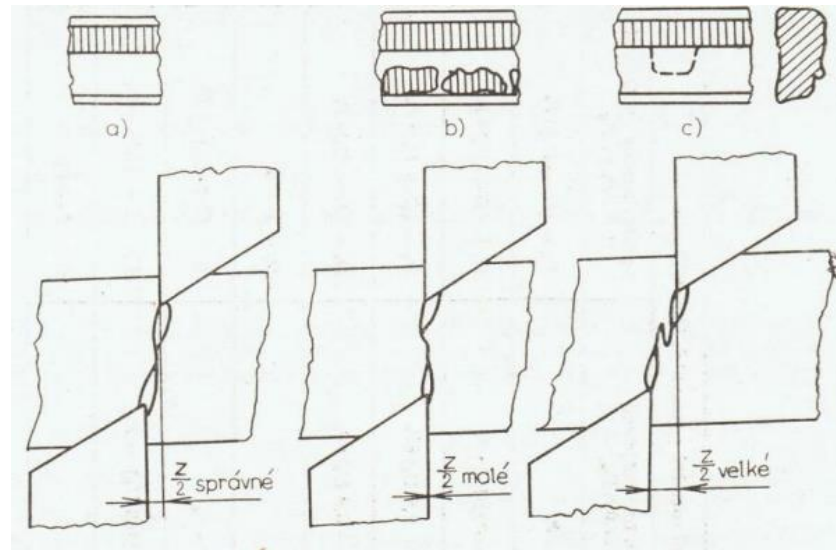
2.1.2 Střížná vůle

Střížná vůle je dána rozdílem mezi rozměrem střížníku a odpovídajícího otvoru ve střížnici a jejich rozdíl dává střížnou mezeru.



Obrázek 12 - Vliv střížné vůle

Střížná mezeru je nutná při procesu stříhání, aby nedošlo ke kolizi mezi nástroji a také velice ovlivňuje kvalitu střížné plochy, přesnost výrobku, trvanlivost nástroje a potřebnou práci ke stříhání, která může narůst až o 30%-40%.



Obrázek 13 - Vliv střížné vůle na kvalitu střížné plochy a) optimální střížná vůle, b) střížná vůle malá, c) střížná vůle velká

Při stanovení normální střížné vůli se trhlinky šířící se v materiálu setkávají a vytvoří střížnou plochu bez nežádoucích otřepů. Pokud střížnou vůli stanovíme příliš malou nebo velkou, trhlinky se nesečkají a dochází k porušení trhání materiálu, které vytvoří nerovný a nežádoucí povrch.

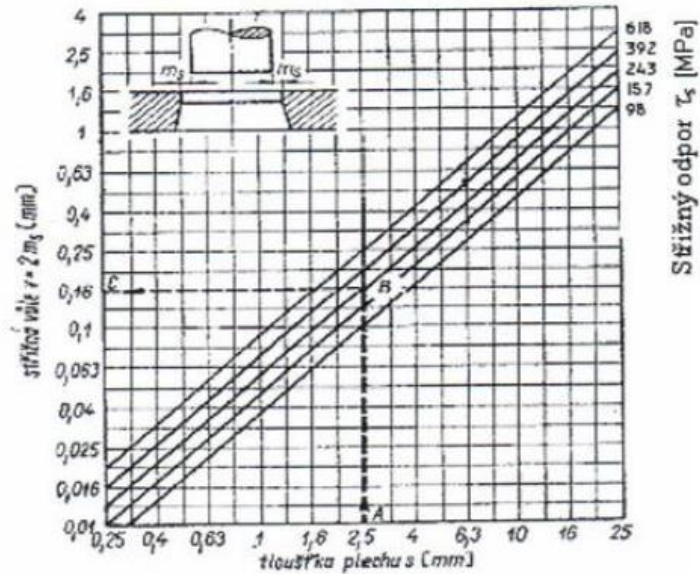
[34], [35], [36]

Tabulka 1 - Velikosti střížných mezer na tloušťce materiálu

tloušťka materiálu v mm	Vůle 2a v % tloušťky materiálu na průměr		
	měď, mosaz, měkká ocel	ocel do pevnosti 48 kg/mm ²	ocel s pevností větší než 48 kg/mm ²
0,1-0,5	5	6	7
0,6-1,0	6	7	8
1,1-2,0	7	8	9
2,2-3,4	7	8	10
3,6-4,0	8	9	10
4,2-5,5	10	11	12
6,0-6,5	12	14	16
7,0-7,5	13	15	17
8,0-8,5	14	16	18
9,0-12,0	15	17	20

Dále je ještě možné určit střížnou vůli podle nomogramů, ve kterých jsou uvedeny absolutní velikosti střížných vůlí pro určitý druh a tloušťku stříhaného materiálu charakterizovaného střížným odporem τ_s .

Graf 1- Nanodiagram pro stanovení střížné vůle [35]



Výpočet střížné vůle:

Stanovení střížné vůle pomocí vztahů dle Oehlera

- pro plechy do tloušťky 3 mm:

$$v = 2 * z = 2 * 0,32 * c * s * \sqrt{\tau_s} \quad (5)$$

- pro plechy s tloušťkou větší jak 3 mm:

$$v = 2 * z = 2 * 0,32 * (1,5 * c * s - 0,15) * \sqrt{\tau_s} \quad (6)$$

v	střížná vůle [mm]
z	střížná mezera [mm]
s	tloušťka plechu [mm]
TS	pevnosti ve stříhu [MPa]
c	součinitel závislý na druhu stříhání [-]

Součinitel závislý na druhu stříhání se volí v rozmezí 0,005 až 0,035. Nižší hodnoty se volí tehdy, chceme-li získat lepší střížnou plochu, vyšší hodnoty umožňují získání minimální střížné síly.

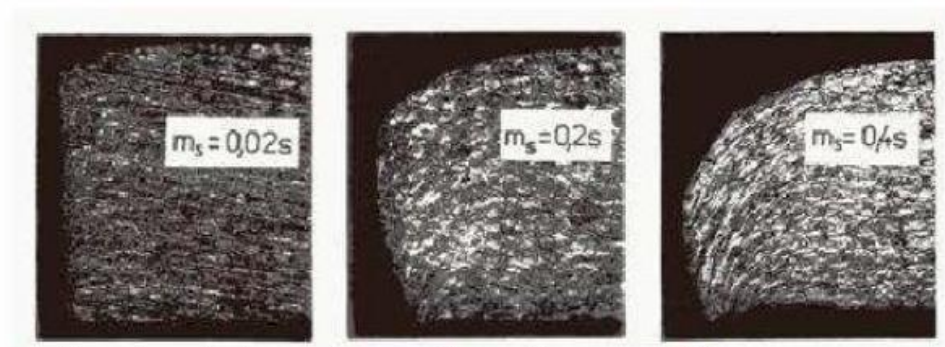
[35], [36]

Kvalita střížné plochy:

Největší vliv na kvalitu střížné plochy a rozměr výstřížku má velikost střížné vůle. Velikost střížné vůle volíme podle tloušťky a druhu materiálu. Pro normální střížnou vůli se nástřihy od obou střížných hran setkají a vytvářejí ve střížném průřezu jednu plochu bez otřepů. Při malé nebo velké střížné vůli se nástřihy neseťkají a vytvoří tak nerovný povrch v ploše stříhu.

Na obr. 14 je znázorněna kvalita střížné plochy pro různé velikosti střížných vůlí.

[37], [38]



Obrázek 14 - Kvalita střížné plochy pro různou velikost střížné mezery

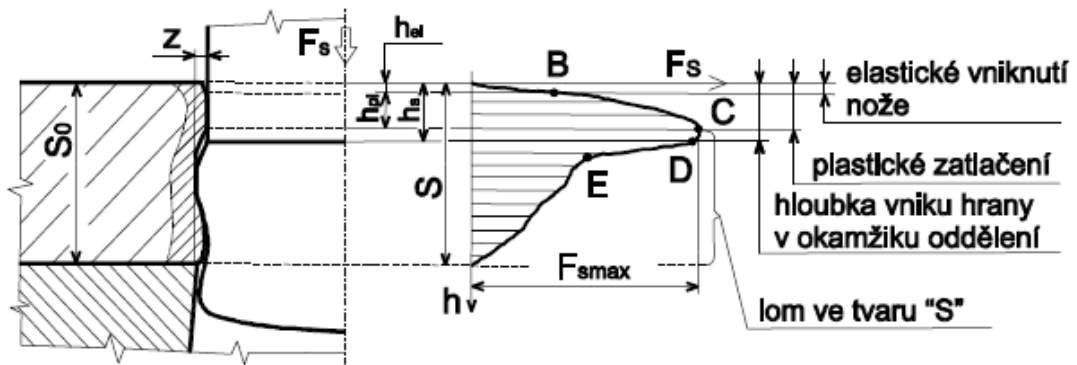
2.1.3 Střížná síla

Při působení sil na stříhaný materiál se plech naklání ve směru působení momentu sil. Při tomto procesu se však nože zatlačí do materiálu a působením momentu sil F na rameni α se stříhaný materiál natočí o úhel α .

Tento moment střížných sil je eliminován přidržovačem nebo silami působícími na hřbety nožů.

Druhy střížných sil při stříhání jsou:

- střížná síla
- síla přidržovače
- protlačovací síla



Obrázek 15 - Průběh střížné síly v závislosti na dráze [36]

Velikost střížné síly se v průběhu stříhání mění. Nejprve dochází v pásmu stříhu k plastické deformaci, při které síla pozvolna stoupá. Jakmile pronikne střížník do 5 až 8 % tloušťky stříhaného materiálu, nastává deformace materiálu, při které napětí v pásmu stříhu odpovídá mezi kluzu. Střížná síla však nedosáhne maximální hodnoty, protože s plastickou deformací se zpevňuje stříhaný materiál, a tím stoupá jeho odpor ve stříhu. Zpočátku je růst střížného odporu větší než zmenšování průřezu během stříhání. S pokračujícím průběhem deformace se zpevňování materiálu zpomaluje. Dojde k dosažení maximální střížné síly a po jejím dosažení dojde k jejímu poklesu. Podle velikosti střížné mezery a druhu stříhaného materiálu střížná síla klesá.

[37], [38]

Hodnota střížné síly se může zmenšit, je-li to možné, vhodnými úpravami: [35]

- použitím střížníků o nestejně délce
- zkosením střížných břitů
- zmenšením tloušťky materiálu
- volbou tvárnějšího materiálu
- změnou střížné čáry
- tvarem výstřížku

Střížnou sílu ovlivňuje především úhel sklonu střížných hran, jejich ostrost, střížná vůle, dále pak také mechanické vlastnosti stříhaného materiálu, hloubka vniknutí střížníku do materiálu a délka střížné hrany.

**Výpočet střížné síly:**

$$F_s = (s - h_s) * n * l * \tau_s \quad (7)$$

$$\tau_s = 0,77 * R_m \quad (8)$$

F_s	střížná síla [N]
s	tloušťka materiálu [mm]
h_s	hloubka vniknutí střížné hrany [mm]
n	koeficient vlivu vnějších podmínek [-]
L	délka křivky stříhu [mm]
T_s	pevnost ve stříhu [MPa]
R_m	mez pevnosti [MPa]

Koeficient vlivu vnějších podmínek zohledňuje nerovnoměrnost tloušťky plechu, nerovnoměrnost napjatosti a zhoršení kvality ostří střížných hran. Volí se $n = 1$ až 1,3.

[37]

Výpočet stírací a protlačovací síly:

Po vystřížení se děrovaný materiál vlivem pružné deformace na střížníku přichytí a k jeho setření je potřeba určit sílu F_u .

Také pro vytlačení výstřížku ze střížnice je třeba vynaložit určitou sílu F_v . Obě tyto síly jsou především závislé na druhu materiálu, velikosti střížní vůle, tvaru a druhu mazání.

$$F_u = k_{eu} * F_s \quad (9)$$

k_{eu} koeficient závislý na tloušťce stříhaného materiálu a druhu stříhadla (tab. 2)

Pro běžné oceli se velikost stírací síly volí jako 10 % F_s

$$F_v = k_{ev} * F_s * n_p \quad (10)$$

k_{ev} koeficient závislý na tloušťce a druhu materiálu (tab. 2)

n_p počet výstřížků v neodlehčené části stříhadla.

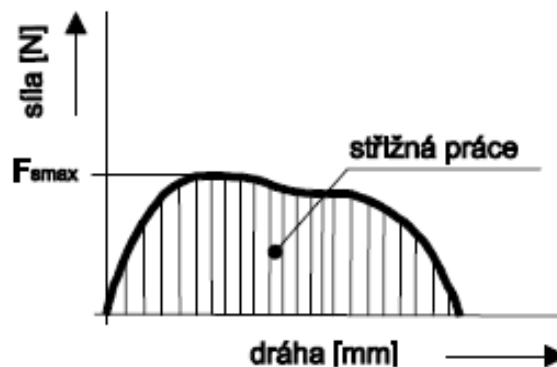
Tabulka 2 - Koeficienty v závislosti na materiálu [36]

Materiál	koeficient	
	keu	kev
Ocel	0,10 až 0,13	0,05
Mosaz	0,06 až 0,07	0,04
Slitiny hliníku	0,09	0,02 až 0,04

1.1.1 Střížná práce

Střížná práce je důležitá pro určení typu lisu určeného na danou operaci stříhání. Střížná práce je určena plochou pod křivkou znázorňující průběh střížné síly v závislosti na dráze viz obr. 16. Dráhou je myšlena hloubka vniknutí střížníku do stříhaného materiálu.

[37]



Obrázek 16 - Závislost střížné práce

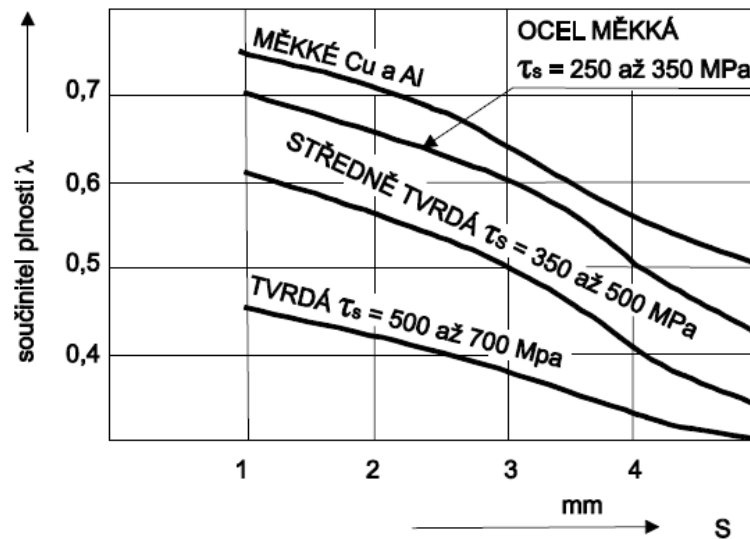
Výpočet střížné práce:

$$A_s = F_{Smax} * s * \lambda \quad (11)$$

- F_{Smax} maximální střížná síla [N]
 s tloušťka materiálu [mm]
 λ součinitel plnosti diagramu [-]
 A_s střížná práce [J]

Součinitel (λ) lze pro různé kovy určit z grafu závislosti na tloušťce stříhaného materiálu (viz graf 2).

Graf 2 - Závislost plošnosti na tloušťce stříhaného materiálu [35]



Nebo:

$$A_s = \frac{F_{Smax} * s * K_A}{1000} \quad (12)$$

- F_{Smax} maximální střížná síla [N]
 s tloušťka materiálu [mm]
 K_A součinitel hloubky vtlačení (tab. 3) [mm]
 A_s střížná práce [J]

 Tabulka 3 - Hloubka součinitele vtlačení K_A do materiálu

Materiál	Tloušťka materiálu s [mm]			
	do 1	1 až 2	2 až 4	nad 4
Ocel o pevnosti 250 ÷ 350 MPa (měkká)	0,70 ÷ 0,65	0,65 ÷ 0,60	0,60 ÷ 0,50	0,45 ÷ 0,35
Ocel o pevnosti 350 ÷ 500 MPa (středně tvrdá)	0,60 ÷ 0,55	0,55 ÷ 0,50	0,50 ÷ 0,42	0,40
Ocel o pevnosti 500 ÷ 700 MPa (tvrdá)	0,45 ÷ 0,42	0,42 ÷ 0,38	0,38 ÷ 0,33	0,30 ÷ 0,20
Hliník a měď v žíhaném stavu	0,75 ÷ 0,70	0,70 ÷ 0,65	0,65 ÷ 0,55	0,50



1.1.2 Přesnost povrchu při stříhání

Každou metodou výroby lze dosahovat různých přesností. Hlavní ukazatel přesnosti je budoucí výrobek, podle kterého se navrhuje způsob, jakým bude vyroben. Přesnost, je obvykle požadována v těchto stupních.

[37], [38]

Tabulka 4 - Tabulka přesností

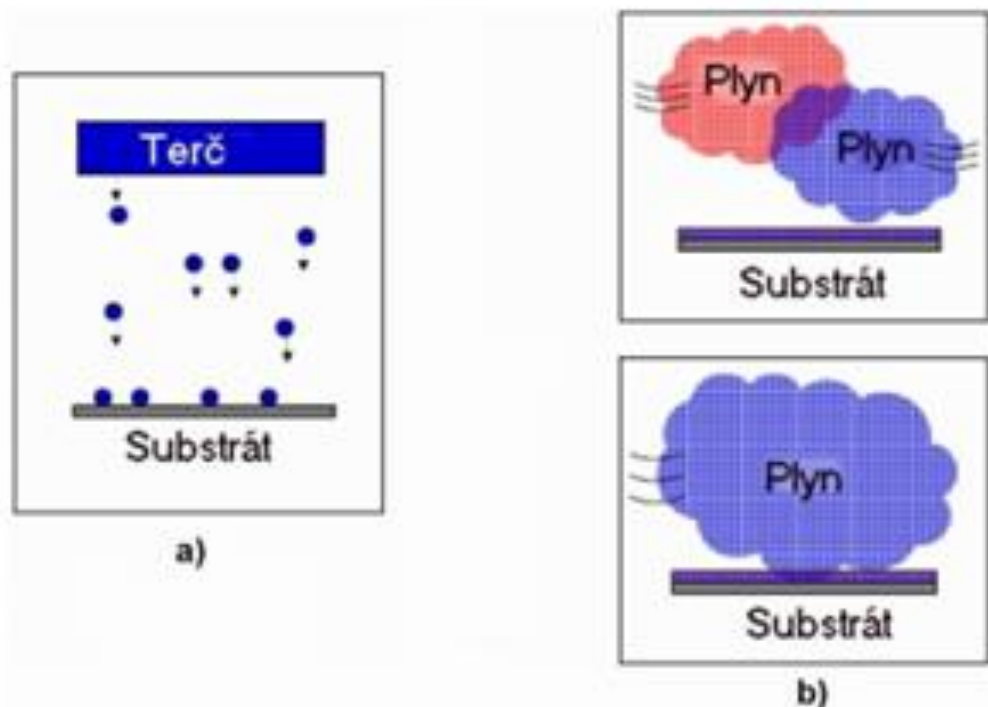
Nižší přesnost									IT14	IT15	IT16
Střední přesnost						IT11	IT12				
Vyšší přesnost	IT6	IT7	IT8	IT9							

3.METODY POVLA KOVÁNÍ NÁSTROJŮ

Povlakování neboli nanášení tenkých vrstev je až finální proces a nanáší se na už hotové, tepelně zpracované nástroje z vhodného nástrojového materiálu. Tenké vrstvy jsou nanášený dvěma metodami: fyzikální (PVD) nebo chemickou (CVD) cestou (obr. 17) a to rychlostí 0,5 až 2 nm.s⁻¹.

Vytvořený povlak má mnohem vyšší tvrdost i pevnost než stejný základní materiál v jakékoli jiné formě, vyznačuje se také odolností proti opotřebení. Tyto 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, také nám slouží jako ochrana proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje.

[6], [7]



Obrázek 17 - Tvorba povlaku metodou a) PVD, b)CVD



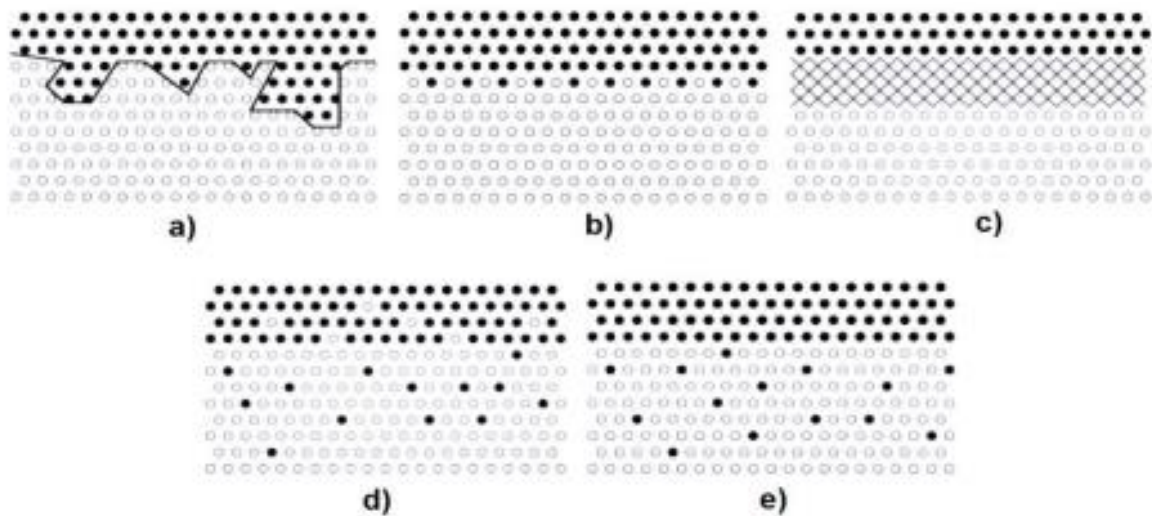
V literatuře se uváděny čtyři vývojové stupně povlaků [8]:

- 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.

Jednou z důležitých vlastností povlaků je jejich soudržnost s podkladovým materiálem. Soudržnost povlaků s podkladovým substrátem záleží na struktuře, fyzikálních, chemických a mechanických vlastnostech podkladového materiálu, typu a tloušťce povlaku a podmínkách povlakování. Na rozhraní podklad – povlak lze rozlišovat různé charakteristické přechodové oblasti nebo mezivrstvy:

- mechanická přechodová oblast – nanášený povlak je ukotven v otevřených povrchových pórech, tím vzniká čistá mechanická vazba (obr. 18 a)
- přechod monovrstva/monovrstva - přechod povlaku do podkladu přes jednu nebo několik atomových rovin - přechod se tvoří, když mezi povlakem a podkladem nedojde k vzájemné difuzi (obr. 18 b)

- spojený přechod – mezi podkladem a povlakem se tvoří jasně ohraničená mezivrstva s definovaným chemickým složením (obr. 18 c)
- difuzní přechod – mezivrstva se strukturně gradientním přechodem z materiálu podkladu do materiálu povlaku (obr. 18 d)
- pseudodifuzní přechod – částice s vysokou energií proniknou v krystalové mřížce podkladu do určité hloubky a zůstanou tam uvězněny, aniž by začal působit difuzní mechanismus (obr. 18 e)



Obrázek 18 - Rozhraní podklad - Povlak

Dále dělíme povlaky podle tvrdosti do dvou skupin:

- tvrdé povlaky s tvrdostí <40 GPa a supertvrdé povlaky s tvrdostí >40 GPa.
- supertvrdé povlaky, do této skupiny můžeme 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, jenž by bylo možné připsat diamantu, ale má fyzikální vlastnosti jako diamant) amorfni nitrid uhlíku (a-CN_x) a polykrystalický diamant viz tab. 5.

[9]



Tabulka 5 - Strukturální, mechanické a tepelné vlastnosti některých nátěrových hmot [10]

Material	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	

Také máme supermřížkové povlaky, které jsou tvořeny nanovrstvami složenými ze dvou různých materiálů, kde se pohybujeme okolo celkové tloušťky 5 – 10 nm. Tyto vrstvy povlaků mohou být tvořeny kovy, nitridy, karbidy nebo oxidy různých materiálů nebo kombinací jedné vrstvy kovu, nitridu, karbidu či oxidu a druhé vrstvy jiného kovu. Podle složení vrstev mohou být supermřížkové povlaky rozděleny do těchto pěti skupin [10]:

- Kovové supermřížky
- Nitridové supermřížky
- Karbidové supermřížky
- Oxidové supermřížky
- Nitrodové, karbidové nebo oxidové supermřížky/kovové supermřížky.



3.1 Metoda PVD

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition) je proces, který se uskutečňuje v prostředí vysokého vakua (0,1 až 1,0 Pa) a teplotách v rozmezí 150÷500 °C. K samotnému procesu povlakování dochází v důsledku kondenzace atomů, případně jejich shluků, které jsou uvolňovány z tzv. terčů. Takto vytvořené povlaky mají obecně menší tloušťku než stejné typy povlaků vytvářené metodou CVD. V dnešní době jsou nejčastěji využívány tři odlišné PVD technologie na podobném principu.

Prvním typem je naprašování, jehož základním mechanismem je uvolňování částic z terče (zdroje částic) působením urychlených iontů Ar.

Druhým typem je napařování, kde k uvolňování částic dochází v důsledku působení nízkonapěťového oblouku, elektronového paprsku, laseru nebo indukci. Uvolněné částice jsou ionizovány a reagují s atmosférou komory, která je tvořena inertním a reaktivním plynem. Po dopadu na povrch substrátu vytvářejí tenkou (1÷5μm) homogenní vrstvu.

Třetím způsobem je iontová implantace, kde jsou ionizované uvolněné částice urychlovány elektrickým polem směrem k povrchu substrátu, kde dochází k jejich implantaci.

Výhodou této metody je možnost povlakovat i ostré hrany s velmi malým poloměrem zaoblení pod 20μm a možností vytvářet vícevrstvé povlaky z různých typů materiálů. Mohou se kombinovat např. tvrdé, otěruvzdorné vrstvy s kluznými vrstvami, čímž je možné docílit delší životnosti nástroje.

Nevýhodou všech metod PVD je však poměrně složitý vakuový systém a nutnost pohybovat povlakovaným předmětem, aby bylo zaručeno rovnoměrné vytvoření povlaku. Tento požadavek souvisí s tzv. stínovým efektem. Na plochách, které neleží ve směru pohybu deponovaných částic, se buďto povlak vůbec nevytvoří nebo je vzniklý povlak velmi nekvalitní.

[11]



3.1.1 Naprašování

Proces povlakování typem naprašování probíhá ve vakuu nebo při nízkém tlaku plynu (do 0,7 Pa). Díky nízkému tlaku plynu se odprašované částice z terče nedostanou do kolize s molekulami plynu v prostoru mezi substrátem a zdrojem.

Aby bylo možné odprašovat částice z terče, musí na něj být nejprve přiveden vysoký záporný elektrický potenciál. Poté je do vakuové komory přiveden pracovní plyn, který má nízký tlak. Před terčem se zapálí doutnavý výboj, přičemž kladné ionty pracovního plynu jsou urychlovány a bombardují záporně nabitý terč. Záporně nabitě částice (elektrony) dopadají na stěny komory, která má kladný potenciál. Kladné ionty svou kinetickou energií při dopadu rozprašují terč. Odprašené částice se často průchodem oblastí ionizovaného pracovního plynu samy ionizují a usazují na vnitřních površích ve vakuové komoře ve formě kondenzátu. Z toho důvodu se substráty umísťují před terč, aby se odprašené částice usazovaly přednostně na nich a vytvářely tak povlak. V případě potřeby vytvářet povlak z nevodivého materiálu (keramika), narážíme na určité problémy s použitím nevodivého terče.

U nevodivých terčů se postupně na povrchu vytváří elektrický náboj, který zabraňuje dalšímu bombardování. Tohoto nežádoucího jevu se lze zbavit použitím střídavého elektrického proudu. Při odprašovacím procesu dochází k eroznímu úbytku hmoty terče.

[9], [12], [13]

Jeho rychlost lze určit dle vzorce:

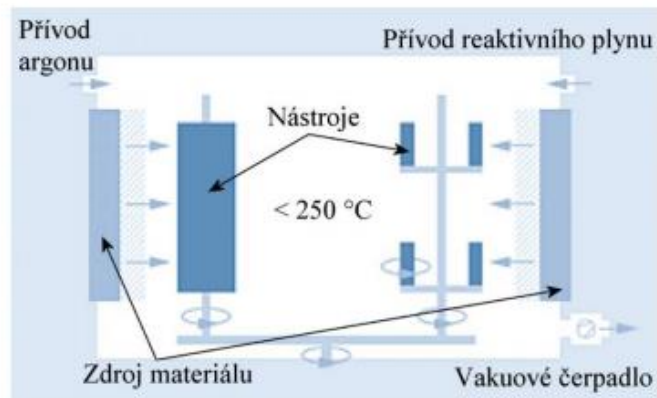
$$R_e = 62,3 \cdot \frac{J \cdot S \cdot m_t}{\rho} [A \cdot \text{min}^{-1}]$$

Kde: J [mA.cm⁻²] - je proudová hustota iontů

S [atomy/iont] - je výtěžnost naprašování

m_t [g] - je atomová hmotnost

ρ [g.cm⁻³] - je měrná hmotnost materiálu terče



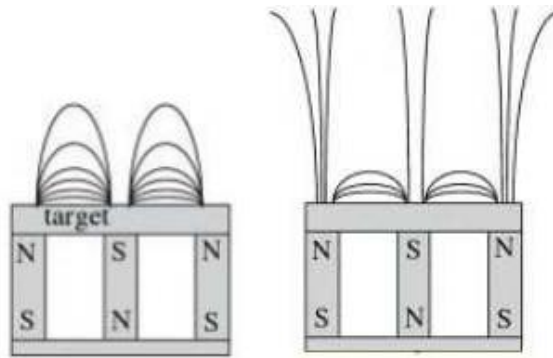
Obrázek 19 - Naprašovací komora 14

Naprašováním lze vytvářet tenké povlaky z těžkotavitelných materiálů, aniž bychom museli ohřívat terč na vysokou teplotu. Ve vytvářené vrstvě se zachovává složení slitinového terče ve stejném poměru jednotlivých složek a je možná homogenní depozice vrstev i na větších plochách.

[11]

Magnetronové naprašování

Naprašování pomocí magnetronu dosahujeme relativně velké rychlosti a oblasti depozice a menšího teplotního zatížení substrátu. Magnetronové naprašovací zdroje jsou definovány jako diodová zařízení, u kterých je užito magnetického pole k formování elektronových pastí. Katoda obsahuje koncové desky, vyrobené z materiálu, který má být nanášen. Ty jsou umístěny do povlakovací komory s magnetickým polem, které směřuje souhlasně s osou katody. Magnetické pole působí na elektrony v plazmě. Zachycené elektrony postupují směrem k anodě a způsobují kolize. Podle síly vnějších a vnitřních magnetů lze magnetrony rozdělit na vyvážené a nevyvážené (většinou silnější vnější magnety).



Obrázek 20 - Vyvážený a nevyvážený magnetron

Při použití nevyváženého magnetronu dojde k expanzi plazmatu od terče směrem k substrátu. Efektem magnetického pole je zachytit rychle se pohybující sekundární elektrony, které unikají ze substrátu. Tyto elektrony se ionizují srážkami s neutrálními atomy plynu a produkují vyšší počet iontů a elektronů, které značně zvýší iontové bombardování substrátu, což je vyžadováno u tvrdých povlaků.

Použití vyváženého magnetronu je určeno především pro mikroelektronické aplikace a je navržen tak, aby udržel plazmu i elektrony v okolí terče a vyhnul se tak bombardování substrátu.

[8], [14], [15]

Typické podmínky povlakování za pomoci magnetronu:

- hustota proudu na katodě 20 mA/cm²
- proud výboje 1 až 50 A
- napětí výboje 800 V
- tlak argonu 0,13 Pa
- rychlost povlakování 200 nm/min (12 μm/h).

[15]

Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody

Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody je nejjednodušší a pravděpodobně nejvíce využívaná povlakovací metoda. Tento systém se skládá z katody a anody. Katoda slouží jako zdroj povlakaného materiálu (terč), na anodě je připevněn substrát. Vzdálenost mezi elektrodami je od 50 do 100 mm. Katoda také slouží k udržení doutnavého výboje, který ji ohřívá, a proto bývá velmi často chlazena vodou. Rychlost ukládání materiálu na substrát je ovlivněna

především hustotou výkonu na povrchu terče, vzdáleností elektrod (terče a substrátu), povlakovaným materiálem, tlakem v pracovní komoře a velikostí erodované oblasti.

Typické podmínky povlakování doutnavým výbojem rovinné stejnosměrné diody jsou:

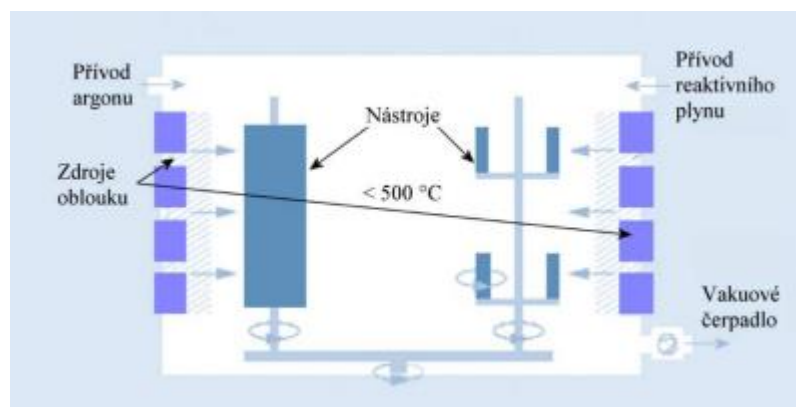
- hustota proudu na katodě 1 mA/cm^2 , • napětí výboje $3\,000 \text{ V}$,
- tlak argonu 10 Pa ,
- rychlost depozice 40 nm/min ($2,4 \text{ } \mu\text{m/h}$).

Mezi hlavní nevýhody této metody patří velice nízká rychlost depozice a ohřev substrátu. Ovšem výhodou je jednoduchost a snadná výroba.

3.1.2 Napařování

Napařování je způsob povlakování, založený na odpařování materiálu z terče a kondenzaci par na substrátu. K odpařování materiálu se využívá skutečnosti, že bod varu látek klesá s tlakem a zároveň tlak nasycených par látky roste s teplotou. Pro získání par pevných látek jsou proto za nižších tlaků třeba podstatně nižší teploty než za atmosférického tlaku. K přeměně hmoty z terče na plynné skupenství se používá elektrický oblouk nebo vakuový elektrický oblouk. Povlakovací procesy se uskutečňují ve vakuu nebo nízkém tlaku inertních nebo reaktivních plynů.

[13]



Obrázek 21 - Napařovací komora



Vakuové napařování (odporové)

Zdroje povlaku jsou ve formě vyhřívaných spirál nebo kelímků (pro materiál s teplotou tavení pod 1500 °C). Materiál je odpařován za pomoci tepelné reakce a dopadne na substrát bez kolize s molekulami plynu v prostoru mezi zdrojem a substrátem. Tlak plynu v komoře je závislý na úrovni tolerovaného znečištění a pohybuje se okolo 10⁻⁴ až 10⁻⁸ Pa.

[9], [13]

Výhody vakuového odpařování:

- vysoká čistota nanášeného povlaku z vysoce čistého zdroje
- pevný odpařovaný materiál může být v jakékoliv formě a o jakékoliv čistotě
- umožňuje použití masek a clon, aby se zabránilo ukládání povlaku, které není žádoucí
- rychlost povlakování je snadno regulovatelná a monitorovatelná
- jedná se o nejlevnější metodu povlakování pomocí PVD.

Nevýhody vakuového odpařování:

- obtížné ukládání slitin a mnohých sloučenin
- špatné napovlakování složitých povrchů
- nerovnoměrná tloušťka povlaku
- nízké využití odpařovaného materiálu
- velká zátěž tepelnou radiací
- velké komory v důsledku snížení zatížení tepelnou radiací.

Napařování pomocí elektrického oblouku

Využívá se nízkonapětového elektrického oblouku, který je mezi substrátem a terčem. Elektrický výboj se pohybuje na terči v průměru několika mikrometrů a způsobuje odpařování materiálu. Odpařený materiál je vysoce ionizovaný a tvoří plazmu o vysoké energii. Kovové ionty se spojí s reaktivním plynem a vytváří požadovaný povlak na povrchu substrátu.

[1], [9], [10]



Výhody odpařování pomocí elektrického oblouku:

- odpařovány mohou být materiály jak s nízkým, tak vysokým bodem tavení
- nízké zatížení tepelnou radiací (katodická oblouková depozice)
- odpařovaný materiál může být urychlen na vysokou energii před dopadem na substrát
- mohou být povlakovány všechny vodivé materiály
- umožňuje povlakování tvarově složitých součástí

Nevýhody odpařování pomocí elektrického oblouku:

- lze odpařovat pouze elektricky vodivé materiály
- vysoké zatížení tepelnou radiací (anodická oblouková depozice)

3.1.3 Přehled PVD povlaků

Jednovrstvé povlaky

První skupinou jsou nejstarší a nejdéle používané povlaky TiN (nitrid titanu). Tento povlak je charakteristický svou zlatavou barvou. Výhodou TiN je dobrá elasticita a adheze. TiN dosahuje tvrdosti HV 20÷25 GPa a je použitelný téměř ve všech aplikacích. Jeho použití je limitováno maximální pracovní teplotou 600 °C.

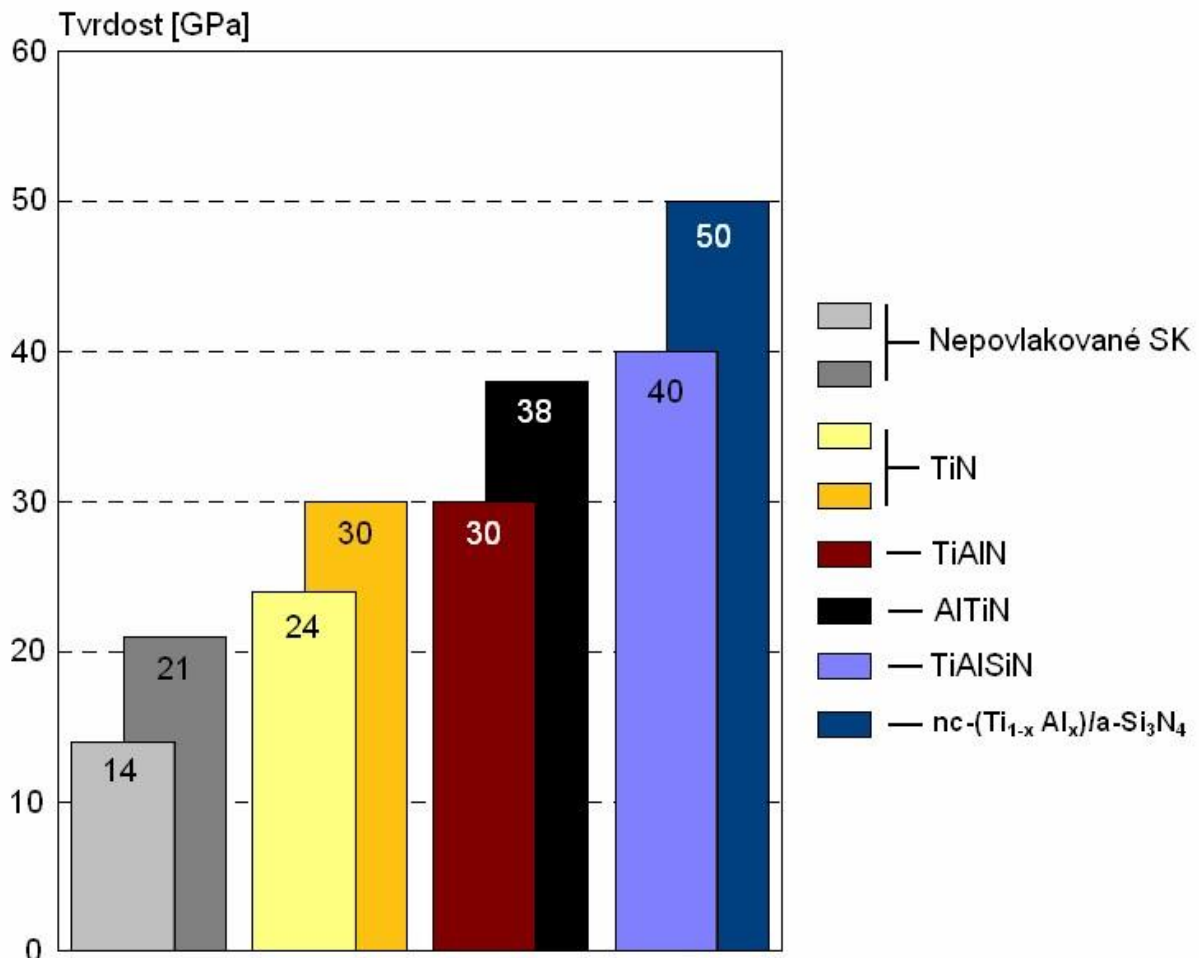
S rostoucím zájmem o povlaky s větší odolností proti abrazi daly vzniknout vrstvám s velmi vysokou tvrdostí. Jedná se o vrstvu TiCN (karbonitrid titanu) s vynikající vysokou tvrdostí až HV 30÷40 GPa, ale také nižší maximální provozní teplotou do 450 °C. Proto je tento povlak TiCN používán jen v úzce specifikovaných aplikacích. Výhodou TiCN oproti TiN je kromě vyšší tvrdosti také nižší koeficient tření. Z důvodu některých technických problémů spojených s rovnoměrností nanášené vrstvy existuje v současnosti snaha jej nahrazovat novými povlaky na bázi TiAlN.



Povlaky na bázi TiAlN (titan aluminium nitrid) mají vysokou tvrdost HV 25÷33 GPa a provozní teplotu až 800 °C. Obvykle se používá v poměru Ti:Al=50:50. Dalším zvyšováním Al se snižuje tvrdost vrstvy a zlepšuje se odolnost proti oxidaci. Díky výborné odolnosti proti vysokým teplotám jsou ideální pro vysokorychlostní obrábění. Vzhledem k jejich výhodným vlastnostem se jejich zastoupení na trhu každoročně zvyšuje.

Zajímavou alternativou k povlakům na typu TiAlN jsou vrstvy na bázi CrAlN a CrAlSiN. Výhodou těchto vrstev je zvýšená adheze k povrchu substrátu a jejich lepší chemická stabilita při vysokých teplotách. U těchto vrstev mohou být vytvářeny povlaky s poměrem Cr:Al=30:70. Maximální pracovní teploty jsou nad 800 °C. Další zvyšování pracovní teploty je možné pouze dalším zvýšením podílu Al. Povlaky na bázi CrAlN dosahují tvrdosti HV i přes 35 GPa.

Graf 3 - Porovnání tvrdosti SK bez povlaků a s povlaky [18]





Strukturované povlaky

Dominantní postavení zde mají vrstvy zejména na bázi TiAlN. Byly vyvinuty pro zvlášť náročné požadavky na teplotní a chemickou stabilitu, kde již jednovrstvé povlaky nestačí. V zásadě rozlišujeme čtyři druhy:

Multivrstvy

Povlaky, kde se střídají alespoň dva druhy vrstev. Multivrstvy jsou obvykle vytvářeny ve větších tloušťkách ($12\div 13\ \mu\text{m}$) než jednovrstvé povlaky. Přejechy mezi jednotlivými vrstvami zlepšují odolnost proti šíření poruch, což vede ke zvýšení tvrdosti a houževnatosti.

Kluzné povlaky

Jsou charakteristické nízkým koeficientem tření. Jejich vlastnosti omezují tvorbu nárůstků a snižují velikosti řezných sil. Do této skupiny patří tzv. měkké vrstvy, které se používají pouze v kombinaci s tvrdými vrstvami zmíněnými na předchozích stranách. Tím se vhodně kombinují kluzné vlastnosti s vysokou tvrdostí. Mezi tyto vrstvy patří MoS_2 , WC a vrstvy DLC (diamod like carbon = diamantu podobný uhlík), jejíž tvrdost HV má hodnotu kolem 20 GPa. V praxi jde především o vytvoření vhodné kombinace tvrdé a měkké vrstvy s dobrými třecími vlastnostmi, dobrou tvrdostí a odolností proti abrazi.

[9]

Povlaky čtvrté generace

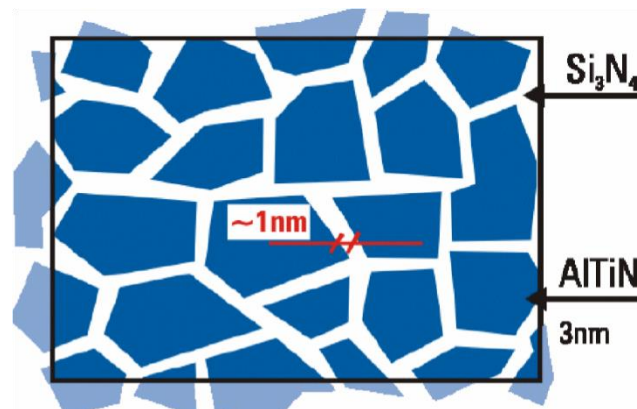
Jedná se o vícevrstvé povlaky, které se skládají z více než deseti vrstev a mezivrstev s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Pro tyto vrstvy jsou použity stejné materiály jako v předešlé 3. generaci.

Mezi povlaky 4. generace se např. řadí: [8], [9]

- **Diamantové povlaky** - Jedná se o povlak z polykrystalického diamantu. Jeho výhodou je malý součinitel tření. Má vysokou tepelnou vodivost. Rychlost růstu vrstvy je cca $1\ \mu\text{m}/\text{h}$. Jeho nevýhodou je nízká houževnatost. Např. povlak nanesený metodou CVD je křehký, jestli je ukládán na podkladový materiál s nízkým obsahem kobaltu. Tyto břitové

destičky pak neodolávají mechanickým šokům a tak nejsou vhodné pro hrubovací operace a přerušované řezy.

- **Nanokompozitní vrstvy** - Jsou tvořeny malými krystalky jedné fáze o velikosti několika nanometrů, které jsou zakotveny v amorfnní matici jiné fáze, přičemž obě fáze jsou vzájemně nerozpustné. Velikost mezikrystalických hranic je pod 1 nm. Díky malé zrnitosti vynikají velmi vysokou tvrdostí HV o hodnotách 40÷50 GPa. Vynikají také vysokou teplenou stabilitou a odolností proti oxidaci.



Obrázek 22 - Schéma nanokompozitní struktury $nc-(Ti_{1-x}Al_x)/a-Si_3N_4$

- **Gradientní vrstvy** - Resp. nanogradientní vrstvy, jsou systémy s průběžně proměnným složením vrstvy TiAlN tak, že v povrchu vrstvy se zvyšuje obsah Al, aby zabezpečil vysokou oxidační odolnost při zachování dostatečné tvrdosti vrstvy.
- **Kubický nitrid bóru (KBN)** – má tvrdost srovnatelnou s diamantem (70 až 100 GPa), je problematický z hlediska stability, stejně jako diamant.
- **Triple Coating** – nanokompozity s běžnými nitridovými vrstvami tvořící multivrstvy. Nanokompozity se na nitrid (popřípadě, TiAlN-TiN – viz SHM) nanášejí jako poslední závěrečná vrstva. SHM jako jediná firma zná know-how na navýšení čistoty v nanokompozitech.



3.2 Metoda CVD

Zkratka CVD je podle anglického výrazu **Chemical Vapor Deposition**. Jedná se o chemický proces povlakování, který je založen na reakci plynných chemických sloučenin (např.: CH_4 , TiCl_4 , AlCl_3 atd.) v plazmě, která se tvoří v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového materiálu a následném uložení produktů heterogenní reakce na tomto povrchu. Tloušťka může dosahovat až 13 μm . Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi, které se za vysokých teplot rozkládají. Povlakování pomocí metody CVD probíhá za poměrně vysokých teplot, které se pohybují v rozsahu 900-1100 °C, které jsou podmínkou pro termickou disociaci plynů a podporou vzájemné chemické reakce složek atmosféry a tlaků plynné atmosféry (1 ÷ 100 kPa).

Tyto povlaky mají vysokou tvrdost, odolnost proti otěru, nízký koeficient tření a skvělou adhezi ke slinutým karbidům. Dále se vyznačují dobrou tepelnou vodivostí, chemickou inertností a biokompatibilitou. Z těchto důvodů našly tyto technologie uplatnění v kosmickém průmyslu, ve výkonové polovodičové technice, vakuové technice, optice a v mnoha dalších průmyslových odvětvích.

Tato metoda je jedna z hlavních způsobů povlakování slinutých karbidů, protože pro jiné materiály je její použití omezeno vysokými teplotami při procesu depozice, které negativně ovlivňují mechanické vlastnosti povlakovaných substrátů. Metoda CVD může být realizována v různých variantách, kde jsou plynné složky aktivované buď klasicky tepelně, pomocí laseru, elektronového paprsku či plazmy. Metodou CVD je možné vytvářet jednovrstvé i multivrstvé povlaky. Multivrstvy jsou povlaky, kde se střídají alespoň dva druhy vrstev. Přechody mezi jednotlivými vrstvami zvyšují odolnost proti šíření poruch, což vede ke zvýšení tvrdosti a houževnatosti. Multivrstvy se vytvářejí cíleným řízením obsahu plynné směsi v průběhu depozičního procesu.

Pro strojírenství je tato technologie jedna z nejdůležitějších při povlakování rezných, lisovacích a silně mechanicky namáhaných strojních součástí.

[17], [18], [19], [20]

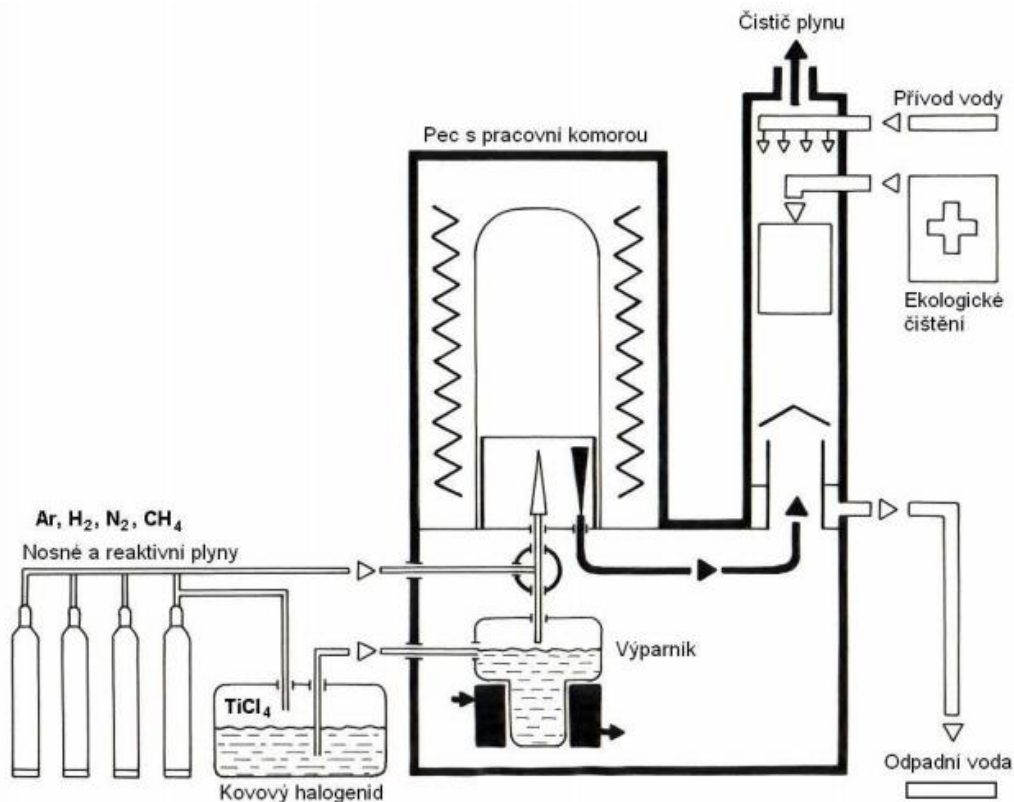


Obrázek 23 - Multivrstvý povlak TiN/TiCN – 62 vrstev o tloušťce 50nm

Proces povlakování metodou CVD probíhá v tzv. reaktorech, které se rozlišují na reaktory s horkou stěnou a reaktory se studenou stěnou. U reaktorů s horkou stěnou je nutné ohřívat nádobu pomocí topných elementů, aby teplota na substrátu i na stěně reaktoru byla konstantní. Nevýhodou tohoto typu je možnost usazování povlaku po stěnách a možná kontaminace povlaku substrátu z chemických reakcí mezi stěnou a parami. Reaktor je tedy vhodný pouze pro využití exotermických reakcí (vysoká teplota stěny zamezí nežádoucímu usazování povlaku).

U reaktoru se studenou stěnou je zahříván pouze držák substrátu. Reaktor je tedy vhodný spíše pouze pro endotermické reakce, jelikož má substrát větší teplotu než stěna reaktoru, což způsobuje vznik reakcí přednostně na něm. Stěna reaktoru bývá velmi často chlazená, přičemž chladícím médiem je nejčastěji voda. Schéma povlakovacího zařízení a detailní pohled na vnitřek reaktoru HF CVD s dvojitým předpětím na depozici diamantových vrstev, využívající žhavená wolframová vlákna (HF = hot filament).

[11], [16]



Obrázek 24 - Schéma zařízení pro CVD povlakování

Výhody povlakování metodou CVD:

- vysoká hustota povlaku
- vysoká teplotní stabilita povlaku
- vysoká homogenita povlaku (dobré pokrytí substrátu)
- vynikající adheze k podkladovému materiálu, rovnoměrná tloušťka u tvarově složitých nástrojů a součástí
- dobrá stechiometrie povlaku (možnost jejího řízení v širokých mezích)
- možnost vytvářet poměrně složité vrstvy a to nejen nitridu kovů (Al_2O_3 , uhlíkové kluzné vrstvy, diamantové vrstvy)
- ekonomická výhodnost tvorby silných vrstev povlaků
- povlakování předmětu ze všech stran v důsledku poměrně vysokých pracovních tlaků plyné směsi ($1 \div 100$ kPa)
- relativně nízké pořizovací i provozní náklady, slučitelnost s ostatními výrobními postupy



Nevýhody metody CVD:

- vysoké pracovní teploty, které mohou mít nepříznivý vliv na vlastnosti povlakovaného předmětu i samotného povlaku
- nelze vytvářet některé typy povlaků (např. kombinací různých typů kovů - TiAlN)
- nelze napovlakovat ostré hrany
- vysoká energetická náročnost
- dlouhý pracovní cyklus 8÷10 hodin
- ekologicky nevyhovující pracovní plynné směsi (toxické chloridy)
- tahová napětí ve vrstvě (rozdílný koeficient tepelné roztažnosti)

3.2.1 Modifikace metody CVD

Tyto metody vznikají modifikací klasických (konvenčních) metod CVD povlakování:

PECVD - Plasma Enhanced CVD

Plazmaticky aktivovaná CVD metoda. Plazma lze vytvořit pomocí vnějšího elektrického napájecího zdroje (nízkofrekvenční střídavé napětí, vysokofrekvenční střídavé napětí, stejnosměrné napětí, pulzní stejnosměrné napětí) nebo reaktivním plynem (např. C₂H₂, CH₄).

PECVD je nejčastěji používanou depoziční metodou přípravy vrstev na bázi uhlíku. V povlakovací komoře je plynná atmosféra ionizována a je aktivována v plazmatickém výboji, čímž se zvýší její energie. Díky tomu mohou chemické reakce, potřebné pro tvorbu povlaku, probíhat za výrazně nižších teplot než u konvenčního CVD procesu.

**MWPCVD** - *MicroWave Plasma CVD*

Mikrovlnná plazmatická CVD metoda. Od klasické CVD metody se liší nízkými pracovními teplotami (běžně 600 °C), přičemž se nemění její princip.

MTCVD - *Middle Temperature CVD Metoda (CVD za středních teplot)*

MTCVD umožňuje nanášet povlaky z plynné fáze za výrazně nižších teplot (700÷850 °C) než je tomu u konvenční CVD metody, kde teploty běžně přesahují 1000 °C. Díky nižším teplotám nevznikají ve vrstvě příliš velká pnutí a nedochází tak téměř k žádné tvorbě nežádoucích trhlinek. To má velmi pozitivní vliv na houževnatost.

MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH_3CN , zdroj dusíku), nebo též vysoce toxický a hořlavý metylkyanid. U konvenční CVD je používán plynný metan CH_4 (zdroj uhlíku) a čistý dusík. Jako zdroj titanu je u obou metod použit chlorid titaničitý (TiCl_4).

HFCVD - *Hot-Filament CVD (CVD využívající žhavé vlákno)*

U této metody jsou plynné složky rozkládány odporově ohřátým vláknem (až 2400 °C). Vlákno je umístěno blízko substrátu (80 mm). Produkty pyrolytické reakce se usazují na povrchu substrátu, kde reagují a vytvářejí tenký povlak. Rychlost depozice povlaků je o jeden řád vyšší než u klasické CVD metody.

HFCVD je používána např. pro vytváření diamantových povlaků.

LICVD - *Laser Induced CVD (laserově indukovaná CVD metoda)*

Metoda se používá ve dvou provedeních. První variantou je pyrolytická metoda, u které dochází ke štěpení molekul plynu na rozhraní plyn-substrát, v místě lokálního ohřátí laserovým paprskem. Tato metoda je dobře použitelná pouze v případech, kdy jsou zdroje par pro danou vlnovou délku laserového záření dobře průteplivé a povrch substrátu silně absorbující. Druhou variantou je fotolytická metoda, kde jsou molekuly poblíž substrátu štěpeny fotochemickou reakcí.

[17], [18], [19], [10]

4. KONTROLA POVLAKŮ

V této kapitole se se zaměřuji na možnosti kontroly funkčních a užitných vlastností povlaků, především adheze, koheze a jejich tvrdosti.

4.1 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. 6.

Tabulka 6 - Tvrdosti nejběžnějších vrstev

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 měří hloubku jeho pronikání do vrstvy s přesností na jednotky nm.

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 $\approx 1,0$.

4.2 Měření tloušťky povlakované vrstvy

Z hlediska praktické aplikace je volba tloušťky povlaku na nástrojích jednou z nejdůležitějších charakteristik. Ta může v konečném důsledku ovlivňovat jak trvanlivost nástroje, tak i střížné síly během tváření.

Tloušťka vrstvy se výrazně liší od tloušťky vrstvy na rovných nebo válcových plochách. Současně je ovlivňována průměrem nástrojem a způsobem naložení povlakovací komory.

V současnosti neexistuje pro vyhodnocení přesná, jednoduchá a zároveň nedestruktivní metoda. Pro měření rovinných částí nástrojů se využívá tzv. kalotester. 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

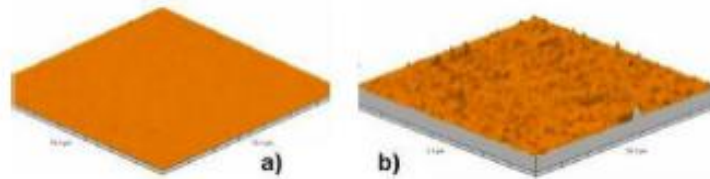
[22]

4.3 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.

Zdrojem zvýšení drsnosti vrstev jsou makročástice, které vznikají během technologického procesu povlakování. Drsnost povlaku (obr. 25) zvyšuje tření, a tak dochází k tepelnému a mechanickému namáhání nástrojů. Tento negativní jev se většina výrobců vrstev snaží minimalizovat úpravou technologie povlakování, popř. dodatečnou úpravou nástrojů po povlakování .

Měření je vhodné provádět na vyleštěných substrátech s výchozí drsností R_a 0,01 – 0,02 μm běžným dílenským drsnoměrem. Existují i jiné metody vyhodnocování drsnosti povrchu, např. pomocí AFM (Atomic Force Microscopy) [22], [23]



Obrázek 25 - Drsnosti vrstev připravovaných a) magnetronovým naprašováním b) obloukovým naprašováním

4.4 Přílnavost povlaků

Adheze - jev popisující přílnavost povlaku k materiálu substrátu, je jedním z ukazatelů kvality povlakovacího procesu. Adheze ovlivňuje schopnost povlaku chránit břit nástroje před silovým a tepelným zatížením v průběhu obrábění. Existuje relativně velké množství metod pro zkoušení adhezních vlastností povlaků.

Koheze - jev popisující soudržnost molekul a jednotlivých vrstev povlaku. Například při PVD je povlak na vzorek nanášen pouze v okamžiku, kdy je povrch vzorku přikloněn k aktivní části elektrody, z níž je povlak napařován. Toto je možné zjednodušeně popsat přímou viditelností mezi povrchem vzorků a katodovou skvrnou.

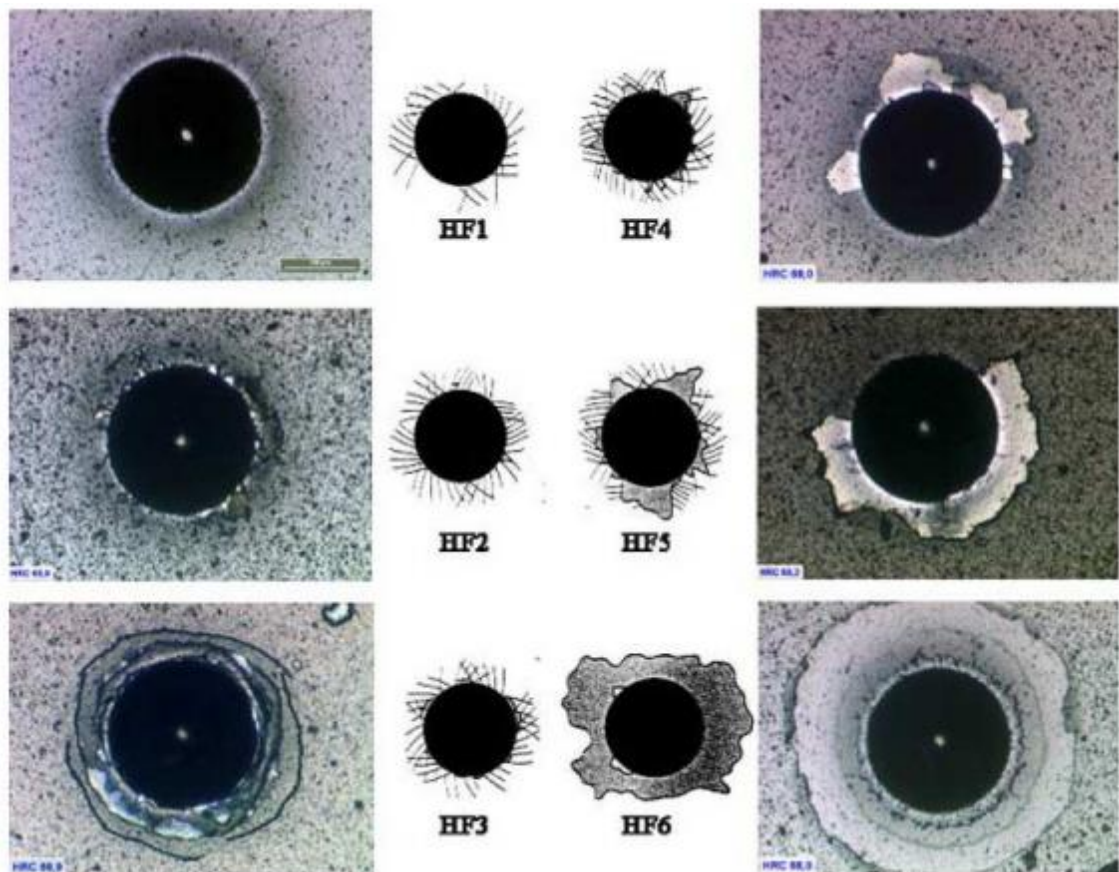
Vlastnosti povrchu materiálů je možné v praxi zlepšit vytvářením povrchových vrstev nebo povlaků. Tak že jsou provedeny některé zkoušky na povlakovaném materiálu, tím se zjišťuje jejich kvalita.

4.4.1 Mercedes test

Vynikající zkouška („Mercedes test“) patří mezi velmi rozšířené metody sloužící ke zjišťování adheze povlaku na základě sledování rozvoje a charakteru trhlin. V tomto případě je indentorem kužel s vrcholovým úhlem 120° , používaný při zkoušce tvrdosti dle Rockwella – metoda C. Na základě porovnání tvaru vtisku se vzory je stanoveno číslo adheze.

Vyhodnocení vtisku se provádí přiřazením adhezních čísel, který charakterizují stupeň popraskání či odloupení vrstvy.

[26]



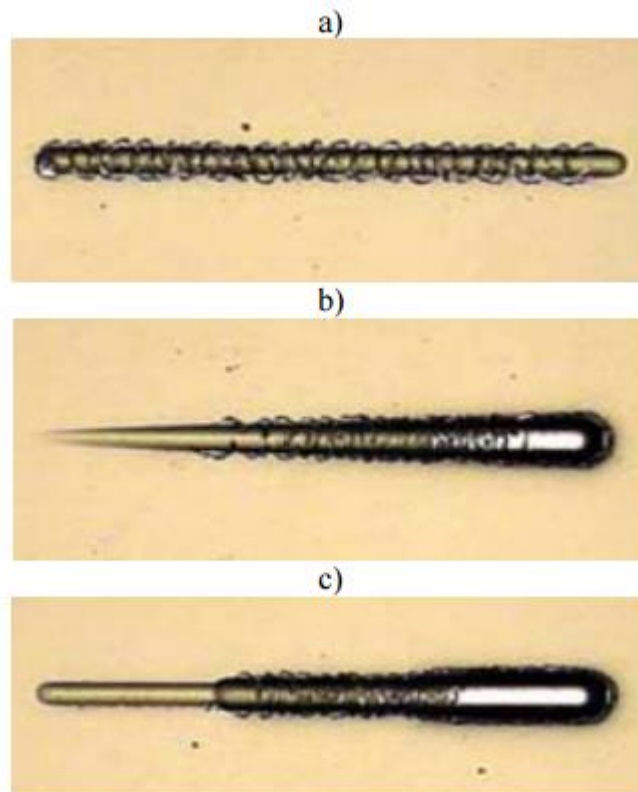
Obrázek 26 - Mercedes test [27]

4.4.2 Scratch test

Scratch test - (vrypová zkouška) je jednou z hlavních a nejrozšířenějších zkoušek sledování adheze povlakované vrstvy. Tato metoda je nejvíce uplatněná jako metoda kvalitativní kontroly v oblastech průmyslových i vědeckých, a také jako metoda pro vývoj nových depozičních technik v oblastech výzkumu.

Původně byla vrypová zkouška „Scratch test“ využívána jako prostředek ke zjišťování tvrdosti na principu Mohsovy stupnice tvrdosti minerálů. Další alternativní využití „Scratch testu“ bylo např. pro měření tvrdosti a hodnocení abrazivního opotřebení provedením mnohonásobného scratch testu. Hodnocené vrstvy mohou být jak organické tak anorganické, pokrývající tribologické, magnetické a dekorativní aplikace jako jsou pasivační vrstvy, třecí a ochranné vrstvy.

[29]



Obrázek 27 - Scratch test a) Konstantní zatížení b) Plynule narůstající c) Skokově narůstající zatížení [28]

Principem metody je plynulé zatěžování indentoru, který se pohybuje rovnoběžně s rozhraním nanesené vrstvy. Indentor je zatěžován konstantní nebo plynule se zvyšující silou a proniká do povrchu vzorku, kde tak vytváří vryp.

Během tohoto procesu je velké množství deformační práce přeneseno do vrstvy v okolí indentoru. Tři různé druhy složek napětí se překrývají: elasticko-plastické vnikající napětí, napětí způsobené tangenciální třecí silou a vnitřní pnutí. Tím se na rozhraní nanesené vrstvy generuje pnutí, které při dosažení kritické hodnoty způsobí odtržení vrstvy od substrátu. Hodnota zatížení, při níž dojde k poškození vrstvy, se nazývá kritické zatížení L_c a je používána jako míra adheze dané vrstvy.

[30], [31]

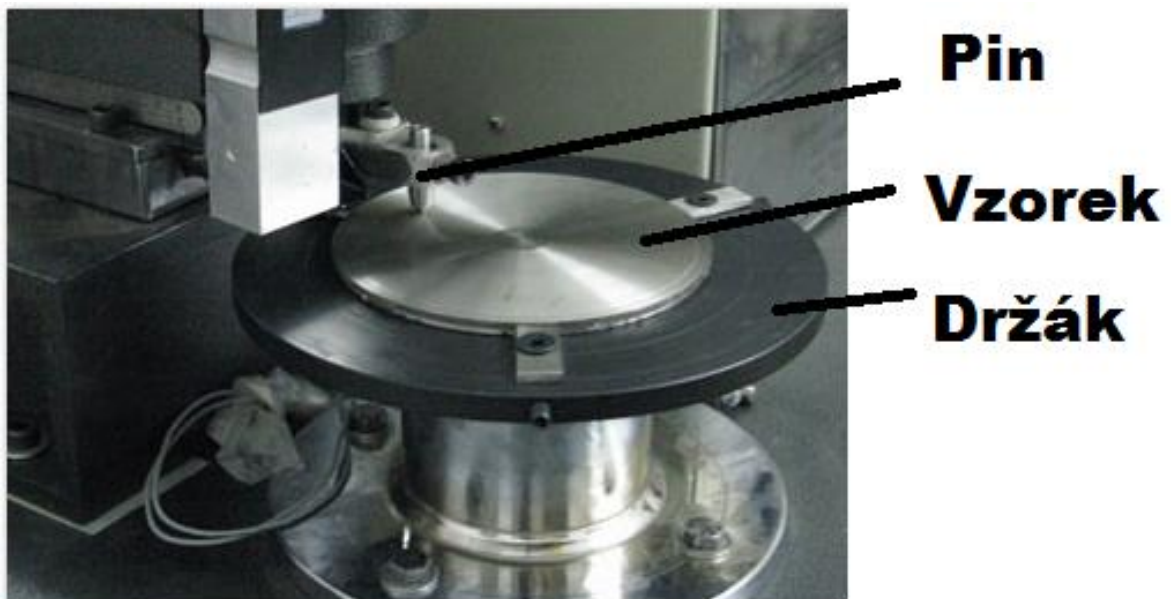


Obrázek 28 - Zařízení na scratch test

4.4.3 Pin on disc

Při této zkoušce dochází ke statickému vtlačování tělíska - pinu do zkoušeného vzorku, který vykonává rotační pohyb po dráze o určitém poloměru v předem stanoveném čase. Tělíska, které je uloženo v hlavici tribometru, je zatíženo předepsanou silou v rozsahu 1 až 10 N a je vzdáleno od středu vzorku o poloměru tribologické stopy R a výsledkem testu je rozsah opotřebení na parametrech.

[32]



Obrázek 29 - Zařízení "PIN ON DISC"

4.4.4 Pozorování při reálných provozních podmínkách

Nejlepší zkouškou povlaku je otestování v reálných podmínkách při zatížení, kde se kontroluje opotřebení po odlisování určité dávky a následné vyhodnocování. Tyto výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.



4.5 Vliv povlaků na strukturní změny základního materiálu

Při nanášení povlaků na základní materiál může docházet také ke strukturálním změnám základního materiálu za určitých podmínek napařovaného materiálu (viz kap. 1.4), kde může docházet k rozpadání základního materiálu na jiné fáze s jinými mechanickými vlastnostmi.

Tomuto problému se lze vyhnout technologií úprav materiálu nástrojů před a po povlakování, jelikož tento parametr je velice opomíjen, konkrétně vlivy různých úprav nástrojů nebo samotné vedlejší vlivy výrobních technologií.

4.5.1 Úpravy nástrojů před povlakováním

Odmaštění

- Odstranění konzervačních a jiných mastných látek z povrchů nástrojů se provádí průmyslovými odmašťovacími na bázi ropných derivátů, ale s vlastnostmi odpovídajícími přísným ekologickým normám. Odmašťovací prostředky obsahují dearomatizované uhlovodíky a tenzidy bránící nadměrnému odpařování a zajišťující dobrou smáčivost.
- Odmaštění se provádí v běžně dostupných jednoduchých odmašťovacích zařízeních podle kapacitních potřeb či velikosti nástrojů.

Mokrý čišťení

- Tato metoda je kombinace metod využívající způsoby, jako jsou: oplachy, tlakové oplachy, ultrazvuk, elektrochemické metody, vakuové sušení, resp. odstředění, resp. vyhřátí, resp. odpaření těkavých kapalin.
- Jako průmyslová zařízení jsou využívány mycí linky s několika samostatnými mycími a oplachovými vanami, případně jednovanové systémy s automatickou výměnou jednotlivých technologických lázní.
- Čištění probíhá v alkalickém prostředí - nejběžnější je čištění v roztocích obsahujících KOH či NaOH. Pro zvýšení odmašťovacího účinku mohou



být kombinovány s malými přísadami tenzidů (smáčedel), popř. i kyseliny citronové či fosforečné.

- Pro účely povlakování nejlépe vyhovují pasivátory s krátkou dobou působení do 2 dnů. Pasivátory se kombinují s oplachovými lázněmi, u nichž je naprosto nezbytné minimalizovat obsahy solí a jiných rozpuštěných látek ve vodě. Proto je nutné používat velmi čisté oplachové vody. Vodivost používaných demineralizovaných vod by se měla pohybovat v řádu desetin $\mu\text{S}/\text{cm}$. Takto zvolené prostředky krátkodobé ochrany nesmí negativně působit na adhezi připravovaných vrstev. Pasivátory mohou obsahovat neionogenní tenzidy, organické soli a alkoholy.

Pískování

- Nazývané taky jako mikropískování, je vhodná průmyslová metoda pro případ sériové výroby vhodných substrátů nebo pro speciální případy. Pískováním lze odstranit pevně ulpívající nečistoty na povrchu, případně i nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu. To jsou případy nebroušených slinovaných ploch HM materiálů nebo opotřebovaných a neobnovených ploch přebroušovaných nástrojů. Jako vhodné médium se používá abrazivo SiC nebo Al_2O_3 . Některá běžně používaná média nejsou vyloženě vhodná, protože jejich rezidua negativně ovlivňují adhezi povlaků. Velikost abrazivních zrn se pohybuje v nízkých hodnotách 20 až 100 μm . Technologie pískování musí vždy respektovat charakter nástroje, jeho funkční břity a plochy. Proto i volba parametrů pískování a řešení automatizace procesu jsou záležitostí do značné míry empirickou. Bez dlouhodobých seriózních experimentů nelze zabránit případným negativním vlivům - nevhodné zaoblení hran, odpískování měkčích fází (pájené nástroje) nebo zmatnění zrcadlových dekorativních či upínacích ploch.



4.5.2 Čištění nástrojů v průběhu samotných PVD procesů

Účelem tohoto čištění je zajištění dokonalé adheze povlaku k nástroji, která je nejdůležitější při povlakování.

První fází je základní odplynění nástrojů předehřevem ve vakuu. V případě obloukových technologií následuje doutnavý výboj v argonu a iontové čištění pomocí urychlených iontů kovu (Ti, Cr). Po jejich aplikaci je povrch nástroje očištěn na atomární úrovni.

4.5.3 Méně využívané metody úprav nástrojů

Žihání ve vakuu

- Tato metoda byla původně zaváděna pro dostatečné odplynění porézních pájek u nástrojů s pájenými částmi. Nástroje se po určitou dobu žihají ve vakuu při teplotě blízké se povlakovacím teplotám. Jde o samostatný proces v technologickém cyklu povlakování. Tím se zabrání případnému znečištění vakuové komory během samostatného procesu povlakování. Metoda má nevýhodu v prodloužení dodacích termínů povlakovacích center. Metoda žihání ve vakuu může mít ovšem také pozitivní vliv v případech nástrojů s chladicími otvory, kde běžné metody čištění nemusí stoprocentně zajistit odstranění všech nečistot. Vakuové žihání lze také doporučit pro některé HSS materiály, ale to by mělo být spíše záležitostí samotného výrobce nástrojů.



Leštění po povlakování

- Tato metoda, která má za úkol odstranit makročástice po povlakování a snížit celkovou drsnost funkčních ploch a břitů. Většinou se používá ruční leštění pomocí tkanin s abrazivem, případně kartáčování nebo omílání. Tato úprava usnadní zaběhnutí nástroje a může značně ovlivnit jeho životnost a kvalitu obrobku hned v počátku činnosti nástroje.
- Zmíněné metody úprav nástrojů využívá i povlakovací centrum SHM Šumperk. Jejich výčet však nemusí být úplný. Každý z výrobců PVD povlaků drží některé své postupy v utajení před konkurencí. Přesto popsané metody zahrnují min. 90 % používaných úprav. Jejich alespoň částečná znalost může být prospěšná při posuzování funkčnosti povlakovaných nástrojů a při rozhodování o nejvhodnějším postupu výroby nástrojů.

[39]



5. PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části jsem se zabíral vytipováním vhodných nástrojů pro povlakování, tento krok byl proveden ve spolupráci s firmou **Tyco Electronics EC Trutnov s.r.o.** Výsledkem bylo vytipování dvou nástrojů obsahujících větší počet stejných střížníků v různých pozicích, aby bylo možné porovnávat různé druhy PU. Na střížníky byly aplikovány dva typy vytipovaných povlaků, za pomoci společnosti SHM Šumperk. Následně tyto povlakované nástroje byly testovány a vyhodnocovány na Fakultě strojní ČVUT v Praze a ve firmě Tyco Electronics EC Trutnov s.r.o.

Všeobecně jsou povlaky charakterizovány fyzikálními, chemickými a mechanickými veličinami. Mezi tyto veličiny patří otěruvzdornost, tepelná vodivost, koeficient frikce (tření), adheze, koherence, tvrdost povlaku a další. U povlakovaných nástrojů se provádějí převážně analýzy tvrdosti (mikrotvrdosti) povlaku, metalografická analýza povlaku i substrátu, měření jakosti povrchu (R_a), měření tloušťky vrstvy a měření adheze povlaku (toto měření se provádí většinou při vyskytnutí se nějakých problémů).

Jelikož adheze je při spojení povlaku se základním materiálem nejdůležitější parametr, adhezivní úpravy se provádějí dle aplikací, pro které budou nástroje použity.

5.1 Vytipované nástroje

Jako nejvhodnější nástroje na vytipované povlaky byly zvoleny dva nástroje, které mají největší objemy vyráběných dílů a jsou tedy nejčastěji nasazovány do výroby a lze u nich předpokládat vysoké opotřebení. Vytipované razníky jsou dle informací firmy TE náchylné na opotřebením délky a průměru, ale nejsou náchylné na praskání. Oba tyto nástroje mají na stejném kroku totožný razník, u razníku Kotva P2 je to dáno její konstrukcí a u JHO-MSR je to dáno dvojnásobným nástrojem, tak můžeme porovnávat užité vlastnosti povlaků na opotřebením v závislosti na počtu najetých kusů. Střížníky i matrice byly vyrobeny ze slinutého karbidu, u razníku Kotva P2 byl zvolen materiál CF-H25S a u razníku



JHO-MSR materiál CF-H40S dodávané firmou Ceratizim s chemickým složením uvedeným v tab. 7.

Tabulka 7 - Složení a vlastnosti materiálů CF-H25S a CF-H40S

Označení Ceratizit	ISO	Složení [hm. %]			Měrná hmotnost [g cm ⁻³]	Střední zrnitost [μm]	Tvrдость		Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Lomová houževnatost [MPa m ^{1/2}]
		WC	TiC/Ta(Nb)C	Co			[HV ₃₀]	[HRA]				
B15S		94,0		6,0				2150				
B30S		91,0		9,0		3,0-5,0	1210	88,7	2450	4200	630	18,56
B40S		88,0		12,0			1100	87,6	2600	4000	580	
CF-H25S		91,5		8,5		1,0	1600	92,1	2450	5600	630	10,20
CF-H40S		88,0		12,0		1,5	1380	90,4	2650	5000	600	12,00
CF12A	K15	94,0		6,0	15,0	0,8-1,3	1630	92,1	2600			10,20
CTS18D	K20-K40	91,0		9,0	14,6	0,5-0,8	1590	91,9	3600			10,40
H10T	K10	94,2	0,3	5,5	14,8	1,0	1750	92,9	>1900	6000		
H20S		94,0				1,5-2,0	1615		>2000	5700	640	8,75
H20T	K20	93,2	0,8	6,0	14,7	1,0-2,0	1610	92,2	2000			
H20X	K15	94,0			14,9	0,8-1,3	1650		2200			9,90
H30S		91,0		9,0			1470	91,3	2400	5400	620	10,08
H40T, H40S	K40	87,2	0,8	12,0	14,3	1,5-2,0	1370	90,0	>2500	5000	600	11,91
H50S		85,0		15,0		1,5	1225	88,9	2800	4500	570	15,20
HC10	K10	94,4		5,6	14,9	0,8-1,3	1730	92,7	2150			9,20
MG12	K05-K10	94,0		6,0	14,8		1790	93,0	3500			8,20
MG18	K20-K40	90,0		10,0	14,5	0,5-0,8	1660	92,3	3700			9,40
S22T	P20-P25	71,5	20,0	8,5	12,4	2,0-3,0	1575		1800	5200		
S36T	P30-P40	76,5	11,5	12,0	13,1	1,0-2,0	1390	90,5	>2200	5100		
S40T	P40	77,0	12,0	11,0	13,3	3,0	1420		2400	5000		
TSF10	K01-K10	94,0		6,0	14,9	0,5	2000		3300	6500		
TSF22	K10-K20	91,8		8,2	14,6	0,2-0,5	1930	93,7	4400			7,50

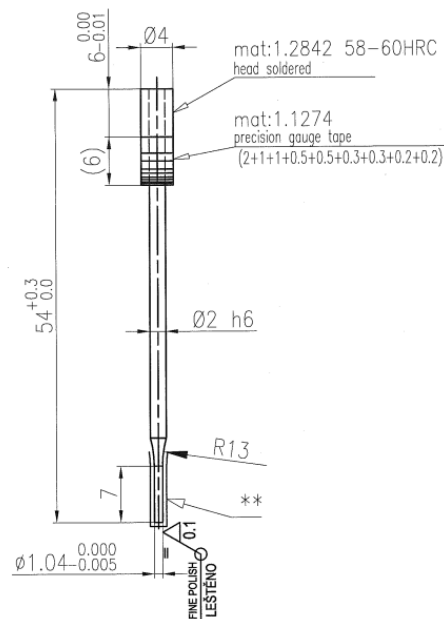
Stříhaný materiál je označován jako DIN 1544 - RFe80 s chemickým složením viz tab. 8 a obr. 35 a dodáván ve tvaru pásu.

Tabulka 8 - Chemické složení materiálu RFe80

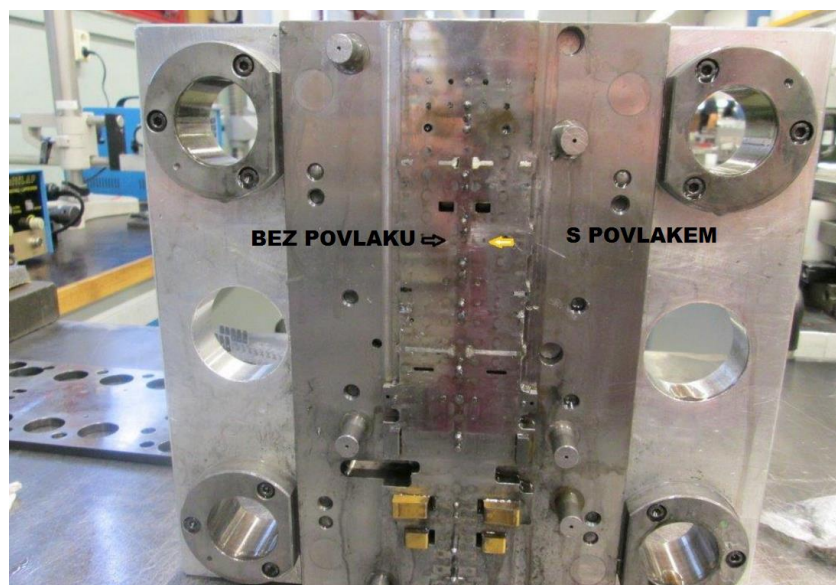
Standards	Based on DIN 17405:1979				
Grades	RFe 40	RFe 60	RFe 80	RFe 100	RFe 120
Chemical cast analysis	C 0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max
	Si 0.05 max	0.05 max	0.10 max	0.10 max	0.10 max
[Maximum values in weight %]	Mn 0.35 max	0.35 max	0.35 max	0.35 max	0.35 max
	P 0.025 max	0.025 max	0.030 max	0.030 max	0.030 max
	S 0.015 max	0.015 max	0.035 max	0.035 max	0.035 max
Acc. To DIN EN 17405:1979	Al 0.10 max	0.10 max	0.10 max	0.10 max	0.10 max
Strip thickness (mm)	←		0.30 - 6.00	→	
Strip widths (mm)	←		4 - 810 (2)	→	
Delivery conditions	←		CR	→	
Mechanical properties: Coercive field strength H _c [A/m]	40 max	60 max	80 max	100 max	120 max
Surfaces (appearance + finish)	MA, MB (1) with finish RL acc. to DIN EN 10139				
Dimensional tolerances	Acc. to DIN EN 10140 and special agreement				
Delivery forms	Coils and cut lengths				
Specialities	a) No minimum Al-content demanded b) RFe 20 available on special request				
(1) = MB for thickness 0.20 - 2.00 mm, thickness above on request			(2) = Maximum width only in NK		

Na obr. 32 je znázorněný výrobní výkres jednoho z vytipovaných razníků a to Kotva P2. Tento razník je uložený v páru, který je znázorněný viz obr. 31. Toto uložení je dáno konstrukcí celého tvářecího nástroje. Razník je velice malých rozměrů a podle konstrukce je vidět, že je i velice namáhaný např. na vzpěr. Síly působící při tváření mohou výrazně ovlivňovat životnost nástroje.

1. Kotva P2, razník průměr 1,00 +0,03 +0 mm.



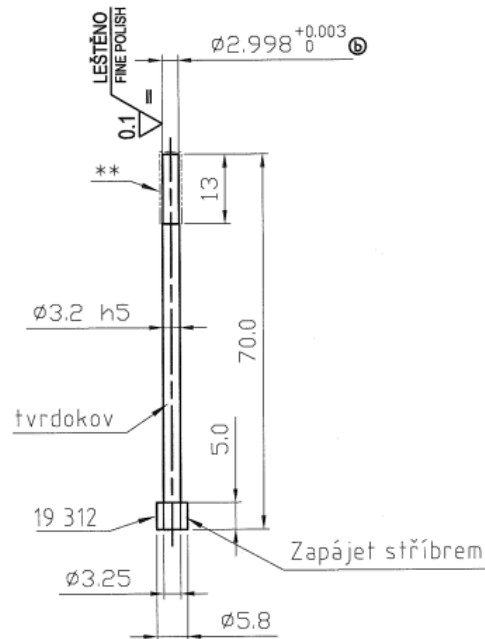
Obrázek 31 - P2 Kotva razník



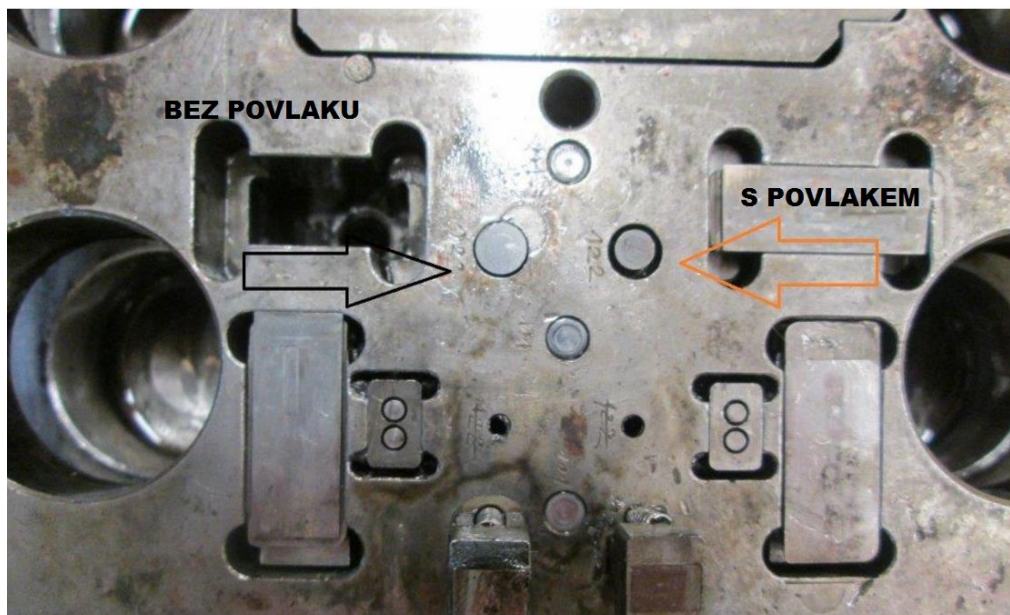
Obrázek 30 - Zasazený střížný nástroj P2 Kotva v razníku

Jako druhý razník byl zvolen typ JHO MSR, který je velice podobný předchozímu razníku s trochu rozlišnými rozměry (viz výrobní výkres obr. 33 a uložení viz obr. 34).

2. JHO MSR, razník průměr 2,98 +0,015 +0 mm.



Obrázek 32 - JHO MSR razník



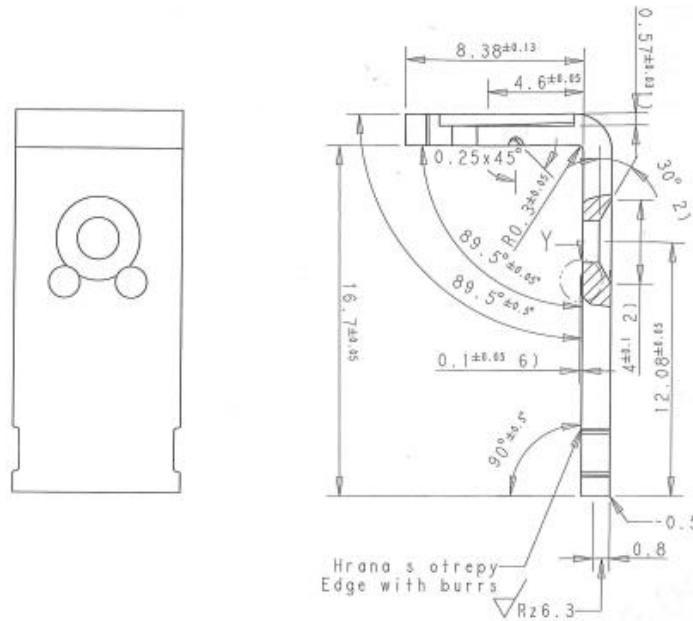
Obrázek 33 - Zasazený střížný nástroj JHO MSR v razníku



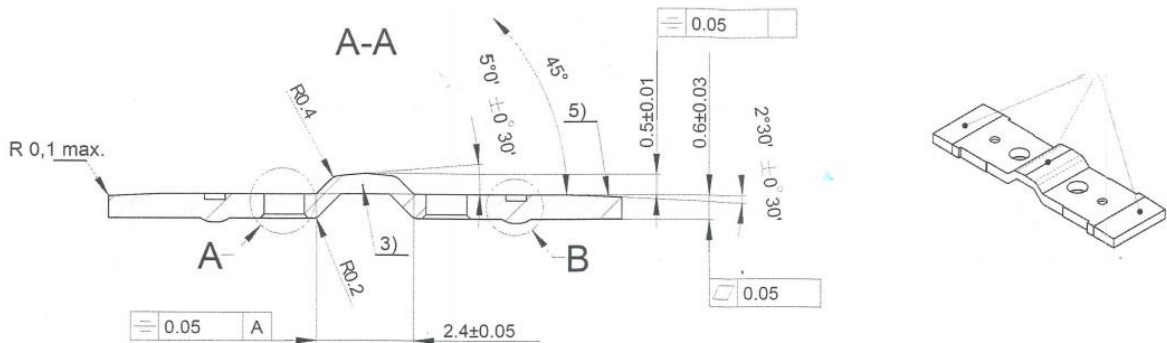
SACH-NR		1-704997-5		WERKSTOFF-NR		1101400			
CHARGEN-NR.:		29146		STRANGGUSS					
SCHMELZANALYSE (%)		C	Si	Mn	P	S	Al	N2	Cu
		0,002	0,005	0,215	0,018	0,008	0,058	0,003	0,011
		Cr	Ni	Mo					
		0,020	0,014	0,00					
LAGE	Rm	A80	HV		Hc A/m				
L	341	31,7	107,0		20,70				
L	341	30,9	107,1		19,10				
L	346	32,5	110,3		19,10				

Obrázek 34 - Materiálový atest RFe80

Materiálový atest stříhaného materiálu dodán firmou TE Conektivity obr. 35.



Obrázek 35 - Lisovaná součást JHO



Obrázek 36 - Lisovaná součást Kotva P2



5.2 Volba povlaků

Povlaky použité pro tvářecí nástroje se odlišují zejména svou tloušťkou, ta se může pohybovat v rozmezí 30 - 100 μm .

Jedním z problémů je vnitřní pnutí v povlaku, které roste s rostoucí tloušťkou nanesené vrstvy. Důležitým krokem bylo nalezení kontroly vnitřního pnutí v povlaku.

Nejnižší hodnoty pnutí jsou spojeny s povlaky TiN a CrN. Je rovněž znám příznivý vliv Ni na kompenzaci vnitřního napětí.

Správná funkce povlaku, zejména pro operace stříhání, je klasifikována z hlediska jeho tvrdosti (např. díky nitridu chromu), adhezní vlastnosti (např. díky nitridu titanu) a afinita povlaku (ulpívání stříhaného materiálu na nástroji).

Tepelná stabilita není pro operací stříhání podstatná. Vhodnost jednotlivých prvků obsažených ve struktuře povlaku se nedá jednoznačně určit, proto je vše prováděno v praxi.

Dle požadovaných rozměrových tolerancí u nástrojů, které se pohybují v přesnostech na tisíce s drsností povrchu po leštění Ra0,1 jsem se rozhodl pro tyto dva povlaky TiCN Plus a Alwin, které jsou popsány v tab. 9.

Tabulka 9 - Typy použitých povlaků

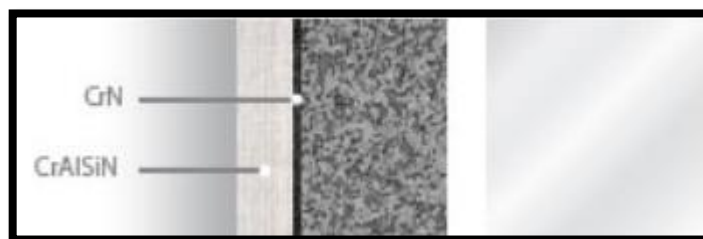
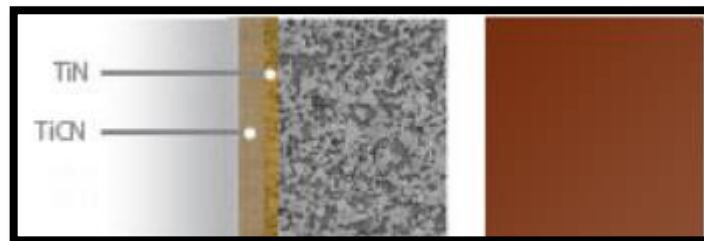
Typy povlaků	Charakteristiky povlaků	Oblasti aplikace
TiCN Plus	<ul style="list-style-type: none">• Gradientní povlak TiCN	<ul style="list-style-type: none">• Tváření,• Stříhání,• Frézování,• Závitování.
Alwin	<ul style="list-style-type: none">• Povlak na bázi CrAlSiN s vysokým obsahem chromu• Zamezuje „nalepování“ obráběného materiálu na nástroj	<ul style="list-style-type: none">• Tlakové lití hliníku,• Tváření,• Stříhání,• Frézování,• Vrtání.

Experiment je zaměřen na testování povlakovaného nástroje používaného při procesu stříhání v postupovém nástroji,

Jako nejvhodnější typy povlaků jsem zvolil Alwin a TiCN Plus. Vlastnosti zvolených povlaků jsou uvedeny v tab. 5 a 6, kde je zmíněná charakteristika povlaku z hlediska chemického složení či struktury povlaku, vhodný podkladový materiál i oblast aplikace. Volba zmíněných typů povlaků byla provedena v závislosti na předešlých zkušenostech jednotlivých firem využívajících postupového stříhání.

Typy povlaků	Mikrotvrdost [Gpa]	Tloušťka [μm]	Drsnost R_a [μm]	Tepelná stabilita [$^{\circ}\text{C}$]
Alwin	35	2,0 - 4,5	0,15 - 0,20	> 1000
TiCN Plus	34	1,0 - 4,0	0,20 - 0,25	400

Tabulka 10 - Vlastnosti povlaků





5.3 Výpočty pro zvolené razníky

Pro zvolené razníky jsem provedl výpočty spojené se stříháním materiálu a zároveň jsem provedl kontrolu razníku na vzpěr vzhledem k jeho častému praskání.

5.3.1 P2 Kotva

D	1,03mm
t	0,6mm
Rm	341 MPa
n	$\frac{1}{4}$
k	3,5
E	630 GPa
l	42mm

Střížná síla:

$$F_S = (1 \div 1,3) * l * t * \tau_1 \quad (13)$$

$$F_S = 1,1 * 3,23 * 0,6 * 272$$

$$\underline{F_S = 579,85 \text{ N}}$$

$$\tau_1 = 0,8 * R_m = 0,8 * 341 = 272 \quad (14)$$

$$l = \pi * D = \pi * 1,03 = 3,23 \quad (15)$$

Vzpěr:

$$F_{KRIT} = \frac{\pi^2 * E * J_{MIN}}{l^2} * n \quad (16)$$

$$F_{KRIT} = \frac{\pi^2 * 6,3 * 10^5 * 0,174}{1764} * \frac{1}{4}$$

$$\underline{F_{KRIT} = 153,369 \text{ N}}$$

$$F_D \leq \frac{F_{KRIT}}{k}$$

$$F_S \leq 44,6$$

$$\boxed{579,85 \text{ N} < 44,6 \text{ N} \rightarrow \text{NEVYHOVUJE}}$$



$$J_{MIN} = \frac{\pi}{64} * D^4 \sim 0,0491 * D^4 \quad (17)$$

Střížný odpor:

$$K_S = \frac{F_S}{S_t} = \frac{579,85}{1,938} = 299,2 \text{ MPa} \quad (18)$$

$$S_t = \pi * D * t = \pi * 1,03 * 0,6 = 1,938 \text{ mm}^2 \quad (19)$$

Stírací síla:

$$F_t = C_t * F_S = 0,06 * 579,85 = 34,791 \text{ N} \quad (20)$$

Střížná vůle:

Dle tab. pro tloušťku 0,6mm

$$v = 0,6 * 0,06 = 0,036 \text{ mm}$$

5.3.2 JHO MSR

D	2,98mm
t	1,5mm
Rm	341 MPa
n	$\frac{1}{4}$
k	3,5
E	600 GPa
l	65mm

Střížná síla:

$$F_S = (1 \div 1,3) * l * t * \tau_1$$

$$F_S = 1,1 * 9,357 * 1,5 * 272$$

$$\underline{F_S = 4199,4 \text{ N}}$$

$$\tau_1 = 0,8 * Rm = 0,8 * 341 = 272$$

$$l = \pi * D = \pi * 2,98 = 9,357$$

Vzpěr:



$$F_{KRIT} = \frac{\pi^2 * E * J_{MIN}}{l^2} * n$$

$$F_{KRIT} = \frac{\pi^2 * 6 * 10^5 * 3,872}{4225} * \frac{1}{4}$$

$$\underline{F_{KRIT} = 5428,315 N}$$

$$F_D \leq \frac{F_{KRIT}}{k}$$

$$F_S \leq 1550,9$$

$$\boxed{4199,4 N < 1550,9 N \rightarrow NEVYHOVUJE}$$

$$J_{MIN} = \frac{\pi}{64} * D^4 \sim 0,0491 * D^4$$

Střížný odpor:

$$K_S = \frac{F_S}{S_t} = \frac{4199,4}{14,136} = 297,1 MPa$$

$$S_t = \pi * D * t = \pi * 2,98 * 1,5 = 14,136 mm^2$$

Stírací síla:

$$F_t = C_t * F_S = 0,06 * 4199,4 = 251,9 N$$

Střížná vůle:

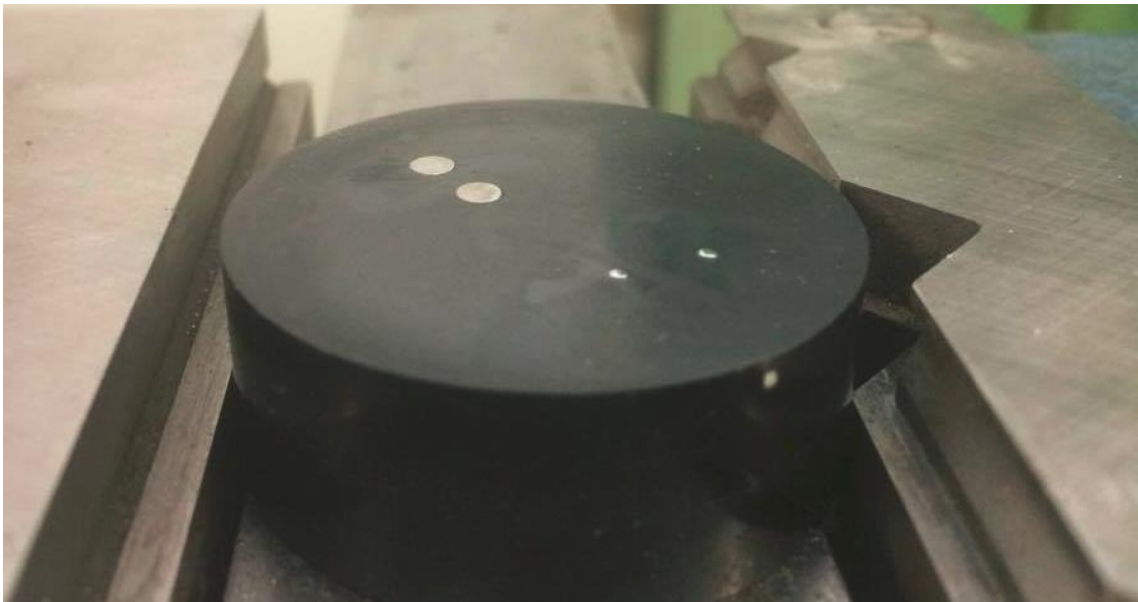
Dle tab. pro tloušťku 1,5mm

$$v = 1,5 * 0,07 = 0,105 mm$$

Po provedení výpočtů, kde jsem se zaměřil především na výpočet vzpěru razníku, jsem zjistil, že ani jeden z razníků nevyhovuje.

5.4 Vyhodnocení metalografických vzorků

Vzorky povlakovaných nástrojů byly rozřezány a připraveny k metalografickému prozkoumání. Zde jsem se potýkal s problémem, neboť docházelo k podbrušování vzorků při broušení. To bylo prováděno proto, aby byla lépe zachycena povlakovaná vrstva při zkoumání.

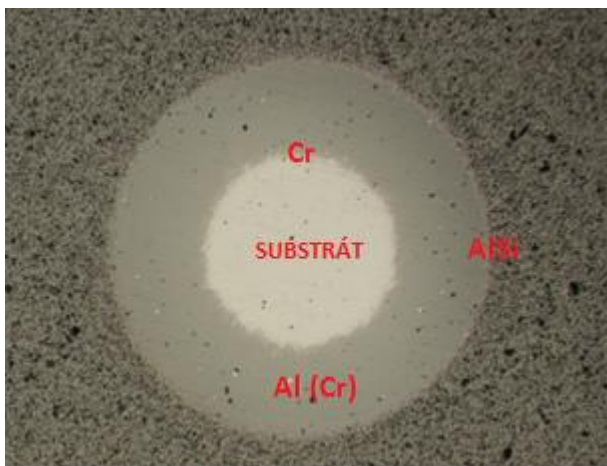


Obrázek 37 - Vzorek na metalografické vyhodnocení

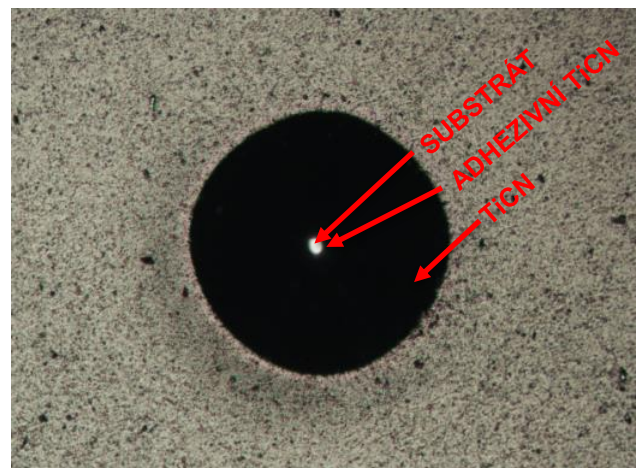
Morfologickou strukturou jsem byl schopen změřit velikost povlakované vrstvy pouze u razníku JHO s povlakem TiCN a to o tloušťce 2,5 μ m. U druhého razníku Kotva s povlakem ALWIN jsem nebyl schopen zachytit tloušťku povlakované vrstvy z důvodu kvalitního propojení vrstev při difuzním povlakování a malých rozměrů.



Ve spolupráci s firmou SHM Šumperk při řešení problémů praskání jednoho z razníků mi byly poskytnuty katody vzorků z procesu, jehož součástí byly i mé povlakované nástroje.



Obrázek 38 - Katoda vzorku ALWIN



Obrázek 39 - Katoda vzorku TiCN

Celý proces měl standardní průběh a na vzorcích byla naměřena tloušťka povlaku 2,34 μm .



5.5 Vyhodnocení tvrdosti

Na vzorcích také byla měřena tvrdost, nejprve na základním materiálu a poté na povlakovaných dílech při různých zatěžovacích silách. Nejprve 2,942N a následně při 9,807N, naměřené hodnoty lze porovnat v tab. 11 a 12.

Tabulka 11- Naměřená tvrdost u nástroje s povlakem ALWIN

HV 0,3	HV 1
Kotva P3	Kotva P3
1838	1799
1776	1783
1806	1761
Kotva P2+ ALWIN	Kotva P2+ ALWIN
2081	2047
2201	1869
2473	1955

Tabulka 12 - Naměřená tvrdost u nástroje s povlakem TiCN PLUS

HV 0,3	HV 1
JHO MSR	JHO MSR
1657	1488
1441	1435
1250	1467
JHO MSR+ TiCN PLUS	JHO MSR+ TiCN PLUS
1971	2081
2440	2461
3618	2299



Tyto naměřené hodnoty nejsou moc věrohodné z důvodu malého množství měření a velkým rozmezím hodnot. Při dodatečném vyhodnocování jsem výpočtem zjistil, že jsem zvolenými silami přesáhl doporučovanou hloubku vtisku pro povlaky, což je 1/10 tloušťky povlaku, a proto lze usuzovat, že naměřené hodnoty neodpovídají reálným tvrdostem povlakované vrstvy a jádra, které se promítne na výsledcích překročení 1/10 tloušťky povlaku.

Nové naměřené hodnoty

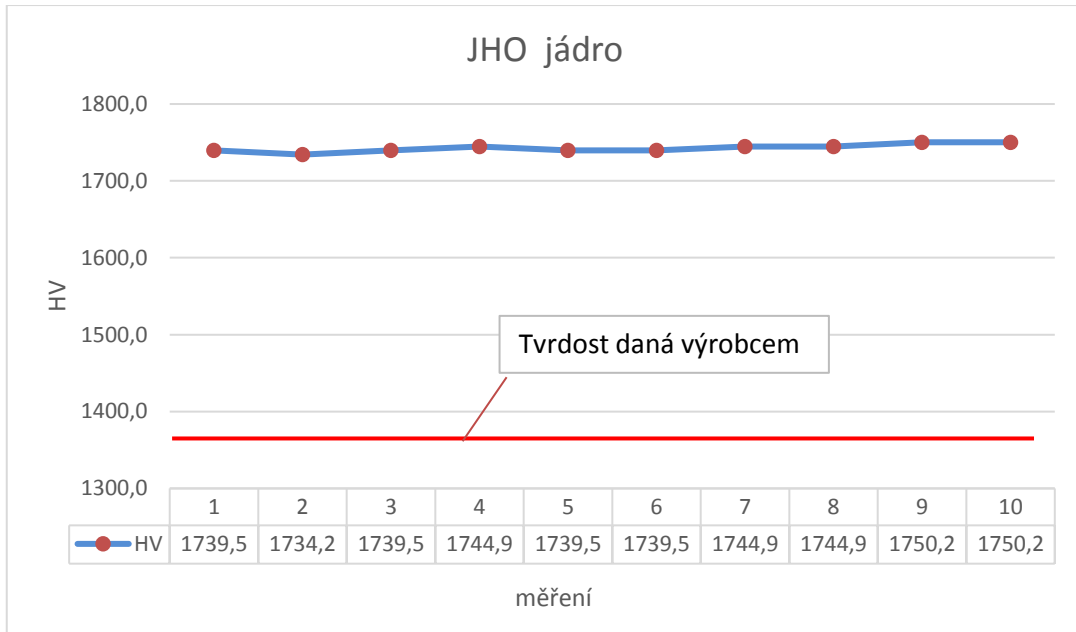
Při měření nových tvrdostí jsem se rozhodl zvolit zatížení 1,961N u měření tvrdosti povlaku a 9,807N u měření jádra razníku. Měření probíhalo za standardních laboratorních podmínek.

Tabulka 13 - Nové naměřené tvrdosti jader razníků

místo měření	JHO jádro		KOTVA P2-jádro	
	HV1	HRA	HV1	HRA
1	1739,5	80,4	1492,4	84,9
2	1734,2	80,6	1496,6	84,9
3	1739,5	80,4	1471,4	85,2
4	1744,9	80,3	1455,0	85,4
5	1739,5	80,4	1463,2	85,3
6	1739,5	80,4	1446,9	85,5
7	1744,9	80,3	1467,3	85,3
8	1744,9	80,3	1450,9	85,5
9	1750,2	80,2	1463,2	85,3
10	1750,2	80,2	1467,3	85,3
	1742,7	80,4	1467,4	85,3

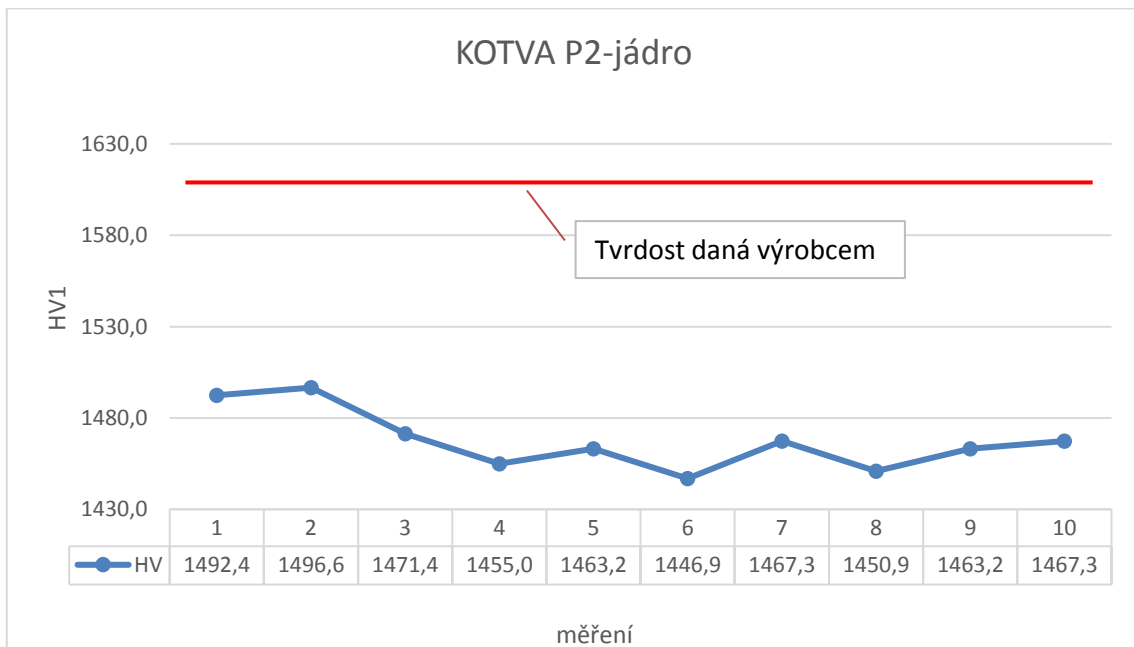
Po naměření tvrdostí v jádře obou razníků jsem tyto hodnoty porovnal s tab. 14. Složení a vlastnosti materiálů (CF-H25S a CF-H40S), kde jsou udávané hodnoty tvrdosti v HV.

Graf 4 - Naměřené tvrdosti jádra razníku JHO



Dle tab. 7 jsem zjistil, že uváděné tvrdosti materiálu jsou velice odlišné od naměřených, kde pro materiál razníku JHO je uváděna tvrdost 1380HV a naměřená tvrdost jádra po povlakování je 1742HV.

Graf 5 - Naměřené tvrdosti jádra razníku Kotva P2





U použitého základního materiálu pro razník Kotva P2 je uváděna tvrdost 1600HV tab. 7 a naměřená tvrdost vychází 1467HV viz graf 6.

Naměřené hodnoty tvrdosti povlaků byly provedeny také pomocí zkoušky dle Vickerse při zvoleném zatížení 1,961N. Toto zatížení bylo zvoleno, aby se neporušila podmínka, že tvrdost povlakované vrstvy se musí měřit do 1/10 tloušťky povlaku a nebylo tak měření ovlivněno houževnatějším jádrem.

Tabulka 14-Nové naměřené tvrdosti povlaků razníků

místo měření	JHO- TiCN		KOTVA -AlWIn	
	HV 0,2	HRA	HV 0,2	HRA
1	2451,4	55,8	2005,2	73,1
2	2317,6	61,5	1990,5	73,5
3	2412,0	57,5	1961,6	74,4
4	2373,6	59,2	1947,5	74,9
5	2354,7	60,0	2020,0	72,6
6	2336,1	60,8	1865,5	77,2
7	2431,6	56,7	2020,0	72,6
8	2431,6	56,7	1990,5	73,5
9	2317,6	61,5	2020,0	72,6
10	2354,7	60,0	2005,2	73,1
	2378,1	59,0	1982,6	73,7

Po provedení kontroly razníku přeměření tvrdosti povlaku a jádra jsem zjistil, že se tvrdost jádra výrazně změnila, což může být problém, který mi způsobuje praskání jednoho z razníků.

5.6 Testování při reálných podmínkách

Pro nejlepší vyhodnocování vytipovaných povlaků je zařazení razníku do výroby a sledování při reálných podmínkách. Jelikož oba razníky jsou uloženy v páru, může se tak lehce vyhodnocovat opotřebení a následně porovnávat s nepovlakovanými razníky.

JHO razník č. 1

Jako první se do provozu podařilo zařadit razník JHO, na který byl aplikován povlak *TiCN*.

Tabulka 15 - Počty odjetých kusů JHO 1. razník

NAJETÉ KUSY		10000	0	10000	10000	140000
PORUŠENÍ	POVLAK. RAZNÍK	ANO	NE	ANO	ANO	NE
	NEPOVLAK. RAZNÍK	NE	NE	NE	NE	NE
VÝMĚNA RAZNÍKŮ		NE	ANO	NE	NE	NE
POZNÁMKA		Vyštípnutí povlakovaného nástroje	Po seřízení vyštípnutí povlakovaného nástroje	Přebroušení povlakovaného nástroje	Otřepty na kuse u povlakovaného razníku	Přebroušení obou razníků



Obrázek 40- Razník JHO TiCN



Obrázek 41 - Detail lomu JHO TiCN

U prvního razníku však došlo hned na začátku při odjetí **10 000 ks** k porušení čela hrany. Tento problém byl odstraněn firmou přebroušením čela razníku a opětovném zasazení. Při opakovaném nasazení došlo k vyštípnutí hrany a následovala výměna celého razníku. Po zasazení nového razníku po **20 000 ks** vznikl otřep na výrobku, následovalo přebroušení a opětovné použití. Nástroj vylisoval dalších **140 000 ks**, po kterých došlo k trvalému poškození razníku obr. 42 a ten byl firmou následně vyřazen z provozu.

JHO razník č. 2

Po trvalém porušení prvního razníku, který byl vyřazen z provozu, byl nahrazen novým, nepoškozeným razníkem JHO se stejnou povrchovou úpravou.

Tabulka 16-Počty odlisovaných kusů JHO 2. razník

NAJETÉ KUSY		0	530000	980000	0
PORUŠENÍ	POVLAK. RAZNÍK	NE	NE	ANO	ANO
	NEPOVLAK. RAZNÍK	NE	NE	ANO	NE
VÝMĚNA RAZNÍKŮ		ANO	NE	NE	ANO
POZNÁMKA		Nové seřízení a vložení razníků	Otřepy na zámcích	Otřepy na obou raznících-přebroušení	Prasknutí povlakovaného razníku-konec testování



Obrázek 42 - Poškozený razník JHO TiCN



Obrázek 43 - Detail poškozeného razníku JHO TiCN

U nového razníku nedošlo k žádnému poškození při nasazování do nástroje a bez jakýchkoliv problémů odlisoval **1 510 000 ks**, po kterých došlo k úplnému poškození druhého razníku obr. 45.

Kotva razník č. 1

Razník **KOTVA P2** s povlakem **ALWIN** odlisoval **675 000ks**, došlo k zřetelnému opotřebení nepovlakovaného nástroje. Následně oba nástroje byly zaslány na hodnocení opotřebení.



Tabulka 17- Odlisované kusy Kotva ALWIN

Testování Kotva ALWIN

NAJETÉ KUSY		675.000	75.000	15.000	60.000
PORUŠENÍ	POVLAK. RAZNÍK	NE	NE	NE	NE
	NEPOVLAK. RAZNÍK	ANO	NE	NE	NE
VÝMĚNA RAZNÍKŮ		ANO	NE	NE	NE
POZNÁMKA		Otřep na nepovlakovaném razníku- přebroušení	Prasklý jiný razník	Prasklý jiný razník	Porušené pouzdro

800.000	170.000	1.711.000
NE	NE	NE
NE	ANO	ANO
NE	ANO	NE
Konec zakázky	Otřep na nepovlakovan ém razníku- přebroušení	Otřep na nepovlakovan ém razníku- konec zakázky



Obrázek 44 - Porovnání razníků Kotva



Obrázek 45 - Detail opotřebení napovlakovaného razníku Kotva



Závěr

Diplomová práce je zaměřena na povlakování střížných nástrojů s cílem navýšení jejich životnosti.

V úvodní části práce se zaměřuji na základní teorii tváření, hlavní znaky a deformační zpevnění. Navazují technologie plošného tváření se zaměřením především na problematiku stříhání, kde je detailně popsán výpočet střížných sil, průběh realizace stříhání a vliv střížné vůle na kvalitu střížné plochy.

Dále jsem se zabýval různými metodami povlakování nástrojů. Z možných způsobů povrchových úprav jsem vytypoval nejvhodnější a nejpoužívanější metodu PVD, která by vyhovovala pro střížníky a jejich práci. Po vytypování vhodných povlaků, které by vyhovovaly pro naše střížníky a následné konzultaci s různými odborníky zabývajícími se touto problematikou, jsem se rozhodl pro dva typy povlaků Alwin a TiCN Plus.

Následně byly vytypovány vhodné střížníky, které splňovaly podmínku více identických střížníků v jednom nástroji, aby bylo možné porovnávat výsledky životnosti jednotlivých povrchových úprav mezi sebou a zároveň, aby byl nástroj co možná nejčastěji nasazován do výroby. Cílem je simulovat identické podmínky provozu pro oba střížníky, aby bylo co nejlépe možné sledovat rozdíl v opotřebením mezi povlakovaným a nepovlakovaným střížníkem. Proto jsem po konzultaci s firmou TE Connectivity Trutnov zvolil razníky P2 KOTVA a JHO MSR. Zvolené razníky byly zároveň ověřeny pevnostními výpočty na tlak a stříh.

Pro tyto střížníky bylo zajištěno vytvoření povlaku, pro střížník P2 KOTVA povlakem ALWIN a pro střížník JHO MSR povlakem TiCN Plus. Vybrané druhy povlaku byly srovnávány s původním střížníkem bez vytvoření povlaku. Razníků s povlakem bylo vytvořeno větší množství, kdy některé razníky byly určeny na testy a některé na vložení do nástroje, aby bylo možné sledovat opotřebením za reálných podmínek.

Po procesu povlakování byly vytypovány nejpoužívanější druhy zkoušek povlaků (viz kapitola 5.4), kde jsem zvolil nejvhodnější dva druhy zkoušek, zkoušku tvrdosti a metalografické pozorování povlaku, kterým jsem ověřoval tloušťku povlakované vrstvy. Tyto zkoušky jsou nejvhodnější pro naše razníky, ať už z tvarového hlediska nebo z důležitosti zkoušek.



V praktické části jsem se zabýval realizováním zkoušek na povlakovaných vzorcích. Měřením tvrdosti jsem zjistil, že povrch razníku u P2 KOTVA je 1982,6 HV_{0,2} a u razníku JHO MSR je 2378,1 HV_{0,2}. Následovalo měření tvrdosti jádra materiálu razníků, u kterých jsem zjistil, že uváděné tvrdosti materiálu jsou velice odlišné od hodnot deklarovaných dodavatelem střižníků. Pro materiál razníku JHO je uváděna tvrdost 1380HV, naměřená tvrdost jádra po povlakování je 1742 HV₁. U použitého základního materiálu pro razník Kotva P2 je uváděna tvrdost 1600HV a naměřená tvrdost vychází 1467 HV₁.

Dále bylo řešeno metalografické pozorování řezu nástrojem. Bylo nutno potýkat se s řadou problémů, mezi které patřila vysoká tvrdost a s tím související podbrušování analyzovaného vzorku. Při pozorování vrstvy nebylo možné změřit tloušťku povlaku z důvodu kvalitního propojení vrstev při difuzním povlakování. Také vznikly problémy při vybrušování, kde docházelo k podbrušování a následnému zaoblování samotných hran vzorků. Do budoucna bych doporučil zkusit naleptání vzorků, po kterém by bylo rozhraní povlaku a základního materiálu zřetelnější.

Po provedených analýzách je možné konstatovat, že povlaky vykazují vyšší životnost, což se projevuje i vyšším počtem vyrobených dílů. Především je to patrné u razníku KOTVA P2 s povlakem ALWIN. Co se týče razníku JHO s povlakem TiCN Plus nelze jednoznačně usoudit, zda povlak bude mít vyšší životnost, vzhledem k dalším faktorům, které mohou ovlivňovat životnost samotného střižníku. Mezi tyto faktory patří například nevyhovující výpočty na vzpěr nebo uložení samotného střižníku v nástroji, kde podle doložené fotografie vyvstává otázka, zda je nástroj uložen správně nebo naopak a zda je toto založení příčinou praskání razníků. Dalším faktorem pak mohou být i různá konstrukční řešení razníku apod. Proto, aby byla ověřena skutečnost, že jsou tyto povlaky vhodné, bylo by třeba provedení dalších experimentů.

Jako doporučení pro další provádění experimentu bych navrhl zaměřit se na skutečnost, zda odpovídá deklarovaná tvrdost materiálu na výrobu razníku od dodavatele. Provedením dalších měření tvrdostí nástrojů. V neposlední řadě doporučuji zvážení změny konstrukce razníků a jejich uložení, aby se eliminovaly nevhovující výsledky výpočtů na vzpěr.



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1- Porucha mřížky.....	10
Obrázek 2- Hranová dislokace.....	11
Obrázek 3 - Šroubová dislokace	11
Obrázek 4 - Mechanismus kluzu	12
Obrázek 5 - Znázornění Frankova-Readova zdroje dislokací: A, B – překážky pohybu dislokace C, 1 – skluz dislokace, 2-4 – prohýbání dislokace, 5 – vznik nové dislokační smyčky	13
Obrázek 6 - Křivky deformačního zpevnění	14
Obrázek 7- Napěťový stav při stříhu.....	16
Obrázek 8 - První fáze stříhání (oblast pružné deformace) [33].....	17
Obrázek 9 -Třetí fáze (oddělení materiálu) [33].....	18
Obrázek 10 - Deformační pásma na střížné ploše (1 - Zaoblení, 2 - Utržení, 3 - Smyk, 4 - Otláčení) [35]	18
Obrázek 11 - Střížná plocha.....	19
Obrázek 12 - Vliv střížné vůle.....	19
Obrázek 13 - Vliv střížné vůle na kvalitu střížné plochy a) optimální střížná vůle, b) střížná vůle malá, c)střížná vůle velká.....	20
Obrázek 14 - Kvalita střížné plochy pro různou velikost střížné mezery.....	22
Obrázek 15 - Průběh střížné síly v závislosti na dráze [36].....	23
Obrázek 16 - Závislost střížné práce.....	25
Obrázek 17 - Tvorba povlaku metodou a) PVD, b)CVD.....	28
Obrázek 18 - Rozhraní podklad - Povlak	30
Obrázek 19 - Naprašovací komora 14	34
Obrázek 20 - Vyvážený a nevyvážený magnetron	35
Obrázek 21 - Napařovací komora	36
Obrázek 22 - Schéma nanokompozitní struktury nc-(Ti _{1-x} Al _x)/a-Si ₃ N ₄	41
Obrázek 23 - Multivrstvý povlak TiN/TiCN – 62 vrstev o tloušťce 50nm	43
Obrázek 24 - Schéma zařízení pro CVD povlakování.....	44
Obrázek 25 - Drsnosti vrstev připravovaných a) magnetronovým napařováním b) obloukovým napařováním	49



Obrázek 26 - Mercedes test [27]	50
Obrázek 27 - Scratch test a) Konstantní zatížení b) Plynule narůstající c) Skokově narůstající zatížení [28]	51
Obrázek 28 - Zařízení na scratch test	52
Obrázek 29 - Zařízení "PIN ON DISC"	53
Obrázek 32 - P2 Kotva razník	60
Obrázek 31 - Zasazený střížný nástroj P2 Kotva v razníku	60
Obrázek 33 - JHO MSR razník.....	61
Obrázek 34 - Zasazený střížný nástroj JHO MSR v razníku	61
Obrázek 35 - Materiálový atest RFe80.....	62
Obrázek 36 - Lisovaná součást JHO.....	62
Obrázek 37 - Lisovaná součást Kotva P2	62
Obrázek 38 - Vzorek na metalografické vyhodnocení.....	68
Obrázek 39 - Katoda vzorku ALWIN	69
Obrázek 40 - Katoda vzorku TiCN	69
Obrázek 41- Razník JHO TiCN	74
Obrázek 42 - Detail lomu JHO TiCN	75
Obrázek 44 - Poškozený razník JHO TiCN	76
Obrázek 45 - Detail poškozeného razníku JHO TiCN	76
Obrázek 46 - Porovnání razníků Kotva	77
Obrázek 47 - Detail opotřebení napovlakovaného razníku Kotva	77



SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Velikosti střížných mezer na tloušťce materiálu.....	20
Tabulka 2 - Koeficienty v závislosti na materiálu [36].....	25
Tabulka 3 - Hloubka součinitele vtažení K_a do materiálu	26
Tabulka 4 - Tabulka přesností.....	27
Tabulka 5 - Strukturální, mechanické a tepelné vlastnosti některých nátěrových hmot [10]	31
Tabulka 6 - Tvrdosti nejběžnějších vrstev	47
Tabulka 7 - Složení a vlastnosti materiálů CF-H25S a CF-H40S	59
Tabulka 8 - Chemické složení materiálu RFe80.....	59
Tabulka 9 - Typy použitých povlaků	63
Tabulka 10 - Vlastnosti povlaků	64
Tabulka 11- Naměřená tvrdost u nástroje s povlakem ALWIN.....	70
Tabulka 12 - Naměřená tvrdost u nástroje s povlakem TiCN PLUS.....	70
Tabulka 13 - Nové naměřené tvrdosti jader razníků.....	71
Tabulka 14- Nové naměřené tvrdosti povlaků razníků	73
Tabulka 15 - Počty odjetých kusů JHO 1. razník.....	74
Tabulka 16- Počty odlisovaných kusů JHO 2. razník	75
Tabulka 17- Odlisované kusy Kotva ALWIN	77



POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1: [učební text pro střední odborná učiliště]*. V Scientii 1. vyd. Praha: Scientia, 1996. ISBN 80-718-3017-8.
- [2] *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2351-6.
- [3] *Technologie tváření kovů* [online]. [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [4] FABÍK, Richard. *Úvod do tváření*. 2009. Prezentace.
- [5] Fyzikální základy vědy o materiálu. <Http://www.ped.muni.cz/> [online]. [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>
- [6] DORAZIL, Eduard. *Strojírenské materiály a povrchové úpravy*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, 1988. ISBN 55-607-88.
- [7] *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam - materiálový výzkum.: KŘÍŽ, Antonín., 2006 [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf.
- [8] Trendy v povlakování slinitých karbidů. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2001, **2001** [cit. 2016-07-04]. DOI: 010705. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
- [9] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [10] BUNSHAH, R. F. *Handbook of hard coatings: deposition technologies, properties and applications*. Norwich, N.Y.: William Andrew Pub., c2001. Materials science and process technology series. ISBN 978-081-5514-381.
- [11] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno: CCB, 1995. ISBN 80-858-2510-4.
- [12] LIBRTA, M. *Naprašování tenkých vrstev* [online]. In: 2003 [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484>.
- [13] MATTOX, Donald M. *Vacuum Deposition Processes* [online]. [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: https://97a870b369d7a92a7133bc98c546f8c0086f87f9.googleusercontent.com/host/0B_SsYZssxUJEbGR3Qk9ROEdNUEU/Handbook-Physical-Vapor-Deposition-Processing-41WTX4O0t%252BL.pdf



- [14] OERLIKON BALZERS COATING AUSTRIA GmbH [online]. [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bcz/cze/01-products-services/03-coating-technology/01-coating-processes/indexW3DnavidW261.php>
- [15] BUNSHAH, R. F. *Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, technology, and applications*. 2nd ed. Park Ridge, N.J.: Noyes Publications, c1994. ISBN 08-155-1337-2.
- [16] DOLEŽAL, Jan. *Metody povlakování rezných nástrojů* [online]. 2011 [cit. 2016-07-04]. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [17] [online]. [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: <http://www.pvd-coatings.co.uk/theory/how-are-pvdcoatings-deposited/unbalanced-magnetron/>.
- [18] CVD povlaky [online]. [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pa ges/coating-%E2%80%93cvd.aspx
- [19] CVD povlakování [online]. [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: <http://www.uddeholm.cz/czech/files/CVD.pdf>
- [20] Povlakování [online]. [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: http://www.pemit.cz/assets/files/pdf/brooks_gp012_cz.pdf
- [21] FOLTÝN, MICHAL. *POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6370. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. FSI VUT. Vedoucí práce Doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.
- [22] 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>
- [23] ZAPLETAL, Zdeněk. Prášková metalurgie a její využití. MM Průmyslové spektrum [online]. 2002 [vid. 2016-06-15]. Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/praskova-metalurgie-a-jeji-vyuziti>.
- [24] ČERMÁK, Jan. Teorie a metodika tváření. FS ČVUT v Praze. Prezentace
- [25] Kadlec, J., Metodika hodnocení chemického složení a vlastností povlaků FeFe2O4 [online]. Brno Univerzita Obrany v Brně, 2006.
- [26] WAN, M., ZHANG, W.H., QIN, G.H., TAN, G. Efficient calibration of instantaneous cutting force coefficients and runout parameters for general end mills. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2016) 1767–1776. Science direct 2006



- [27] Hedequist P., Hogmark S. Experiences from scratch testing of tribological PVD coatings. *Tribology International*. Volume 30. Str. 507-516. 1997.
- [28] Panjan P., Čekada M., Navinsek B.: A new experimental method for studying the cracking behaviour of PVD multilayer coatings. *Surface and Coatings Technology* 174 –175. 2003. Str. 55–62.
- [29] Bláhová O.: Mechanické vlastnosti tenkých vrstev deponovaných obloukovým odpařováním. *Disertační práce*. 1998.
- [30] KŘÍŽ, Antonín. Tribologická analýza pin-on-dosc [online]. ZČU v Plzni [vid. 2016-06-15]. Dostupný z: http://www.ateam.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf
- [31] ČURDOVÁ, Modika. *Povrchové úpravy ve strojírenství* [online]. 2015 [cit. 2016-07-04]. Bakalářská práce. VUT Brno
- [32] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 1. vyd. Brno: CERM, 2004, 167 s. ISBN 80-214-2764-7
- [33] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007, 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
- [34] DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 2. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
- [35] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [36] BOBČÍK, Ladislav. *Střížné nástroje pro maloseriovou výrobu*. vyd. 1. Praha: SNTL, 1983, 213 s. eISBN 04-229-83.
- [37] Technologie plošného tváření-stříhání. PETR, Lenfeld. *Technologie II: tváření kovů, zpracování plastů* [online]. [2005] [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm
- [38] Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2005, **2005** [cit. 2016-12-20]. DOI:050929 Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-uprav-nastroju-pred-a-po-povlakovani.html>