

Zjišťování životnosti vysekávacích nástrojů s různými povlaky

Bc. Jaroslav Podsedník

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav Podsedník**

Osobní číslo: **T14299**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Zjišťování životnosti vysekávacích nástrojů s různými povlaky**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Výběr různých typů vysekávacích nástrojů s různou škálou povlaků.
3. Provedení experimentu na vybraných nástrojích.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků a ekonomické zhodnocení.



Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

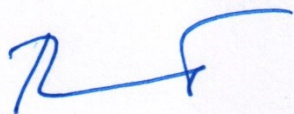
Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

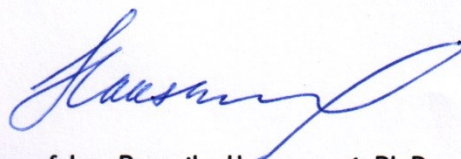
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 10. května 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 13.5.2016

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

II ²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

III ³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihledne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce popisuje v první, teoretické, části technologii stříhání, následují kapitoly směřující už k tématu povlakování z hlediska metod a druhů, se zaměřením na metodu PVD.

Druhá, praktická, část popisuje testování povláknutých vysekávacích nástrojů v reálné výrobě, která zpracovává ocelové plechy. Testují se různé povlaky - počínaje základním TiN (Nitrid titanu), přes TiCN (Carbo-nitrid titan), dále pak TiCrN a AlCrN a konče více-vrstvými povlaky typu TiAlN + WC/C. Testování probíhá na stejných strojích a nástrojích, stejném materiálu a tloušťce, tedy pokud možno za stejných podmínek.

Výsledkem je pak porovnání všech testovaných povlaků s nepovlakovaným nástrojem vzhledem k životnosti nástrojů mezi jednotlivými broušenými s ohledem na cenu jednotlivých povlaků.

Klíčová slova: povlakování, PVD technologie, TiN, TiCN

ABSTRACT

The thesis describes the first, theoretical, part cutting technology, the next chapter already pointing to the topic coating in terms of methods and the species to focus on method PVD.

The second, practical, part describes the testing of coated punching tools in real production, which processes steel sheets. Tested with various coatings - from Ac-pal TiN (Titanium nitride), TiCN through (carbo-nitride titanium), then TiCrN and AlCrN and ending with a multi-layered coating type TiAlN + WC/C. Testing takes place on the same machines and tools, the same material and thickness, therefore, if possible, under the same conditions.

The result is then compared to all tested coatings with uncoated instrument due to tool life between the grinding with regard to the price-per-unit individual coatings.

Keywords: coating, PVD technology, TiN, TiCN

Děkuji tímto panu Ing. Martinovi Ovsíkovi, Ph.D. z UTB za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Děkuji tímto své rodině za psychickou podporu, hlavně pak své skoro manželce Dáje.

Děkuji tímto panu Edwinovi Haschkovi, Petrovi Kučírkovi, Ing. Richardovi Krejčímu, Bc. Františkovi Mendlíkovi, Filipovi Šebelovi a Janovi Florianovi z firmy EDP s.r.o. za pomoc při získávání dat z výroby.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická, nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| IV TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 STŘIŽNÉ (VYSEKÁVACÍ) NÁSTROJE | 12 |
| 1.1 MATERIÁLY STŘIŽNÝCH NÁSTROJŮ | 12 |
| 1.1.1 Nástrojové oceli | 12 |
| 1.1.2 Slinuté karbidy | 13 |
| 1.2 VÝROBA STŘIŽNÉHO NÁSTROJE | 14 |
| 1.2.1 Konvenční technologie obrábění..... | 14 |
| 1.2.2 Nekonvenční metody obrábění | 15 |
| 1.2.3 Prášková metalurgie | 16 |
| 2 METODY POVLAKOVÁNÍ | 17 |
| 2.1 METODA POVLAKOVÁNÍ CVD..... | 18 |
| 2.1.1 Metoda MTCVD (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition)..... | 19 |
| 2.1.2 Metoda PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) | 20 |
| 2.1.3 Metody PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) | 21 |
| 2.1.4 Metoda HFCVD (Hot Filament Chemical Vapour Deposition) | 22 |
| 2.1.5 Metoda CVD s lavinovým plazmatickým výbojem (CACVD - Cascade Arc Chemical Vapour Deposition) | 22 |
| 2.1.6 Laserem indukovaná CVD metoda (Laser Induced Chemical Vapour Deposition - LICVD, LCVD) | 23 |
| 2.1.7 Mikrovlnná plazmatická CVD metoda (MicroWave Plasma Chemical Vapour Deposition - MWPCVD)..... | 24 |
| 2.2 METODA POVLAKOVÁNÍ PVD | 25 |
| 2.2.1 PVD - Napařování (Evaporation)..... | 27 |
| 2.2.2 PVD - Odporové napařování (Resistance Evaporation) | 28 |
| 2.2.3 PVD - Obloukové napařování (Arc Evaporation)..... | 29 |
| 2.2.4 PVD - Indukční napařování (Induction Evaporation)..... | 30 |
| 2.2.5 PVD - Napařování elektronovým paprskem (Electron Beam Evaporation)..... | 31 |
| 2.2.6 PVD - napařování laserovým paprskem (Laser Beam Evaporation) | 31 |
| 2.2.7 PVD - Naprašování (Sputtering)..... | 32 |
| 2.2.8 PVD - Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody | 32 |
| 2.2.9 PVD - Magnetronové naprašování (Magnetron Sputtering)..... | 33 |
| 2.2.10 PVD - Radiofrekvenční naprašování (Radio Frequency Sputtering)..... | 34 |
| 2.2.11 PVD - HIPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering)..... | 34 |
| 2.2.12 PVD - Naprašování iontovým paprskem (Ion Beam Sputtering) | 35 |
| 2.2.13 PVD - Iontová implantace (Ion Implantation) | 36 |
| 2.2.14 Tetrabond implantace..... | 38 |
| 3 ZÁKLADNÍ DRUHY POVLAKŮ | 39 |
| 3.1 JEDNOVRSTVÉ POVLAKY | 39 |
| 3.2 VÍCEVRSTVÉ POVLAKY | 40 |
| 3.2.1 Nanostrukturní vrstvy..... | 41 |
| 3.2.2 Nanokompozitní vrstvy | 41 |
| 3.2.3 Gradientní vrstvy | 42 |
| 3.2.4 Multivrstvy | 42 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.5 | Kluzné vrstvy | 43 |
| 3.2.6 | Diamantové vrstvy | 43 |
| 3.2.7 | DLC vrstvy | 44 |
| 4 | VÝVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI POVLAKOVÁNÍ NÁSTROJŮ | 46 |
| | v PRAKTICKÁ ČÁST | 47 |
| 5 | PODMÍNKY TESTU | 48 |
| 5.1 | VYSEKÁVACÍ STROJ TRUPUNCH 5000 | 49 |
| 5.2 | KOMBINOVANÝ STROJ TRUMATIC 6000 A TRUMATIC 7000 | 50 |
| 5.3 | MATERIÁL ZKOUŠKY | 50 |
| 5.4 | ZKOUŠENÉ NÁSTROJE | 51 |
| 5.4.1 | Kruhový střížník Ø 3 mm | 52 |
| 5.4.2 | Obdélníkový (dělicí) střížník 76,2 mm x 5,0 mm | 52 |
| 5.4.3 | Čtvercový střížník 50,0 mm x 50,0 mm | 53 |
| 5.5 | POVLAKY JEDNOTLIVÝCH NÁSTROJŮ | 53 |
| 5.5.1 | TiCrN – Valenta | 54 |
| 5.5.2 | TiCN – Trumpf | 54 |
| 5.5.3 | TiAlN + WC/C – Oerlikon | 55 |
| 5.5.4 | AlCrN – Oerlikon | 55 |
| 5.5.5 | Bez povlaku – Trumpf | 56 |
| 5.5.6 | TiN - Oerlikon | 56 |
| 6 | PRŮBĚH TESTOVÁNÍ | 57 |
| 6.1 | TESTOVÁNÍ KRUHOVÝCH STŘIŽNÍKŮ Ø 3 MM | 57 |
| 6.2 | TESTOVÁNÍ DĚLICÍCH (OBDÉLNÍKOVÝCH) STŘIŽNÍKŮ 76,2 MM X 5,0 MM | 58 |
| 6.3 | TESTOVÁNÍ ČTVERCOVÝCH STŘIŽNÍKŮ 50,0 MM X 50,0 MM | 58 |
| 7 | VÝSLEDKY TESTU | 60 |
| 7.1 | NAMĚŘENÁ DATA JEDNOTLIVÝCH TYPŮ STŘIŽNÍKŮ | 60 |
| 7.1.1 | Naměřená data u kruhových střížníků Ø 3 mm | 60 |
| 7.1.2 | Naměřená data u dělicích (obdélníkových) střížníků 76,2 mm x 5 mm | 62 |
| 7.1.3 | Naměřená data u čtvercových střížníků 50,0 mm x 50,0 mm | 63 |
| 7.2 | POROVNÁNÍ POVLÁKNUTÝCH STŘIŽNÍKŮ VŮČI STŘIŽNÍKU BEZ POVLAKU – ZJIŠŤOVÁNÍ ŽIVOSTNOSTI | 65 |
| 7.3 | EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ | 66 |
| 7.3.1 | Ekonomické zhodnocení povlakování pro kruhový střížník Ø 3 mm | 66 |
| 7.3.2 | Ekonomické zhodnocení povlakování pro dělicí střížník 76,2mm x 5,0mm | 67 |
| 7.3.3 | Ekonomické zhodnocení povlakování pro čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm | 68 |
| | ZÁVĚR | 70 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 72 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 75 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 77 |
| | SEZNAM TABULEK | 79 |
| | SEZNAM PŘÍLOH | 80 |

ÚVOD

Pomocí povlakování lze výrazně zlepšit celkové vlastnosti nástrojů. Mezi tyto vlastnosti patří například tvrdost, houževnatost, odolnost vůči opotřebení, vysokým teplotám či tvorbě trhlin na povrchu. Zvýšením těchto vlastností přispívá ke zvýšení životnosti a produktivity výroby.

Z hlediska kvality povlaku nehrají hlavní roli pouze použité materiály povlaku, ale také struktura vytvořená na základním substrátu a adhezni vlastnosti přechodové vrstvy mezi substrátem a povlakem.

Dalším důležitým aspektem při povlakování je vhodné zvolení metody povlakování. V této době se nejčastěji používají dvě základní metody a to PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování/naprašování) a CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování z plynné fáze). Ty se následně větví do mnoha dalších modifikací.

První sériově vyráběné povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu přinesla na trh v roce 1969 švédská firma Sandvik Coromant. Na destičkách byl nanesen jednovrstvý povlak titanu karbidu (TiC). Povlak byl nanesen metodou CVD. V 80. letech, s rozvojem technologií, přišla metoda PVD. Hitem pak byl povlak nitridu titanu (TiN).

S rozvojem technologií, zvyšování kvality vstupních materiálů, vznikají požadavky na kvalitnější a lepší povlaky, jako jsou například MTCVD (Middle Temperature CVD) nebo PACVD (Plasma Assisted CVD).

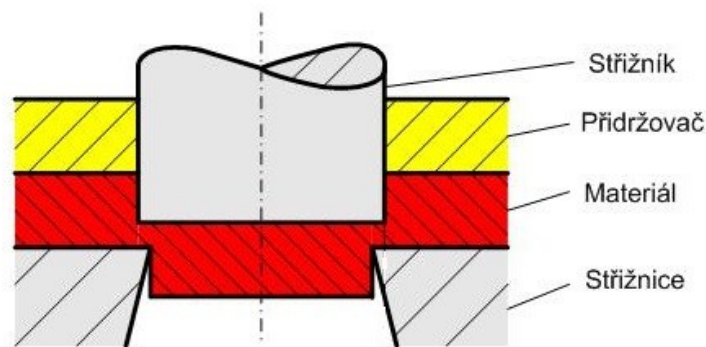


Obr. 2. Břitové destičky s TiN povlakem [4].

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 STŘIŽNÉ (VYSEKÁVACÍ) NÁSTROJE

Stříhání je nejrozšířenější operací plošného tváření a dle teploty procesu se dělí na stříhání za studena a za tepla. Princip stříhání (obr. 1) je postaven na oddělování materiálu působením protilehlých řezných hran způsobujících v řezné rovině smykové napětí. Při stříhání noži (stříhání rovnoběžnými a šikmými noži) jsou ony protilehlé řezné hrany části střížných nástrojů, které se nazývají střížník a střížnice [1].



Obr. 1. Schéma principu stříhání [1].

1.1 Materiály střížných nástrojů

Střížník i střížnice jsou při procesu stříhání silně mechanicky namáhány, proto je nutné je mít vyrobené z kvalitních materiálů. Většina střížníků a střížnic jsou vyrobeny buď z nástrojové oceli nebo ze slinutých karbidů.

1.1.1 Nástrojové oceli

Jedná se o slitiny železa, karbidu železa a dalších prvků ovlivňujících strukturní a mechanické vlastnosti výsledné slitiny. V případě, že je daná ocel správně tepelně zpracována, zvyšuje vyšší podíl slitinových prvků životnost a vlastnosti oceli. V případě, že tepelné zpracování neproběhne regulérně, podle požadovaných podmínek, dochází bez ohledu na množství legujících prvků ke zhoršení vlastností dané slitiny.

Nástrojové oceli používané pro výrobu střížných nástrojů:

- Nelegované uhlíkové.
- Středně legované.
- Vysoce legované.
- Oceli k cementování [2].

Tab. 1. Nástrojové oceli používané pro výrobu střížníků a střížnic [2]

| Typ oceli | Značení oceli dle ČSN | Vhodnost použití |
|---|--|--|
| Ledeburitické a subledeburitické | 19 436, 19 437, 19 438, 19 572, 19 571, 19 581 | Na stříhadla s malým nárokem na houževnatost a dobrými střížnými podmínkami. |
| Nízkolegované | 19 312, 19 713, 19 662 | Vyznačují se velkou rozměrovou stálostí, vhodné pro střížníky. |
| Pro velké tlaky | 19 655, 19 614, 19 662 | Stříhadla vystavená velkým střížným silám a vylamování břitů. |
| Odolné proti rázu | 19 356, 19 421 | Oceli odolné proti velkým rázům. |
| Uhlíkové oceli | 19 221, 19 191, 19 222, 19 192, 19 152, 19 132 | Pro málo namáhaná stříhadla. |
| Odolné proti rázu | 19 733, 19 732, 19 740, 19 452 | Stříhadla vystavená velkým rázům, namáhání v ohybu a tlaku. |

1.1.2 Slinuté karbidy

Používají se hlavně pro funkční části nástrojů pro sériovou a hromadnou výrobu výstřížků z materiálu, které způsobují vysoké opotřebení střížných hran, např. nerezové oceli. Nástroje z těchto materiálů mají i přes vyšší pořizovací náklady, díky vyšší trvanlivosti, kvalitě výlisků a menším nákladům na údržbu, nižší celkové náklady na výrobu jednoho výstřížku ve srovnání s nástroji ocelovými. Mají až dvakrát vyšší pevnost v tlaku než kalená nástrojová ocel, jejich pevnost v ohybu je však asi o třetinu až polovinu nižší. Používají se převážně slinuté karbidy skupiny K. Jedná se o směsi na bázi karbidu wolframu (WC) a kobaltu (Co). Množství kobaltu ovlivňuje houževnatost. Ta je tím vyšší, čím vyšší je obsah kobaltu. Karbid wolframu ovlivňuje tvrdost a odolnost vůči opotřebení, ty jsou tím vyšší, čím vyšší je množství karbidu wolframu. Použitím slinutých karbidů musíme zajistit pouze tlakové namáhání nástroje a nevystavovat jej namáhání tahovému nebo ohybovému, což klade vyšší nároky na pevnost a tuhost nástroje [2].

1.2 Výroba střížného nástroje

Střížníky i střížnice se dají vyrábět konvenčním nebo nekonvenčním obráběním, ale své místo na trhu má i výroba nástrojů pomocí práškové metalurgie.



Obr. 3. Střížník a střížnice firmy Trumpf [5].

1.2.1 Konvenční technologie obrábění

Základní metody konvenčního obrábění je soustružení, frézování (obr. 5), vyhrubování, vrtání, vyvrtávání, vystružování, zahlubování, hoblování, obrážení, protahování a protláčování. Tyto metody jsou charakterizovány použitím nástrojů, které mají definovanou geometrii břitu a představují v dnešní době nejvíce využívané aplikace při obrábění různých strojírenských součástí.



Obr. 5. Frézování [7].

Při výrobě střížných nástrojů se nejvíce uplatňují tyto konvenční metody obrábění:

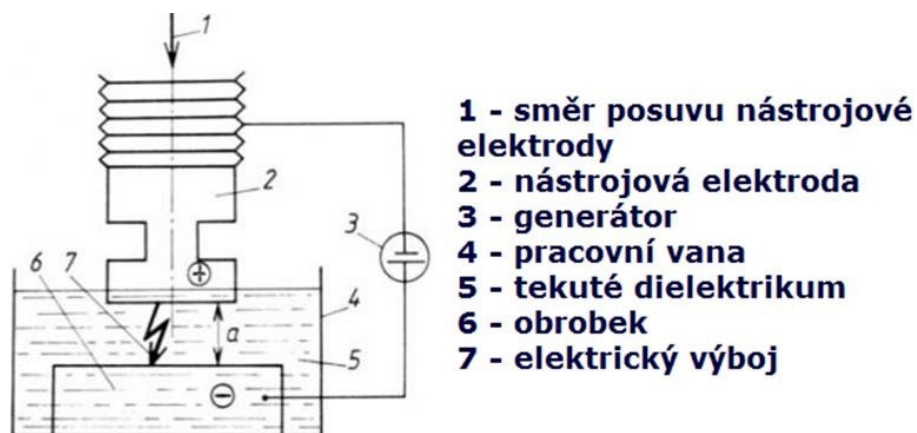
- Frézování.
- Rovinné broušení.
- Tvarové broušení.
- Obrážení [2].

1.2.2 Nekonvenční metody obrábění

V některých případech, např. z hlediska kvality obrábění, tvarové složitosti, obrobitelnosti materiálu nebo z hlediska produktivity práce, nejsou klasické způsoby třískovým obráběním příliš vhodné nebo se nedají vůbec použít. V takovýchto případech lze využít tzv. nekonvenční metody obrábění, do nichž zahrnujeme takové způsoby obrábění, které na rozdíl od třískového způsobu obrábění v převážné míře nepoužívají mechanickou práci pro úběr materiálu.

K úběru materiálu používají elektrických, tepelných, ultrazvukových, chemických a abrazivních jevů nebo jejich vzájemnou kombinaci a to převážně při bez silovém působení na obráběný materiál. Při tomto způsobu obrábění nedochází ke tvorbě třísky. U nekonvenčních metod obrábění není ve většině případů obrobitelnost materiálu limitována jejich mechanickými vlastnostmi, jako je např. tvrdost a pevnost. Jsou vázány především jejich fyzikálními vlastnostmi, jako je např. tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, chemické složení atd.

Mezi nekonvenční metody obrábění používaných při obrábění některých dílů střížného nástroje, patří hlavně elektroerozivní obrábění.



Obr. 4. Princip elektroerozivního obrábění [6].

1.2.3 Prášková metalurgie

Prášková metalurgie je technologie, při které jsou zhotovovány polotovary nebo hotové výrobky spojováním kovů nebo kovů s nekovy ve formě prášků působením tlaku a tepla při teplotách nižších než je teplota tavení alespoň jedné ze spojovaných složek.

Princip výroby střížníků a střížnic pomocí práškové metalurgie je prakticky stejný jako pro jiné výrobky získané touto technologií. V první fázi se vyrobí prášek a následuje jeho úprava. V dalším kroku probíhá lisování prášků a finální spékání čili slinování výlisků. Protože slinuté výrobky často ještě nevyhovují na ně kladeným požadavkům, provádí se u nich ještě konečná úprava [3].

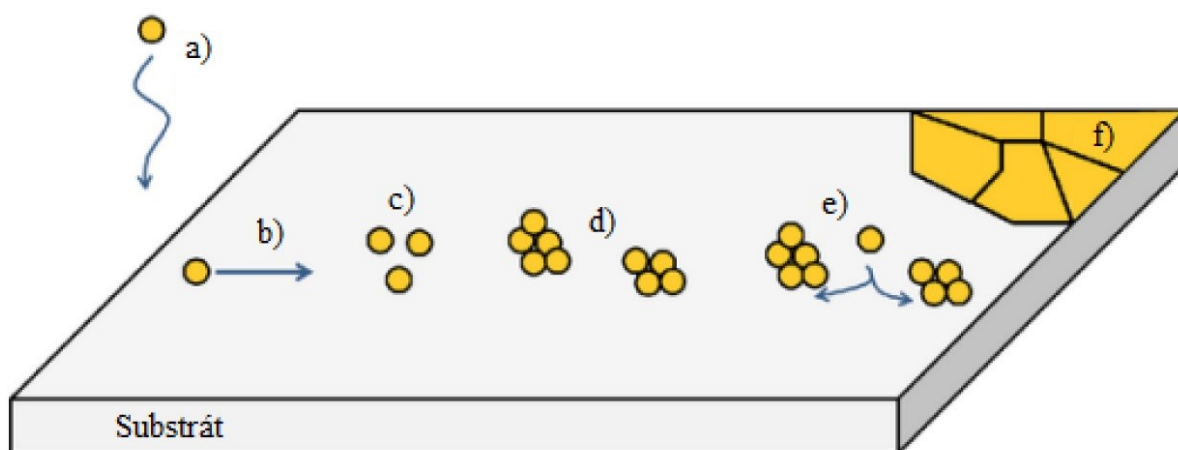


Obr. 6. Příklady výrobků z práškové metalurgie [8].

2 METODY POVLAKOVÁNÍ

Vrstva povlaku vzniká dopadajícími atomy, které jsou na povrchu substrátu (podkladu) zachyceny procesy sorpce (chemické nebo fyzikální). Atomy se pohybují po povrchu substrátu a potom jsou buď zachyceny trvale vazbou nebo jsou zpět uvolněny. Bez ohledu na zvolenou metodu povlakování, se proces depozice povlaku skládá z šesti základních kroků (obr. 7):

1. Atomy povlakujícího materiálu se přesouvají směrem k substrátu, kde probíhá chemická (fyzikální) interakce a usazené atomy jsou slabě připojeny k substrátu.
2. Atomy na substrátu difundují. V závislosti na afinitě mezi atomy a substrátem, vzniká chemická vazba, která je vytvořena mezi nimi.
3. Nyní se začínají shlukovat atomy na několika místech.
4. Tyto shluky se vzájemně zvětšují, což vede ke srůstání povlaku. Tento proces probíhá, pokud dva nebo více zárodků (jader) přichází vzájemně do kontaktu.
5. Ostrůvky přijímají nově přichozí atomy, dokud není pokryt celý substrát. Ostatní zárodky (jádra) vymezují hranice zrn a tvoří tak mikrostrukturu povlaku.
6. Vzniká souvislá vrstva povlaku, která dále roste a zvětšuje svoji tloušťku [9].



Obr. 7. Schéma postupného vzniku povlaku: a) atomy povlakujícího materiálu se přesouvají směrem k substrátu, b) atomy se usazují na substrátu a difundují, c) na povrchu substrátu se začínají shlukovat atomy, d) vznikají první ostrůvky jader, e) nově přichozí atomy tvoří růst ostrůvků, které postupně rostou až do vytvoření f) souvislé vrstvy povlaku [9].

2.1 Metoda povlakování CVD

Jedná se o chemický proces (proto také název Chemical Vapour Deposition - Chemická depozice) a probíhá za vysokých teplot, nejčastěji při teplotách 700–1100 °C a tlaků plynné atmosféry 1-100 kPa.

Povlak se na povrchu substrátu vytváří následkem chemických procesů probíhajících v objemu plazmatu a přímo na rozhraní mezi plazmatem a povrchem substrátu. Touto technologií lze dosáhnout tloušťky povlaku až 13 μm. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi, které se za vysokých teplot rozkládají. Vrstva vzniká na povrchu substrátu heterogenní reakcí. Základním požadavkem přitom je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale přitom prchavou sloučeninu, která by se v důsledku přivedení energie (ohřevem, plazmovým obloukem, laserem) chemicky rozkládala (například kovový halogenid, TiCl_4). Produkty jejího rozkladu jsou pak ukládány na ohřátý povrch povlakovaného předmětu a působí zde jako katalyzátor. Aby proběhla požadovaná reakce (vytvoření vrstvy povlaku), musí být v plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn (N_2 , NH_4 , CH_4).

Metodou CVD lze vytvářet jednovrstvé i vícevrstvé povlaky (vícevrstvé povlaky jsou povlaky, kde se střídají alespoň dva druhy vrstev). Vícevrstvé povlaky se vytvářejí cíleně řízením obsahu plynné směsi v průběhu depozičního procesu.

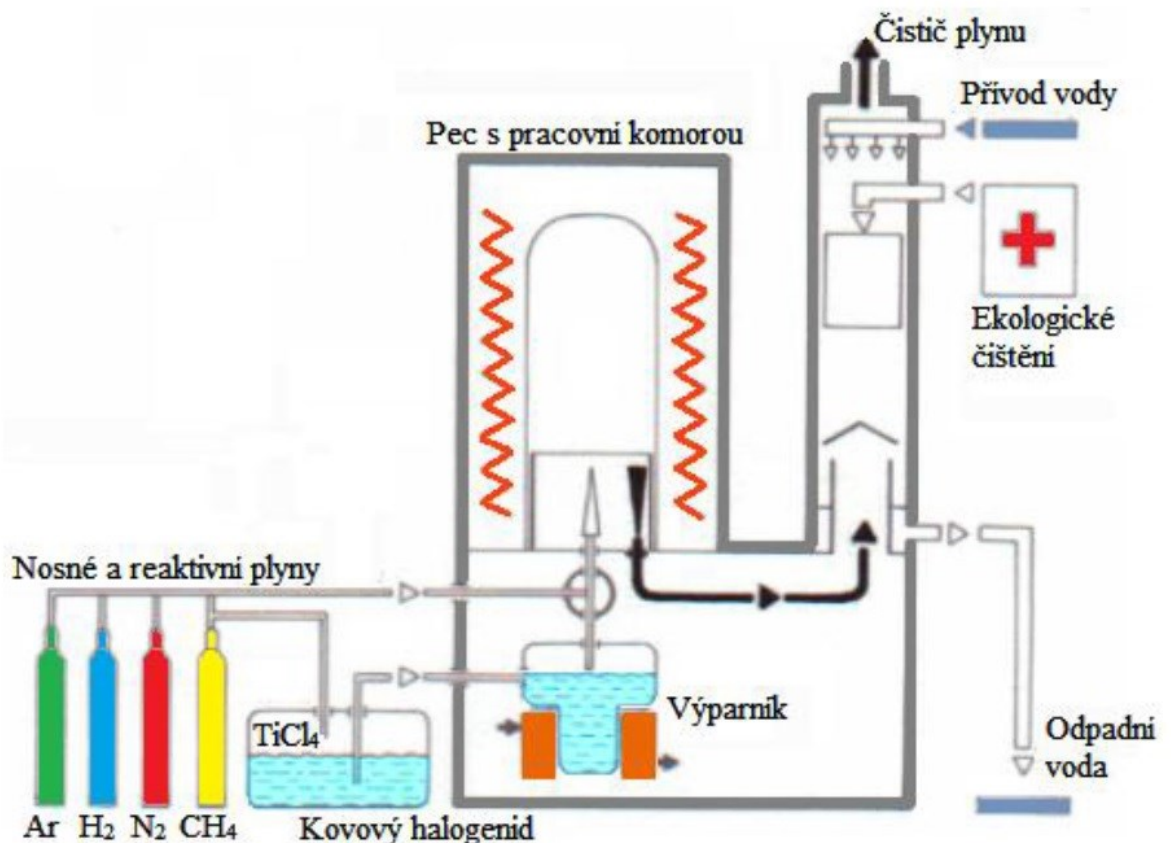
Plynná směs obsahuje vždy i určité procento tzv. nosného plynu (Ar , H_2), který dopravuje plynnou směs k povrchu substrátu. Nosný plyn silně ovlivňuje rychlost vzniku povlaku, jako adhezi k substrátu a v některých případech se účastní i samotné chemické reakce.

Při CVD povlakování se nejčastěji používají dva typy reaktorů:

- Reaktor s horkou stěnou.
- Reaktor se studenou stěnou.

U reaktoru s horkou stěnou je nádoba reaktoru vyhřívána topnými elementy, což má za následek stejnou teplotu jak stěny, tak i substrátu. Nevýhoda tohoto řešení je ta, že se povlak vytváří i na stěně reaktoru a případné chemické reakce par s materiálem vyhříváné stěny by mohly znečistit vlastní povlak substrátu. Z toho důvodu se tento způsob používá pouze pro exotermické reakce (reakce vytvářející teplo), kdy právě vysoká teplota stěny reaktoru zabraňuje vzniku povlaku na jejím povrchu.

Druhý typ reaktoru je používán pro endotermické reakce (reakce spotřebovávající teplo). U tohoto způsobu je vyhříván pouze držák se substrátem. Stěna komory se obvykle chladí vodou, díky čemuž nedochází k nežádoucímu vzniku povlaku na stěně reaktoru a případně znečištění povlaku na substrátu [10].



Obr. 8. Princip povlakovacího zařízení pro metodu CVD [9].

2.1.1 Metoda MTCVD (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition)

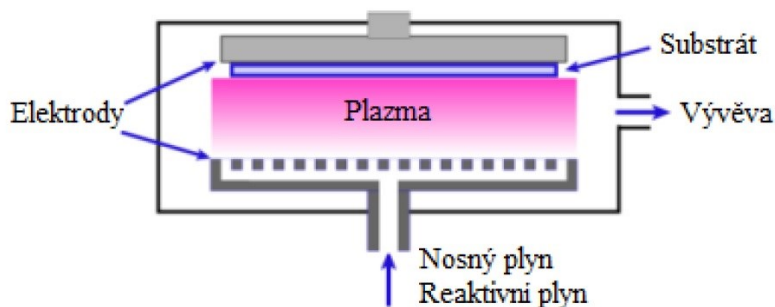
Je to relativně nová metoda povlakování, která částečně řeší nedostatky metody CVD a to příliš vysokou teplotu při povlakování. Vznik je datován k roku 1980. Tato metoda dovoluje nanášení povlaku při teplotách v rozmezí 700 – 850 °C. Další rozdíl je v tom, že zatímco metoda CVD používá plynný metan CH_4 jako zdroj uhlíku a čistý dusík, tak MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH_3CN) nebo též vysoce toxický a hořlavý metylkyanid. Zdrojem titanu je u obou metod chlorid titaničitý (TiCl_4). Rychlost růstu vrstvy TiCN je u metody MTCVD přibližně třikrát vyšší než u klasické vysokoteplotní CVD metody. Substrát, většinou slinutý karbid, se díky vysoké reaktivitě

systemu $\text{TiCl}_4 - \text{CH}_3\text{CN}$ nepodílí na ovlivňování povlaku, tímto je difúze uhlíku z podkladu do povlaku zanedbatelná a proto je prakticky vyloučen vznik křehké eta – fáze mezi povlakem a podkladem. Snížení teploty a rychlejší nanášení při metodě MTCVD se projeví na vyšší houževnatosti základového materiálu a snížení lomů ve struktuře povlaku. Vyroběný povlak využitím metody MTCVD je houževnatější a substráty jsou odolnější proti mechanickým rázům než povlak z metody CVD [11].

2.1.2 Metoda PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)

Metoda PACVD je povlakování nástrojů při mnohem nižších teplotách než u konvenčních CVD technik. Plazmou aktivovaný CVD proces umožňuje snížit teplotu potřebnou pro vznik vrstvy na povrchu substrátu na 470 – 530 °C. Nástroje jsou povlakovány až po konečném zušlechťení na požadovanou tvrdost a v průběhu povlakování nedochází k rozměrovým změnám. Touto metodou lze povlakovat i dutiny. PACVD povlaky se vyznačují extrémně nízkým koeficientem tření – až 0,1.

Zařízení na povlakování metodou PACVD umožňuje jak samotné povlakování, tak i nitridaci a iontové čištění povrchů.



Obr. 9. Schéma metody PACVD [9].

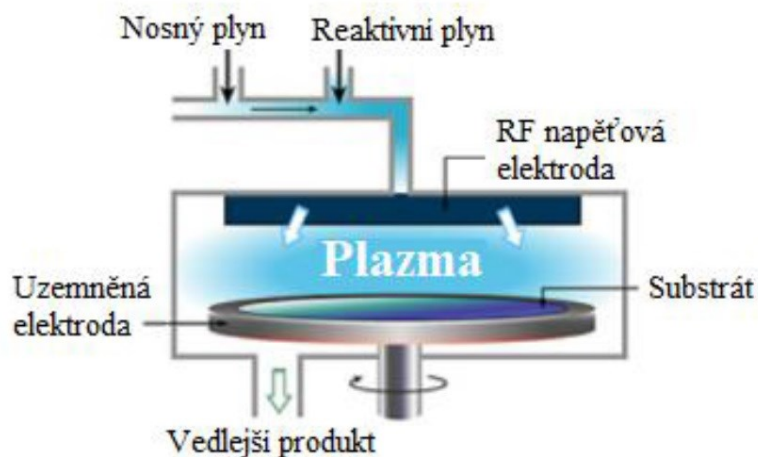
PACVD vrstvy splňují vysoké požadavky na kvalitu, zejména otěruvzdornost, životnost, tvrdost atd. Volba optimální vrstvy je určena zpracovávaným materiálem a pracovními podmínkami nástroje. PACVD vrstvy je zejména možné použít při aplikacích, kde nelze použít technologii CVD z důvodu vysoké teploty povlakování. PACVD povlaky nacházejí přednostní uplatnění zejména při povlakování vysoce přesných a tvarově složitých zušlechťených ocelových nástrojů.

Výhody metody PACVD:

- Několikanásobné zvýšení životnosti nástrojů.
- Metoda PACVD umožňuje provádět nitridaci a povlakování v jednom procesu.
- Metoda PACVD nepotřebuje vysoké vakuum, takže odplynění použitého zařízení je snazší a kratší.
- Zařízení PACVD nepotřebuje rotační části. Povlakované díly nerotují. V důsledku nucené cirkulace plynu v povlakovací komoře se vylučuje homogenní povlak i na velmi složitých nástrojích s dutinami.
- PACVD technologie umožňuje povlakování rozměrných a těžkých kusů až do hmotnosti 1 250 kg [12].

2.1.3 Metody PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition)

Obdobně jako u metody PACVD, tak i u PECVD se nanáší na substráty tenké povlaky, při nižší teplotě než je teplota u standardní metody CVD. Nanesení povlaku je dosaženo pomocí reakčních plynů mezi paralelními elektrodami (uzemněná elektroda a RF napěťová elektroda). Reakční plyn do plazmy rozrušuje právě vazba mezi elektrodami, což znázorňuje obrázek 10. Toto rozrušení má za následek chemickou reakci a povlak je nanesen na substrát. Substrát je umístěn na uzemněné elektrodě, která se zahřívá na teplotu 250–350 °C v závislosti na vlastnostech povlaku. Křemíkový zdroj plynu v kombinaci se zdrojem kyslíku má za následek vznik oxidu křemičitého. Alternativa je pak dusíkový zdroj plynu pro výrobu nitridu křemíku. Obě vzniklé sloučeniny (oxid křemičitý a nitrid křemíku) jsou dielektrické (izolační) materiály, které se běžně používají při výrobě elektronických zařízení k izolaci více vodivých vrstev a kondenzátorů. Tyto vzniklé povlaky se používají k ochraně substrátu před korozí atmosférických prvků [9].

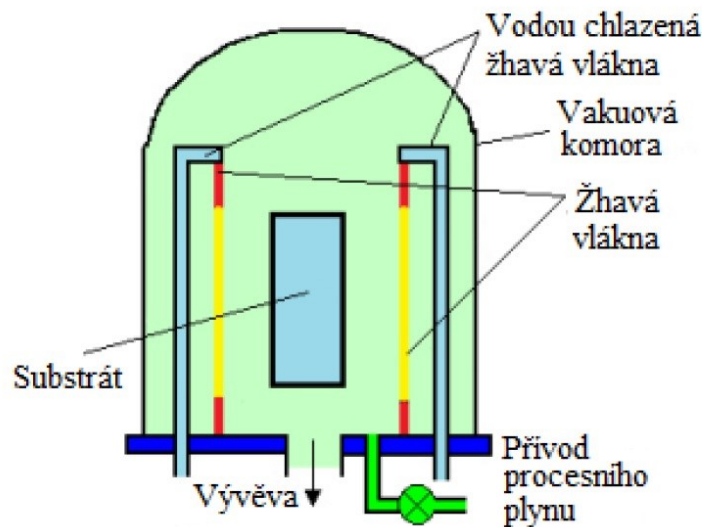


Obr. 10. Schéma metody PECVD [9].

2.1.4 Metoda HFCVD (Hot Filament Chemical Vapour Deposition)

Metoda HFCVD využívá k chemickému rozkladu zdrojových plynů žhavicí vlákno. Tato metoda se používá například pro výrobu diamantových povlaků (DLC). Princip je založen na tom, že atomy uhlíku v plynném stavu se usadí na substrátu v krystalické podobě. Procesní plyn bývá obvykle 1% CH_4/H_2 . Tento plyn se pak přivádí do vakuové komory, kde je plyn aktivován žhavými kovovými vlákny, které jsou obvykle vyrobeny z tantalu. Tyto vlákna se udržují na teplotě 2100 - 2400 °C. Diamantový povlak vzniká na substrátu při teplotě substrátu 900 °C, který je od vláken ve vzdálenosti 5 mm. Obrázek 11 ukazuje schéma povlakovacího zařízení metodou HFCVD. Hlavním benefitem této metody je její celková jednoduchost, tím pádem i cena. Nevýhod je trochu více a to:

- Růstová oblast je omezena jen na 1 cm^2 .
- Materiál žhavených vláken může znečistit povlak.
- Jisté omezení ve výběru plynu kvůli citlivosti vláken na oxidaci [9].



Obr. 11. Schéma povlakovacího zařízení
metody HFCVD [9]

2.1.5 Metoda CVD s lavinovým plazmatickým výbojem (CACVD - Cascade Arc Chemical Vapour Deposition)

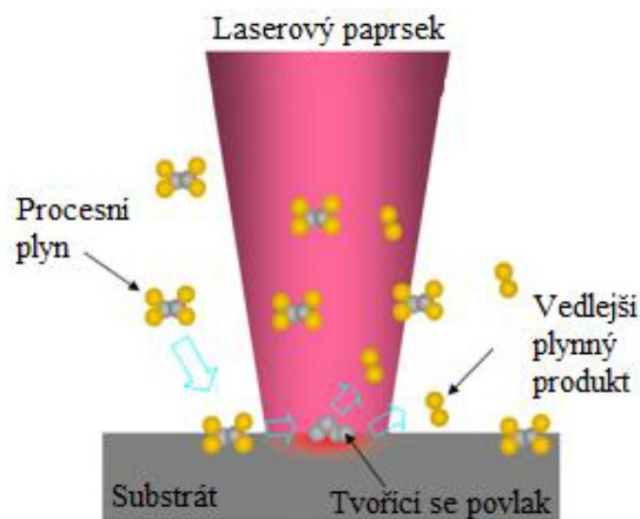
Tato metoda je založená na principu reaktoru, který využívá vlastnosti homogenního sloupce lineárního plazmatického výboje (ve válcové nebo pravoúhlé komoře s délkou více než 1 m). Pracovní tlaky v komoře jsou od 13 Pa až po atmosférický tlak, v plynném prostředí $\text{Ar} - \text{H}_2 - \text{CH}_4$. Držáky substrátu jsou sestaveny tak, aby působily jako virtuální

obal, který udržuje výboj v kanálu s rozmístěnými substráty. Plazmový výboj je tvářen magnetickými poli, která udržují jednotné plazmové prostředí po celé délce komory. Tato metoda umožňuje nanášení diamantových a podobných povlaků na trojrozměrné substráty [13].

2.1.6 Laserem indukovaná CVD metoda (Laser Induced Chemical Vapour Deposition - LICVD, LCVD)

Laserem indukovaná CVD metoda je depozice mikročástic povlaku na substrát s vysokou přesností nánosu.

Na substrát je zaostřen laserový paprsek, který ozařuje povrch substrátu umístěného v pracovní komoře. Tato komora je naplněna pracovním plynem, aby se zvýšila teplota povrchu substrátu. Pracovní plyn se následně absorbuje na vyhřívaném povrchu substrátu, kde dochází k tepelně indukovanému chemickému povlakování substrátu a ke vzniku vedlejších plynných produktů. Tohle názorně popisuje obrázek 12. Laserový paprsek je nositelem tepla, tudíž ohřívá substrát. Plocha vyhřívaného povrchu substrátu, tudíž plocha povlaku, díky laserovému ohřevu, může být řízena s přesností na několik mikrometrů [9].



Obr. 12. Princip metody LCVD [9].

Laserem indukovaná CVD metoda existuje ve dvou variantách – pyrolytická a foto-lytická.

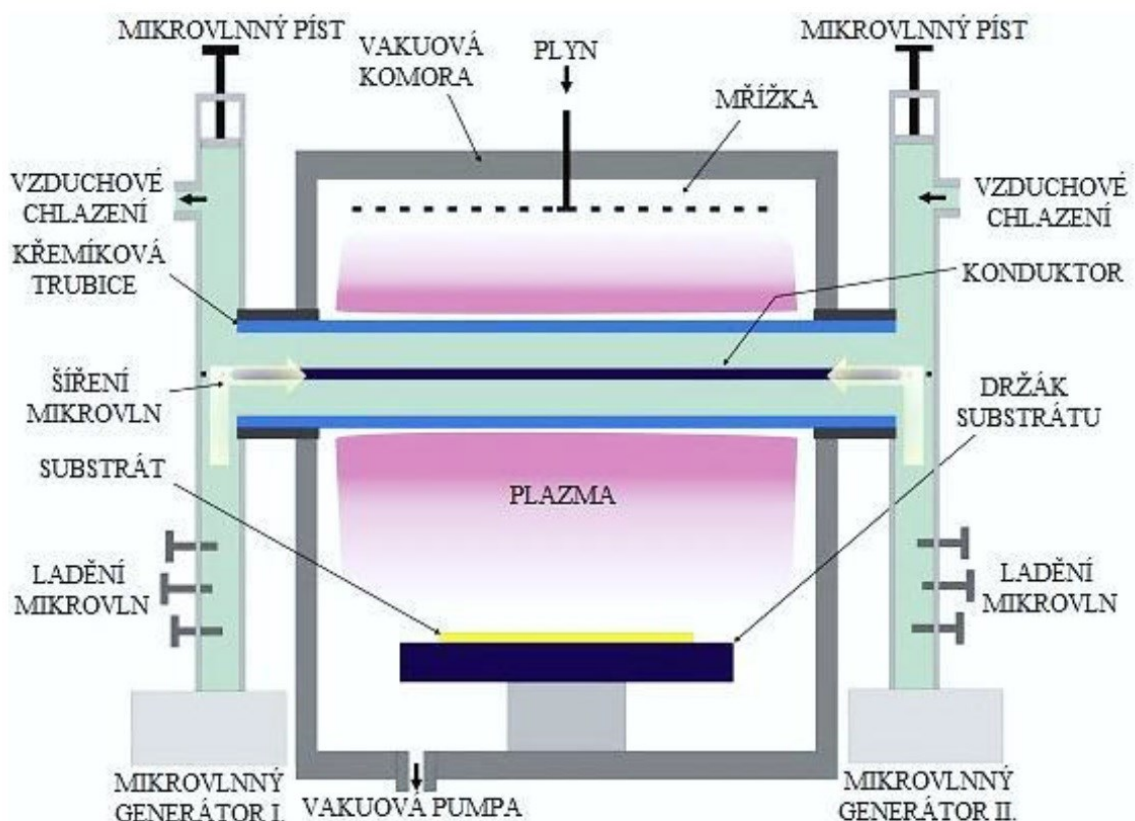
U první varianty (pyrolytické) dopadají laserové paprsky na ohříváný substrát, který zahřívají na vysokou teplotu a společně s molekulami pracovního plynu se na povrchu substrátu tepelně rozkládají a tvoří tak povlak.

U druhé varianty (fotolytické) dopadá na substrát laserová energie, která je přímo absorbována reaktivním plynem pro selektivní rozrušení molekul pracovního plynu.

První varianta (pyrolytická) je výhodnější pro získání dobrých elektrických vlastností, vysoké rychlosti depozice a vysoké čistoty povlaku než druhá, fotolytická varianta. Ovšem u první varianty je teplota substrátu mnohem vyšší než u druhé varianty [9].

2.1.7 Mikrovlnná plazmatická CVD metoda (MicroWave Plasma Chemical Vapour Deposition - MWPCVD)

Parametry (tlak, směs plynu a teplota substrátu) této metody jsou prakticky totožné s metodou HFCVD, stejně tak i růst povlaku. Starý návrh metody MWPCVD je křemíková trubice umístěná uvnitř vlnovodu. Substrát je pak na ohříváči, kde se vytváří plazma (obr. 13) [9].



Obr. 13. MWPCVD reaktor [14].

Nový design MWPCVD metody je změněn tak, že mikrovlny směřují podél vlnovodu a jsou spojeny do komory přes anténu. Mikrovlny procházejí krystalovým oknem do reaktoru. Výhodou nového designu je, že stěny reaktoru jsou z nerezové oceli, čím jsou

nanesené povlaky bez oxidovaného znečištění, které se vyskytovalo při použití trubkového reaktoru. Nerezová komora také umožňuje použití vyšší mikrovlnné energie, oproti konstrukci trubkového reaktoru. Systémy jsou schopny pracovat až do 6 kW, tím je možno docílit růstu až $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Výhodou je absence vlákna, takže lze využívat širokou škálu směsí plynů a také to, že nedochází k žádné kontaminaci rostoucího povlaku. To je obzvláště důležité pro růst vysoce kvalitních diamantových povlaků. Nevýhodou je cena reaktoru vzhledem ke své složitosti [9].

2.2 Metoda povlakování PVD

PVD proces (Physical Vapour Deposition – Fyzikální nanášení, někdy také jako Nanášení odpařením z pevné fáze) se uskutečňuje v prostředí vysokého vakua ($0,1 - 1,0 \text{ Pa}$), při teplotách v rozmezí $150 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$. K povlakování dochází v důsledku kondenzace atomů, případně shluků atomů, které jsou uvolňovány z tzv. terčů. Takto vytvořené povlaky mají obecně menší tloušťku než stejné typy povlaků vytvořené metodou CVD. Vzhledem k vysoké teplotě povlakovaného předmětu u metody CVD se v 80. letech začala prosazovat metoda PVD, která dnes již převládá. Tato metoda byla původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, protože nízká teplota PVD zaručuje, že podklad substrátu nebude tepelně ovlivněn [13].

V dnešní době jsou nejčastěji využívány tři principiálně odlišné PVD technologie. Prvním typem je napařování (obr. 14), kde k uvolnění částic dochází v důsledku působení nízkonapěťového oblouku, laseru, elektronového paprsku nebo indukci. Uvolněné částice jsou ionizovány a reagují s atmosférou komory, která je tvořena inertním a reaktivním plynem (např. Ar a N_2).

Druhým typem je napařování (obr. 14), jehož základním mechanismem je uvolňování částic z terčů (terče = zdroje částic) působením urychlených iontů Ar. Po dopadu na povrch substrátu vytvářejí tenkou ($1 - 5 \text{ } \mu\text{m}$) homogenní vrstvu.

Třetím způsobem je iontová implantace, kde jsou ionizované uvolněné částice urychlovány elektrickým polem směrem k povrchu substrátu, kde dochází k jejich implantaci [9].

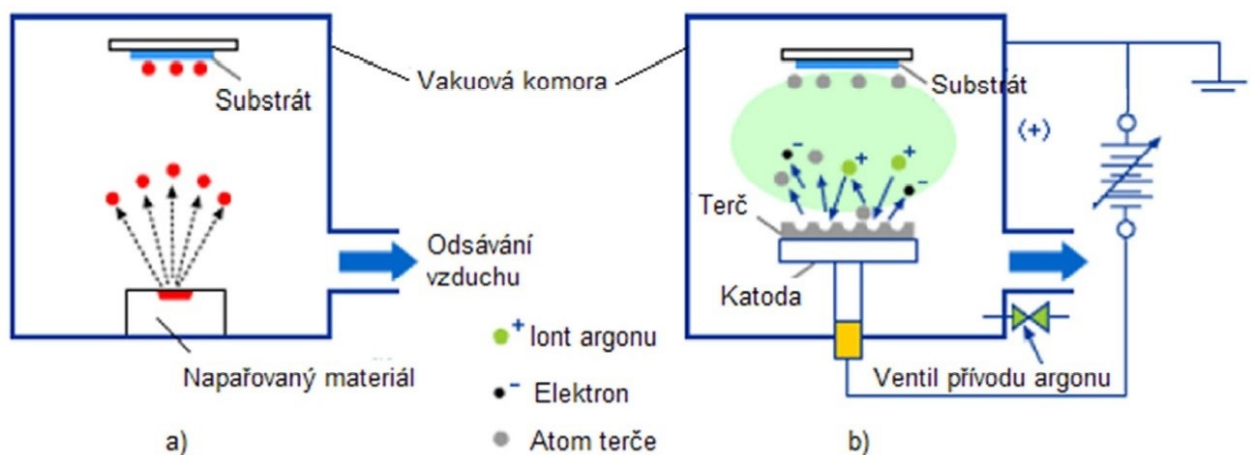
Tab. 2. Porovnání PVD metod napařování a naprašování [16].

| Charakteristika | Napařování | Naprašování |
|---|---|--|
| Rychlost povlakování | tisíce atomových vrstev za sekundu (0,5 $\mu\text{m}/1 \text{ min}$) | jedna atomová vrstva za sekundu |
| Volba materiálu terče | omezená | téměř neomezená |
| Čistota povlaku | dobrá (není plyn, ale vakuum) | možnost začlenění nečistot do povlaku |
| Zahřívání substrátu | velmi malé | při magnetronovém může být zahřívání velké |
| Poškození povrchu | velmi malé | poškození ionickým bombardováním |
| Původní čistota | není možná | snadná |
| Kontrola složení slitiny | malá nebo žádná kontrola | může být přísná kontrola |
| Poškození X-zářením | pouze u elektronového napařování | možné poškození částic |
| Změny zdrojového materiálu | snadné | nákladné |
| Zahřívání povlakujícího materiálu (terče) | velké | malé |
| Navyšování | obtížné | dobré |
| Jednotnost | obtížná | snadná na velkých plochách |
| Cena | nízké náklady | nákladnější |
| Poruchovost | pouze jedna kontrola | mnoho kontrol může být prováděno |
| Počet kontrol | není lehké na kontrolu | několik kontrol |
| Přilnavost | často špatná | vynikající |
| Povrch povlaku | obtížný na kontrolu | kontrola ovlivnění tlaku a teploty substrátu |
| Stínový efekt | velký | malý |

Metoda PVD je ekologicky nejšetrnější metodou depozice vrstev, protože se zde nepoužívají žádné nebezpečné materiály a při procesu depozice se neuvolňují žádné jedovaté nebo toxické látky.

Výhodou je možnost povlakovat i ostré hrany s poloměrem zaoblení pod 20 μm a možnost vytvářet vícevrstvé povlaky z různých typů vrstev. Mohou se kombinovat například tvrdé, ošetrné vrstvy s kluznými vrstvami, čímž je možné docílit delší životnost nástroje.

Nevýhodou všech metod PVD je ale 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 [10].



Obr. 14. Princip metody PVD: a) napařování, b) napařování [15].

2.2.1 PVD - Napařování (Evaporation)

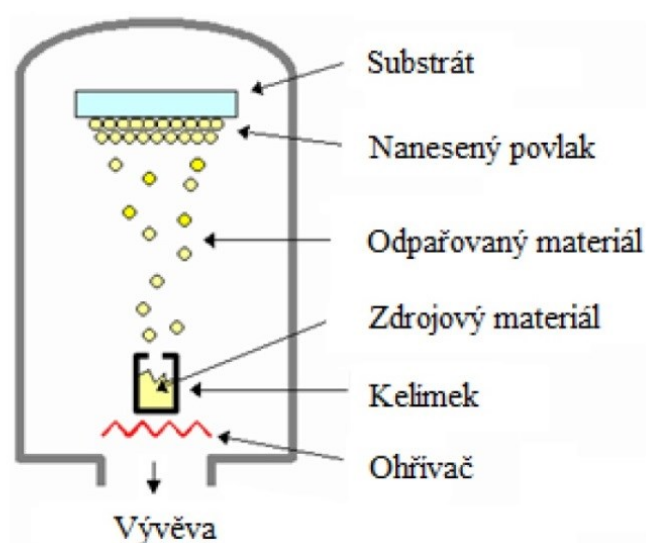
Princip této metody spočívá v odpařování materiálu z terče, který je ohříván různými způsoby. Substrát může být ohříván nebo je připojen na požadované předpětí použitím stejnosměrného nebo střídavého napájení (RF frekvence). Napařování probíhá ve vakuové komoře při tlaku $10^{-3} - 10^{-8}$ Pa. U napařování se setkáváme s pojmem střední volná dráha. Při tomto tlaku je střední volná dráha v porovnání se vzdáleností mezi terčem a substrátem velmi velká (až 10^7 cm). Odpařované atomy se před kondenzací na substrát pohybují po nekolizních drahách, což má za následek vytvoření povlaku s nerovnoměrnou tloušťkou (s rostoucí vzdáleností postupně klesá tloušťka povlaku). Kvůli zmenšení střední volné dráhy atomů je do komory přiváděn nosný plyn (většinou argon) pod tlakem 0,7 - 26,7 Pa. To má za následek, že odpařované atomy provádějí vícenásobné srážky při pohybu směrem na substrát, což vede k vytvoření rovnoměrné tloušťky povlaku.

Zdroje pro odpařování se dělí podle způsobu ohřevu (pro přeměnu z tuhého nebo kapalného stavu do plynné fáze) na odporové, indukční, obloukové, elektronovým paprskem a laserem. Nejjednoduššími odporovými zdroji jsou vyhřívané dráty a kovové fólie různého typu. Jsou obvykle vyráběny z kovů, které mají vysokou teplotu tání (W, Mo, Ta) a nízký tlak par, aby nekontaminovali vytvořený povlak. Pro teploty pod 1000 °C jsou někdy vyráběny z platiny, železa nebo niklu. Množství odpařovaného materiálu je u odporových zdrojů malé (maximálně 1 g), proud se pohybuje v rozmezí 20 - 500 A a odpor je malý, nevyžaduje tak vysoké výkony napájení 1 - 3 kW. Nejvíce používané napařovací PVD metody jsou odporové a obloukové napařování [9].

2.2.2 PVD - Odporové napařování (Resistance Evaporation)

Princip odporového napařování ukazuje obrázek 15. Kelímek je zahříván, dokud se povlakující materiál neodpaří všechen. Atomy odpařeného materiálu z kelímku přilnou na substrát a vytvoří požadovaný povlak. Protože mnoho povlakujících materiálů reaguje s vodou, dusíkem a kyslíkem, tento postup se provádí za vysokého vakua. Vysoká teplota, která je nutná, se získává z odporového ohřivače.

Napařovací kelímek je vyroben ze žáruvzdorného kovu (například molybden, wolfram nebo tantal). Vrstvy povlaků jsou nejčastěji vyrobeny z hliníku, stříbra, chrómu, nitridu titanu nebo oxidu křemičitého. Povlaky vyrobené touto metodou se vyznačují dlouhou životností a rozměrovou přesností [9].



Obr. 15. Schéma odporového napařování [9].

2.2.3 PVD - Obloukové napařování (Arc Evaporation)

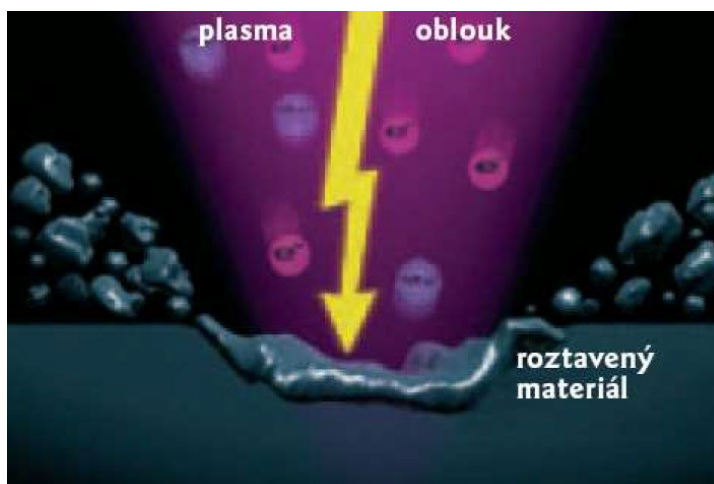
K odpařování materiálu terče se využívá nízkonapěťový oblouk. Napěťový oblouk hoří mezi anodou (vakuovou komorou) a katodou (terčem). Zatímco na anodě hoří oblouk po celé její ploše, na terči hoří pouze bodově. Bodovým hořením je zajištěna vysoká lokální rychlost odpařování a současně i ionizace odpařených částic, která má velmi pozitivní vliv na adhezi povlaku k substrátu. Ionizované částice jsou urychlovány směrem k substrátu záporným předpětím, které je na něj přiloženo.

Teplota substrátu bývá 400 - 550 °C a tlak ve vakuové komoře 0,5 - 3 Pa. Katoda při odpařování jako celek zůstává pevná, taví se jen v místě hoření oblouku zvaném katodová skvrna (obr. 16). Její velikost je obvykle kolem 10 μm. Teplota v místě katodové skvrny dosahuje hodnoty kolem 15000 °C a závisí na velikosti elektrického proudu, který bývá 50 až 450 A. Při takové teplotě není problém vypařit prakticky jakýkoli materiál.

Z důvodu požadavku na kvalitnější tvorbu vrstev a efektivnější využití terče je možné náhodný pohyb katodové skvrny usměrňovat použitím magnetického pole. Touto metodou lze však odpařovat pouze elektricky vodivé materiály.

Ve vytvořeném povlaku je nežádoucím jevem přítomnost makročásteček. Makročástečky jsou mikroskopické kapičky odpařovaného materiálu, zhoršující některé důležité vlastnosti, jako jsou např. drsnost povrchu, koeficient tření a odolnost proti korozi. Dopadu makročásteček lze zabránit použitím elektromagnetického filtru, který ale výrazně zpomaluje proces povlakování. Je proto vhodný pouze pro speciální aplikace.

Délka procesu je u obloukového odpařování poměrně krátká a pohybuje se řádově v hodinách. Díky tomu patří v současné době k nejpoužívanějším metodám vytváření vrstev [10].



Obr. 16. Schéma katodové skvrny [10].

Mezi výhody obloukového napařování patří:

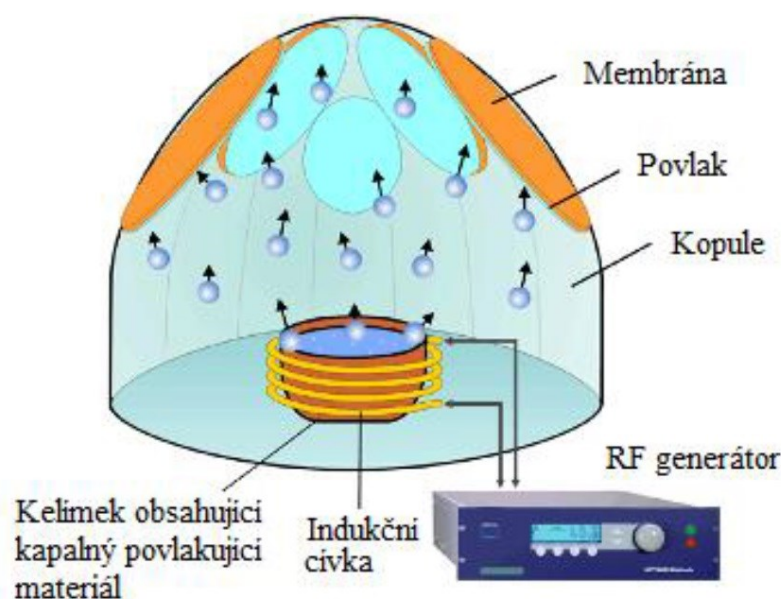
- lze odpařovat všechny elektricky vodivé materiály,
- plazmový oblouk efektivně ionizuje odpařovaný materiál i reaktivní plyny,
- ionizovaným odpařeným částicím může být před dopadem na substrát udělena vysoká energie,
- nízké zatížení tepelnou radiací (katodická oblouková depozice),
- reaktivní plyny jsou aktivovány v plazmě (zlepšení procesu depozice),
- znečištění terče je mnohem menší než u reaktivního napařování.

Nevýhody:

- právě ono odpařování pouze elektricky vodivých materiálů,
- vysoké zatížení tepelnou radiací (anodická oblouková depozice),
- roztavené kapénky (makročástice) vyvržené z katody se mohou dostat do povlaku a vytvořit na jeho povrchu kuličky [10].

2.2.4 PVD - Indukční napařování (Induction Evaporation)

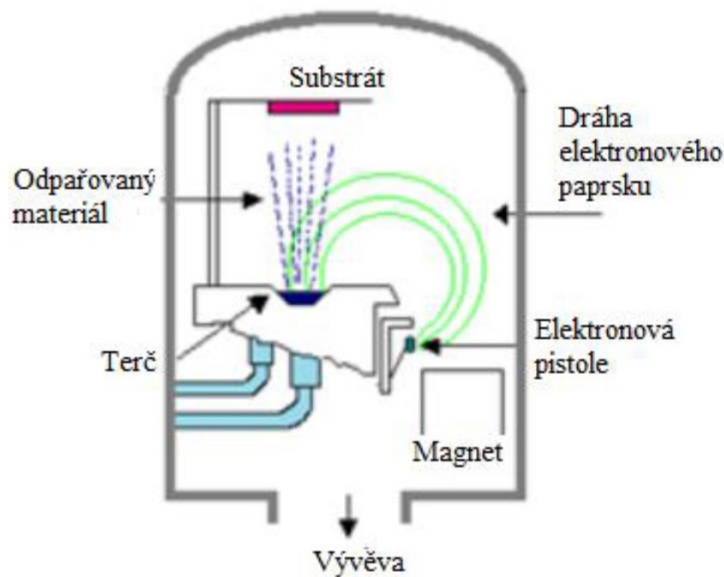
Tato metoda se opět provádí za použití vakua. Membrány jsou umístěny uvnitř kopule, pod nimi se nachází kelímek, který má uvnitř tekutý povlakující materiál. Působením silného vysokofrekvenčního proudu se kelímek zahřeje na požadovanou teplotu a následně se odpaří atomy z kelímku. Působením vakua se povlakující atomy pohybují směrem od kelímku přímo k substrátu. Obrázek 17 názorně popisuje děj indukčního napařování [9].



Obr. 17. Schéma indukčního napařování [9].

2.2.5 PVD - Napařování elektronovým paprskem (Electron Beam Evaporation)

Odpařovaný materiál vzniká vlivem bombardování terče (materiálu) elektronovými paprsky, které mají vysokou energii. Elektronové paprsky vznikají z elektronové pistole, což je v podstatě katoda a takto vzniklé elektrony jsou urychleny směrem k terči, což je anoda. Pro řízení trajektorie elektronů na terč se často používá magnetické pole. Touto metodou se dají deponovat i materiály s vysokým bodem tání (W, Ta, C a další) [9].



Obr. 18. Schéma napařování elektronovým paprskem [9].

2.2.6 PVD - napařování laserovým paprskem (Laser Beam Evaporation)

Tato metoda je podobná předchozí metodě s tím rozdílem, že materiál je odpařován pomocí laserového paprsku. Laserové odpařování má několik omezení:

- pro přenos paprsku, od laseru umístěného mimo vakuovou komoru na odpařovaný materiál uvnitř komory, je třeba použít složitý přenosový a zaostřovací systém,
- ne vždy lze najít vhodnou vlnovou délku, která by byla kompatibilní s absorpčními vlastnostmi odpařovaného materiálu,
- malá velikost povlakované plochy vyplývající z malého bodu, na který dopadá laserový paprsek a velmi nízká energetická účinnost,
- rozstříkací efekt vytváří mikročástice a ty snižují kvalitu povlaku.

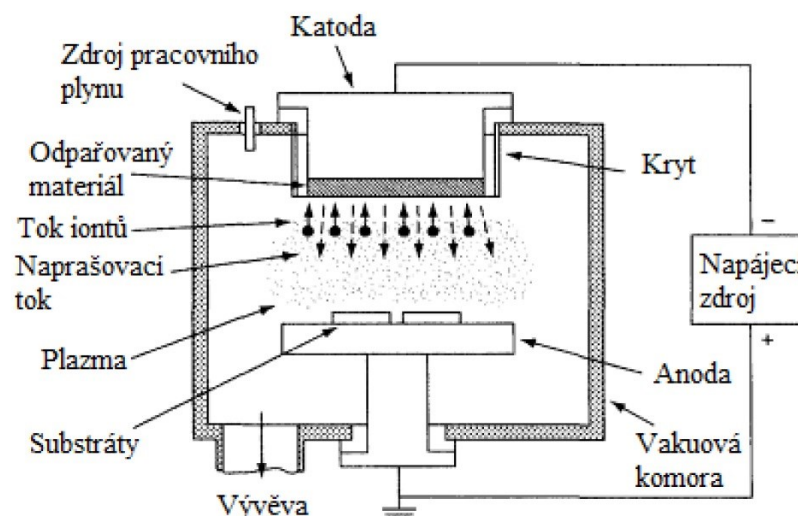
K hlavním výhodám laserového odpařování patří produkce složek s vysokou energií, které zlepšují kvalitu povlaku a vynikající přesnost stechiometrie mezi terčem a povlakem [13].

2.2.7 PVD - Naprašování (Sputtering)

Při naprašování jsou povlakované díly nejprve zahřáty a následně iontově leptány „bombardovány“ ionty argonu. Takto upravený povrch je čistý a zbavený jakékoliv atomové kontaminace, což je velice důležité pro přilnavost povrchu. Následně se na zdrojový materiál (terč) přivede záporné elektrické napětí. Elektrický výboj v plynu, který se takto zapálí, vytvoří kladné argonové ionty, které se urychlují ve směru k nanášenému materiálu a rozprašují ho. Naprašování lze provádět ve vakuu nebo při nízkém tlaku ($< 0,6$ kPa), přičemž odprašované částice nekolidují s plynem (jeho molekulami) mezi terčem a substrátem. Proces lze ovšem provádět i při vyšším tlaku plynu ($0,6 - 2$ kPa), kde energetické částice, které jsou odprašovány z terče, jsou „ohřívány“ kolizemi s plynnou fází, než se dostanou k povrchu povlakovaného materiálu. Terč při procesu naprašování není nutné ohřívat na vysokou teplotu, jako je tomu u povlakování pomocí odpařování. Výsledkem tohoto procesu je tenká soudržná vrstva požadovaného složení a struktury [17].

2.2.8 PVD - Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody

Je nejjednodušší naprašovací proces. Terč je zapojen jako katoda a držák, ve kterém jsou uloženy substráty, jako anoda. Terč slouží jako zdroj částic a jako zdroj sekundárních elektronů, které udržují doutnavý výboj. Pro principiální jednoduchost a relativní snadnost výroby terčů ze širokého spektra materiálů, je tato metoda poměrně rozšířená. Její jednoduchost je však do jisté míry vykoupena některými nedostatky. Těmito jsou např. nízká rychlost depozice a nežádoucí ohřev substrátu v důsledku bombardování odprašenými částicemi.



Obr. 19. Schéma naprašování doutnavým výbojem rovinné diody [9].

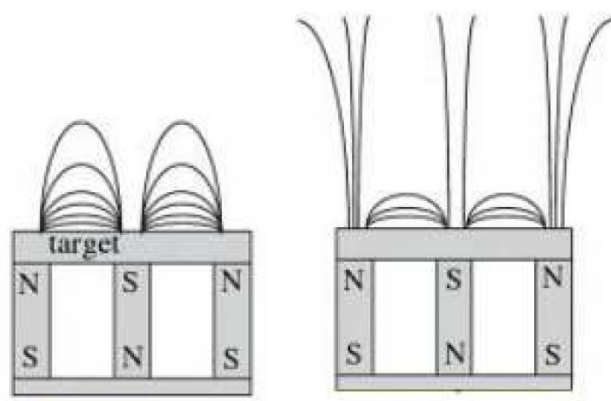
Rychlost depozice lze ovlivňovat vzdáleností substrátu od terče, tato bývá nejčastěji v rozsahu 50 – 100 mm. Dále tlakem pracovního plynu a materiálem terče. Tlak plynu ale nesmí být zvýšen nad určitou mez. Začalo by totiž docházet k jevu, kdy plyn naprašované atomy rozptyluje a snižuje tak rychlost depozice.

Rychlost depozice lze také zvyšovat použitím vyšší hustoty výkonu na povrchu terče. Musí být ale zajištěno adekvátní účinné chlazení terče. To bývá obvykle realizováno vodní chladicí soustavou [10].

2.2.9 PVD - Magnetronové naprašování (Magnetron Sputtering)

Naprašování pomocí magnetronu dosahuje relativně velké rychlosti a oblasti depozice a menšího teplotního zatížení substrátu. Magnetronové naprašovací zdroje mohou být definovány jako diodová zařízení, v nichž je užito magnetického pole k formování elektronových pastí.

Existuje mnoho konfigurací magnetronů, například rovinné nebo cylindrické (válcové). 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, o síle až pár set gaussů, působí pouze na elektrony v plazmě (ionty neovlivňuje). Zachycené elektrony postupují směrem k anodě a podílí se na kolizích. Dle síly vnějších a vnitřních magnetů lze magnetrony rozdělit na vyvážené (stejná síla magnetů) a nevyvážené (většinou silnější vnější magnety) [17].



Obr. 20. Vyvážený a nevyvážený magnetron [17].

Použití nevyváženého magnetronu vede 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

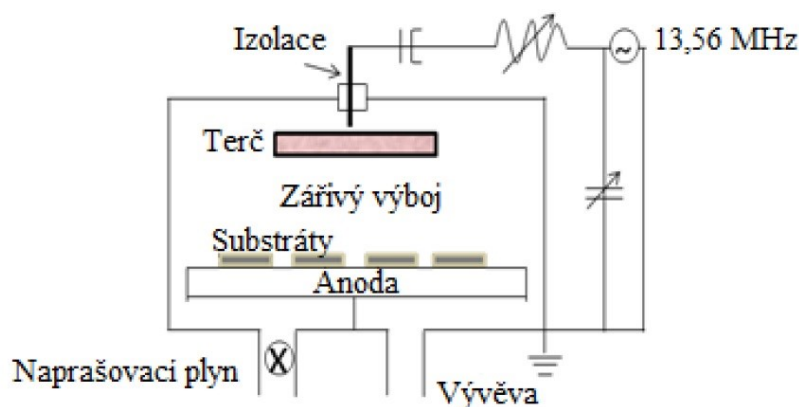
a produkují vyšší počet iontu a elektronů, které značně zvýší iontové bombardování substrátu, což je vyžadováno u tvrdých povlaků.

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.

2.2.10 PVD - Radiofrekvenční naprašování (Radio Frequency Sputtering)

Specifikum tohoto nanášení je v tom, že se používá terč z nevodivého materiálu, ze kterého nelze získávat materiál přiložením stejnosměrného proudu, v důsledku akumulace elektrického náboje na jejich povrchu. Využívá se zde vysokofrekvenčního signálu (obvykle 13,56 MHz), kterým je vybudena plazma. V první části se zapálí výboj na terči, ve druhé části je výboje zhasen.

Hlavní nevýhodou u této metody naprašování je snížení povlakovací rychlosti v důsledku nedostatku sekundárních elektronů pro ionizaci plynu, nákladný vysokofrekvenční zdroj a ladění systému pro spojení střídavého potenciálu plazmy [13].

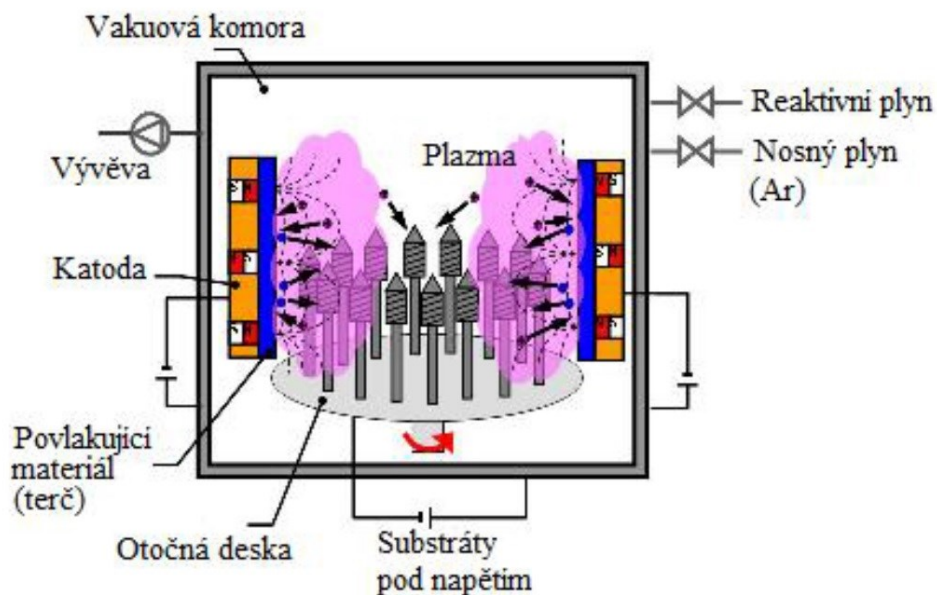


Obr. 21. Schéma radiofrekvenčního naprašování [9].

2.2.11 PVD - HIPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering)

Velice silné magnetronové naprašování nám dává další možnost povlakování metodou PVD. Tato metoda je kombinací výhod magnetronového naprašování s výhodami metod vysoké ionizace (obloukové naprašování). Výsledkem je výborně přilnavý, hustý a velmi hladký povlak. Metoda HIPIMS je vhodná pro leptání. Využívá vysokého výkonu až 8 MW. Atomy naprašované metodou HIPIMS vstupují do substrátu, čímž vzniká hustý

sloupcový povlak se silnou přilnavostí. Tato metoda je podstatně pomalejší než ostatní metody naprašování [9].



Obr. 22. Schéma metody HIPIMS [9].

2.2.12 PVD - Naprašování iontovým paprskem (Ion Beam Sputtering)

Touto metodou zajistíme vynikající adhezi, vysokou čistotu povlaku a velmi nízký ohřev substrátu.

Iontový paprsek, o vysoké energii, je vytvořen v nezávislém zdroji a je namířen na terč z požadovaného materiálu. Zdrojem iontového paprsku může být inertní ale i reaktivní plyn. Substrát zachytává složky odprášené z terče. Ionty ze zdroje jsou namířeny na terč a odprášený materiál se ukládá na substrátu ve formě tenkého povlaku (odprašování iontovým paprskem). Nebo jsou ionty ze zdroje nasměrovány na substrát, který je povlakován materiálem generovaným nějakým nezávislým způsobem (depozice za asistence iontového paprsku).

Výhody této metody naprašování jsou:

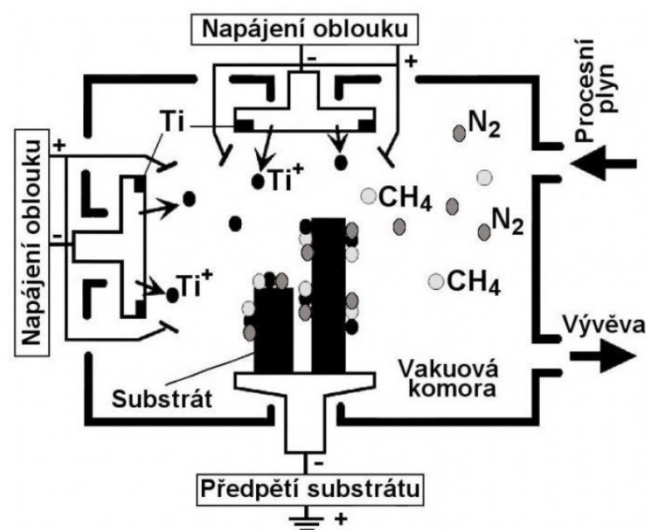
- lze odprašovat a ukládat prvky, slitiny, dokonce i chemické sloučeniny,
- velmi nízké zatížení tepelnou radiací,
- terč (materiál) a substrát mohou být umístěny blízko sebe,
- depoziční komora může mít malý objem.

Nevýhody:

- intenzita naprašování je ve srovnání s intenzitou tepelného odpařování nízká,
- většina energie dopadající na terč se mění v teplo, které se musí odvádět,
- v některých případech je v plazmě aktivován znečišťující plynná kontaminace,
- u reaktivního naprašování je nutné řízení složení plynné atmosféry,
- velké vnitřní napětí v povlaku [13].

2.2.13 PVD - Iontová implantace (Ion Implantation)

Látka určená k vytváření povlaku se do plynného skupenství převádí fyzikálním procesem (odpařování či odprašování). Proces deponování se odehrává ve vakuové komoře při tlacích atmosféry 0,01 až 10 Pa. Jako atmosféra komory se pro prvotní proces čištění obvykle používá inertní plyn (většinou argon). Po procesu čištění jsou do komory přivedeny reaktivní plyny (N_2, O_2, CH_4) určené k vytváření chemických sloučenin s materiálem terče [10].



Obr. 23. Schéma nanášení povlaku TiCN obloukovou iontovou implantací [14].

Substrát je zapojen jako katoda a terč jako anoda. Povrch substrátu je bombardován urychlenými ionty, jejichž energie je úměrná zápornému předpětí, které je přiloženo na substrát. Velikost předpětí se v průběhu povlakovacího procesu mění podle potřeby. Před samotným povlakovacím procesem je na substrát přivedeno záporné předpětí (kolem 1000 V), čímž dojde ke vzniku elektrického výboje, který ionizuje částice plynné atmosféry a v dalších fázích i oddělené částice terče. Mezi substrátem a terčem je tím vytvořeno silné

elektrické pole, jehož účinek udílí iontům plynu dostatečnou energii na to, aby působily na povrch substrátu čistícím účinkem. Po očištění a zahájení povlakovacího procesu je napětí sníženo na 50 až 100 V. Nižší elektrický potenciál má za následek oslabení elektrického pole, které již iontům neudílí tolik energie. Energie však stále dostačuje na to, aby dopadající ionty plynu odprašovaly z povrchu substrátu během růstu vrstvy hůře vázané atomy povlaku. Dopad iontů během depozičního procesu má za následek výrazné zlepšení vlastností vzniklé vrstvy. Jde zejména o zlepšení schopnosti adheze k povrchu substrátu a zvýšení tvrdosti.

Iontovou implantací je možno nanášet povlaky rozmanitého složení s vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Díky nízkým teplotám substrátu (200 až 450 °C), v průběhu depozičního procesu, je možné povlakovat i tepelně zpracované materiály.

Výhody iontové implantace:

- přivedení velkého množství energie do povrchu vznikajícího povlaku,
- odstranění kontaminované vrstvy na povrchu substrátu bombardováním částicemi s vysokou energií,
- přesně definované chemické složení povlaku,
- rovnoměrný průběh procesu a s ním spojený dokonalý růst vrstvy povlaku,
- vlastnosti povlaku jsou méně závislé na úhlu dopadu částic deponovaného materiálu než u metod naprašování nebo napařování,
- vynikající adheze povlaku k substrátu,
- vysoká hustota povlaku,
- možnost snížení teploty substrátu pod 160 °C,
- široký rozsah podkladových i deponovaných materiálů (nejčastěji se jedná o povlak TiN, dále lze vytvořit povlaky TiCN, TiAlN, TiAlVN, CrN, CrAlN, TiZrN, TiN/NbN).

Nevýhody iontové implantace:

- je třeba řídit mnoho procesních parametrů,
- může dojít k nadměrnému ohřevu materiálu,
- za určitých podmínek mohou bombardující atomy plynu zůstat zachyceny v rostoucím povlaku,
- průnik svazku do povrchu je prakticky bodový, proto pokud chceme implantaci na větší plochu musí být svazek rozmítán, což představuje značnou komplikaci v zařízení [10].

2.2.14 Tetrabond implantace

Technologie založená na fyzikální depozici par pomocí obloukové metody (vychází z metody PVD). Díky posílenému oblouku je možné ukládat extrémně tvrdé vrstvy. Vytváříme zde povlak z nehydrogenovaného diamantu, který je tvrdší než obvyklý diamant (DLC – z anglické zkratky „diamantu podobná vrstva“). Při procesu se teplota pohybuje pod 150 °C, čímž je postup zkrácen o nutnost chladit. Tvrdost vytvářeného filmu se pohybuje v rozmezí 70 až 90 GPa, což je zhruba srovnatelné s diamantovým povrchem vytvořeným CVD metodou. Zhotovený povlak nabývá obvykle tloušťky od 0,4 do 1,5 μm. Doba depozice jednoho cyklu bývá kolem tří hodin, což v porovnání s diamantovým povlakem CVD, kde cyklus probíhá více než osm hodin, je nesrovnatelně menší [14].

3 ZÁKLADNÍ DRUHY POVLAKŮ

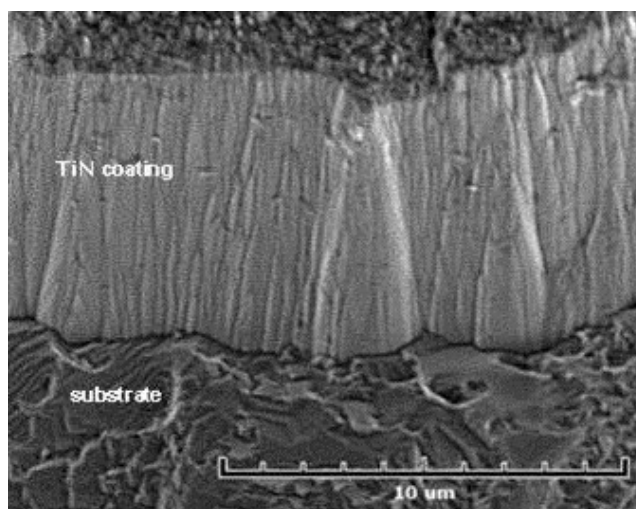
Historie povlakování, jako sériový proces, začala koncem 60. let 20. století. Jako každá technologie má svůj rozvoj, tak i povlakování se postupně vyvíjelo a stále vyvíjí.

3.1 Jednovrstvé povlaky

Obrovská výhoda těchto povlaků je rychlost povlakování a cena. Při výrobě jsou všechny terče v povlakovací komoře odkryty, a proto je růst povlaku velmi rychlý.

Mezi nejstarší povlaky patří TiN (nitrid titanu – obr. 24). Je to velmi univerzální povlak žluté barvy. Sytost této žluté barvy určuje množství dusíku v povlakovací komoře. Tvrdost se pohybuje mezi 20 – 25 GPa. Podobné vlastnosti má povlak TiC (karbid titanu), který je s nitridem titanu izomorfní a liší se pouze jinou mřížkovou konstantou. Barva tohoto povlaku je kovově šedá.

Nevýhoda těchto dvou povlaků je v tom, že vlivem jejich izomorfologie, dochází od teplot 500 °C k oxidaci a přeměně na TiO. Vlivem této přeměny dochází k odlupování povlaku od substrátu [13].

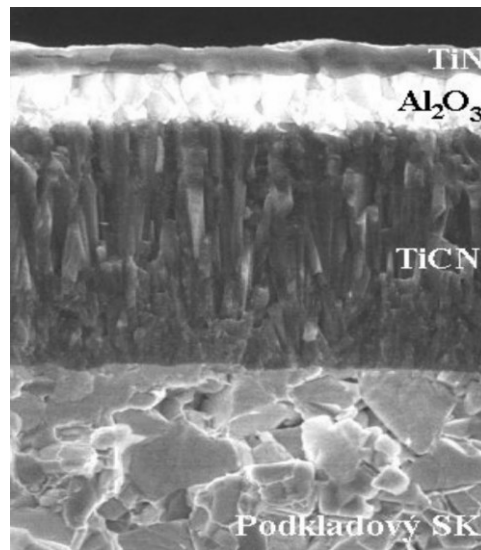


Obr. 24. Jednovrstvý povlak TiN [19].

Aby se tato nízké tepelná odolnost alespoň částečně odstranila, přidává do k těmto povlakům Al a vzniká TiAlN popř. AlTiN (záleží podle množství Al). Takto vzniklé povlaky mají vyšší tvrdost (25 – 33 GPa) a snášejí teploty do 800 °C. V případě zvyšování Al se snižuje tvrdost, ale roste odolnost proti oxidaci. Další alternativou jednovrstvých povlaků jsou povlaky na bázi CrAlN popř. CrAlSiN. Tyto povlaky se používají převážně na obrábění neželezných kovů. Jejich tvrdost přitom dosahuje více jak 35 GPa a jsou schopny odolat teplotám překračující 800 °C [13].

3.2 Vícevrstvé povlaky

Jedny z prvních vícevrstvých povlaků obsahovaly dvě až tři vrstvy s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Některé se využívají dodnes. Nanášení těchto vrstev je obvykle řazeno dle adhezních vlastností jednotlivých povlaků, kde je jako první nanášena vrstva s nejlepší přilnavostí. U výsledné struktury je zejména požadována vysoká tvrdost, oxidace za zvýšených teplot a otěruvzdornost. Často používané struktury k tvorbě povlaku bývají TiC, TiN, TiCN, TiAlN, Al₂O₃, apod. [14].



Obr. 25. Vícevrstvý povlak
TiN – Al₂O₃ – TiCN [20].

Nejpočetnější povlaky mohou počítat přes deset vrstev a v zvláštních případech i mnohem více. Přechody mezi vytvářenými vrstvami nebývají natolik zřetelné jako u povlaků s menším počtem. Například na obrázku 26 je zobrazen extrémních 62 alternujících vrstev TiN - TiCN. Tento konkrétní povlak je zvláště odolný proti šíření trhlin [14], [20].

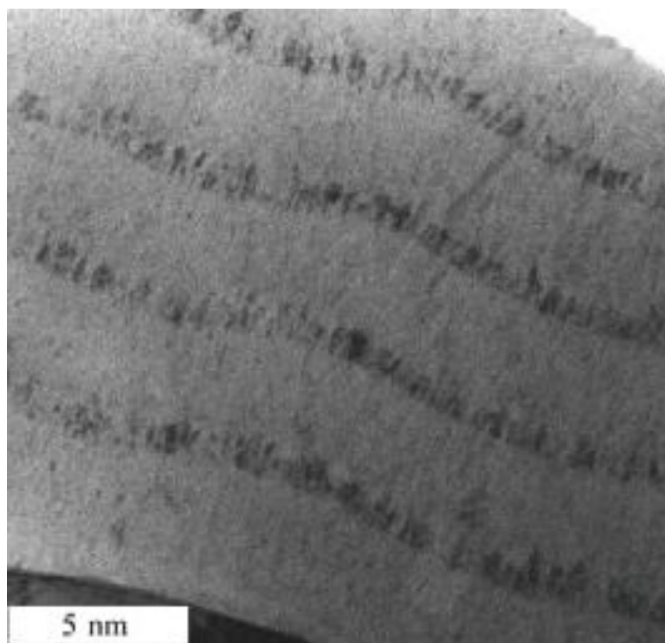


Obr. 26. Multivrstevný systém TiN – TiCN [20].

3.2.1 Nanostrukturní vrstvy

Záměrem tvorby těchto vrstev je vytvoření soustavy velmi tenkých povlaků s tloušťkami odpovídajícím atomárním mřížkám. Při dodržení podmínek přesných vrstev o konstantních tloušťkách se mění krystalografická struktura jednotlivých vrstviček (tloušťek 3 -10 nm) a vzniká celistvý povlak s výrazně vyšší tvrdostí.

Dosažení takovýchto nanovrstev je možné jen při procesu nanášení tvrdých povlaků za podmínky rotace substrátu. Při výrobě není možné v současné době vytvářet nanovrstvy na nástrojích s různými složitými tvary a rozsáhlými rozměry. Většina současných povlakovacích zařízení neumožňuje změnu složení vrstev během jednoho procesu z důvodu uspořádání odprašovacích elektrod [14].



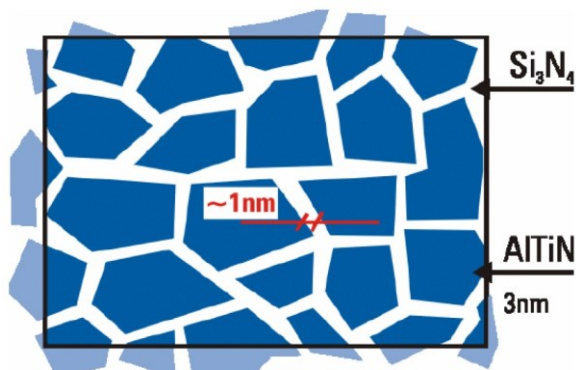
Obr. 29. Nanovrstva [22].

3.2.2 Nanokompozitní vrstvy

Tyto vrstvy jsou nanokrystalický kompozit, který je vytvořen minimálně dvěma složkami materiálu. Jedna z těchto složek musí být krystalický a přitom tyto složky nesmí být rozpustné ve vzájemném styku. Jemnozrný povlak má přínosný vliv na tvrdost [18].

Příkladem vrstev jsou (Ti, Si, Al) N, které tvoří nanokrystaly (Ti, Al) N s velikostí zrn pohybující se okolo 5 nm umístěné v amorfni matrici Si_3N_4 (obr. 30). Tvrdost u takto

vytvořených materiálů dosahuje 40 až 50 GPa s neměnicími se vlastnostmi až do teplot přesahujících 1100 °C [14].



Obr. 30. Schéma nanokompozitní struktury AlTiN – Si₃N₄ [10].

3.2.3 Gradientní vrstvy

Tenké vrstvy aplikované na povrch podkladového materiálu, které upravují výsledné vlastnosti nanášeného povlaku. V mnoha průmyslových aplikacích jsou využívány k dosažení lepšího spojení substrátu a nanášeného povlaku. Gradientní vrstvy se dají rozdělit dle funkčního použití na houževnaté povrchy a odolné proti opotřebení.

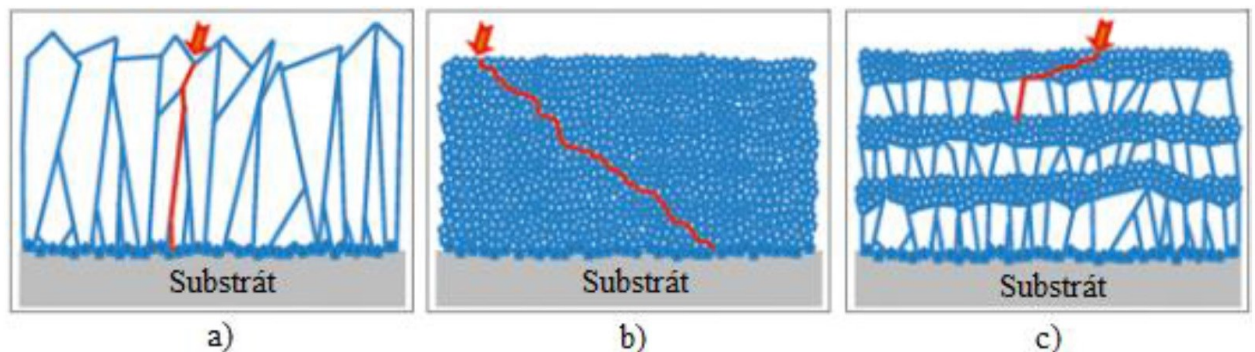
Houževnatého podkladu se docílí při snížení obsahu kubického karbidu wolframu s plošně středěnou mřížkou (fcc) v povrchové vrstvě substrátu nebo jej lze obohatit kobaltem. V případě požadavku na tvrdý základ se využívá opačného procesu, kde zvyšujeme v gradientní vrstvě obsah kubického WC s fcc mřížkou nebo snižujeme obsah Co.

Tyto vrstvy se upravují před vlastním procesem povlakování (CVD nebo PVD). V závislosti na druhu a způsobu nanášení povlaku byly vyvinuty různé typy povrchových úprav jako například leptání slinutého karbidu z důvodu zabránění reakce kovového pojiva s fází na povrchu [14].

3.2.4 Multivrstvy

Je založen na principu pravidelného střídání dvou typů vrstev s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi (tloušťky jednotlivých vrstev jsou přitom velmi malé, kolem 10 nm). Fyzikální vlastnosti výsledně vzniklé multivrstvy jsou pak výrazně odlišné od vlastností homogenní monovrstvy stejného průměrného složení. Výhodou je schopnost odklánět a zpoma-

lovat šíření trhliny směrem od povrchu povlaku k substrátu (obr. 27), tuto výhodu mají také povlaky s nanokrystalickou strukturou a povlaky s vysokým zbytkovým napětím [9].



Obr. 27. Šíření trhliny: a) jednovrstvý povlak; b) nanokrystalický povlak; c) multivrstvý povlak [9].

3.2.5 Kluzné vrstvy

Kluzné vrstvy jsou další oblastí moderních vrstev. Od předešlých vrstev se liší svojí nižší tvrdostí. Do této skupiny můžeme zařadit tzv. „měkké“ vrstvy, které se používají v kombinaci s tvrdými vrstvami na bázi TiN, TiAlN nebo TiCN a povlaky DLC (z anglické zkratky diamond like carbon – „uhlík podobný diamantu“ nebo také „diamantu podobné vrstvy“). Tyto vrstvy vhodně kombinují vysokou tvrdost s výbornými kluznými vlastnostmi. Vyrábí se spousta těchto variant tenkých vrstev. Jejich společnou vlastností je nízký koeficient tření a snížená odolnost vůči tepelnému zatížení a tvrdost (kolem 20 GPa). Kluzné vrstvy se nanášejí jako poslední část již zavedených povlaků (metoda PVD). [18].

Představitelem těchto povlaků je samomazný povlak na bázi MoS₂, který disponuje velmi nízkým koeficientem tření (0,1). Povlak je použitelný do teploty 400 °C, tloušťka povlaku je 0,5 – 2 μm a nanotvrdost 20 GPa.

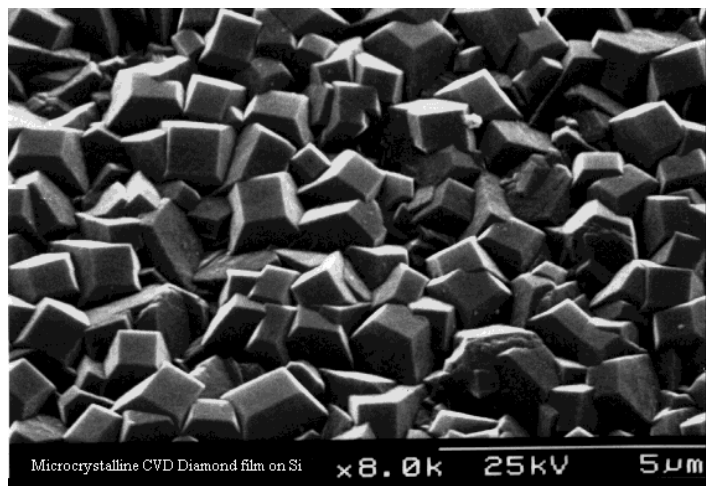
Dalším systémem kluzných vrstev je založen na bázi oxidu hliníku Al₂O₃. Tyto oxidy mají výbornou tepelnou a chemickou stabilitu a vynikající mechanické vlastnosti. Systém těchto kluzných vrstev je převážně tvořen oxidy hliníku a titanu s přídavkem izotropně rozděleného uhlíku [13].

3.2.6 Diamantové vrstvy

Jedná se o povlak z polykrystalického diamantu. Jeho výhodou je malý součinitel tření. Má vysokou tepelnou vodivost. Rychlost růstu vrstvy je cca 1 μm/h. Jeho nevýhodou je nízká houževnatost. Tyto povlaky jsou s výhodou používány při obrábění neželezných

kovů a slitin převážně hliníkových s křemíkem, kompozitů, keramiky různých jiných materiálů, u kterých je zapotřebí vysoká odolnost vůči abrazi. Tyto povlaky jsou nevhodné pro obrábění kovů na bázi železa z důvodu difúze uhlíku do železa.

Diamantové vrstvy jsou tvořeny shlukem malých krystalů o zrnitosti 1 – 10 μm , což znázorňuje obrázek 28. Každý krystal (pevně spojený se sousedním krystalem) je prakticky identický s přírodním diamantem a syntetickým diamantem vyrobeným při vysokém tlaku [13], [18].



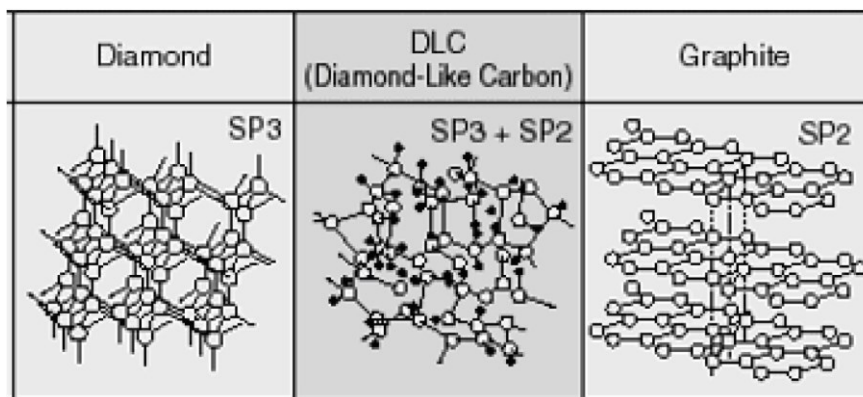
Obr. 28. Krystalická struktura diamantové vrstvy [21].

Tyto povlaky se obvykle nanášejí metodou CVD a jejími dalšími modifikacemi při nízkých tlacích ze směsi metanu a vodíku. Tato směs plynů se následně chemicky vybudí, aby produkovala vodík a uhlovodíkové radikály. Diamantový povlak se tvoří na substrátu ohřátém na teplotu 900 $^{\circ}\text{C}$ a roste za rovnovážných termodynamických podmínek bez nutnosti iontové asistence [13].

3.2.7 DLC vrstvy

Zkratka pochází z anglického Diamond Like Carbon, což v překladu má význam „uhlík podobný diamantu“ nebo také „diamantu podobné vrstvy“. Oproti diamantovému povlaku se DLC povlak liší amorní mikrostrukturou, která je vytvořena z grafického uhlíku, diamantového uhlíku a z vodíku v různých poměrech v závislosti na daném procesu s maximální tloušťkou povlaku 3 μm (diamant mnoho μm), tvrdost 3000 - 6000 HV (diamant 8000 - 12000 HV). Rozdíl diamantových vrstev s DLC vrstvou je znázorněn na obrázku 31.

Povlaky na bázi uhlíku je možné deponovat za nízkých tlaků s použitím různých deponičních technik. U plazmaticky aktivovaných CVD metod PECVD jsou povlaky DLC obvykle vytvářeny z uhlovodíkových reaktivních plynů (metan, propan, acetylen), které jsou štěpeny a ionizovány v nízkoteplotní plazmě. Radikály a ionty vzniklé z plynné fáze dopadají na povrch substrátu, což vede k růstu vrstvy. Přidáním dalších plynů (vodík, kyslík, dusík nebo další přísadové prvky) lze řídit změny chemického složení a atomové struktury povlaku. Je možné použít i PVD metody nejvíce katodové obloukové napařování a magnetronové napařování. Odpařovaná nebo odprašovaná je taková katoda, kterou tvoří uhlíkový terč, a jako pracovní plyn se většinou používá argon [13].



Obr. 31. Struktura DLC v porovnání s diamantem a grafitem [13].

4 VÝVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI POVLAKOVÁNÍ NÁSTROJŮ

Zcela prokazatelně lze zaznamenat největší pokroky v oblasti depozičních technologií. Zásadní kvalitativní změnu v technologii vytváření tenkých otěruvzdorných vrstev přinesla tzv. plazmaticky aktivovaná CVD metoda (označení PCVD, nebo taky PACVD – Plasma Assisted CVD, PECVD – Plasma Enhanced CVD, MWPCVD – MicroWave Plasma Assisted CVD), která se od klasické CVD metody liší nízkými pracovními teplotami (běžně 600 °C, podle některých údajů i méně, například 480 – 560 °C), přičemž se nemění její princip, tj. vytváření vrstvy z plynné fáze.

Další metodou, která je založena na principu snížení vysokých pracovních teplot CVD metody, je tzv. MTCVD metoda (Middle Temperature CVD – středně-teplotní CVD). Na rozdíl od konvenční CVD technologie, kde depoziční teploty dosahují hodnot až 1000 °C, umožňuje technologie MTCVD vytvářet vrstvy z plynné fáze za teplot podstatně nižších, 700 – 850 °C. Zatímco u metody CVD je používán plynný metan CH_4 (zdroj uhlíku) a čistý dusík, MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH_3CN), nebo též vysoce toxický a hořlavý metykyanid. Zdrojem titanu je u obou metod chlorid titaničitý (TiCl_4).

Závěrem lze říci, že trend povlakování směřuje k většímu používání výše uvedených metod (PCVD, PACVD, PECVD, MWPCVD, MTCVD) z důvodu nižší pracovní teploty než u klasické CVD metody. Poroste podíl břitových destiček deponovaných metodou PVD a s tím spojený vývoj nových multivrstev s aplikací nových tvrdých sloučenin [27].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 PODMÍNKY TESTU

Test byl prováděn ve firmě EDP s.r.o. na vysekávacích, popř. kombinovaných strojích výrobce Trumpf. Konkrétně šlo o stroje TruPunch 5000, TruMatic 6000 a TruMatic 7000. Hala dělirny, kde všechny tyto stroje stojí, je zateplena a obsluha strojů je stejně kvalifikovaná. Dalším důležitým parametrem testování byl zvolený materiál (plech), který musel být samozřejmě stejného druhu a tloušťky.

Do testovací fáze vstoupily 3 různé typy střížníků. Jedná se o:

- kruhový střížník Ø 3 mm,
- obdélníkový (dělicí) střížník 76,2 mm x 5,0 mm,
- čtvercový střížník 50,0 mm x 50,0 mm.

Tyto tři různé razníky budeme nazývat sada (obr. 34). Na tyto střížníky bylo naneseno 5 různých typů povlaků. Pro porovnání živostnosti byl do testu přiřazena i jedna sada střížníků bez povlaku. Takže do testu vstoupilo celkem 18 nástrojů (střížníků).



Obr. 34. Sada testovaných střížníků.

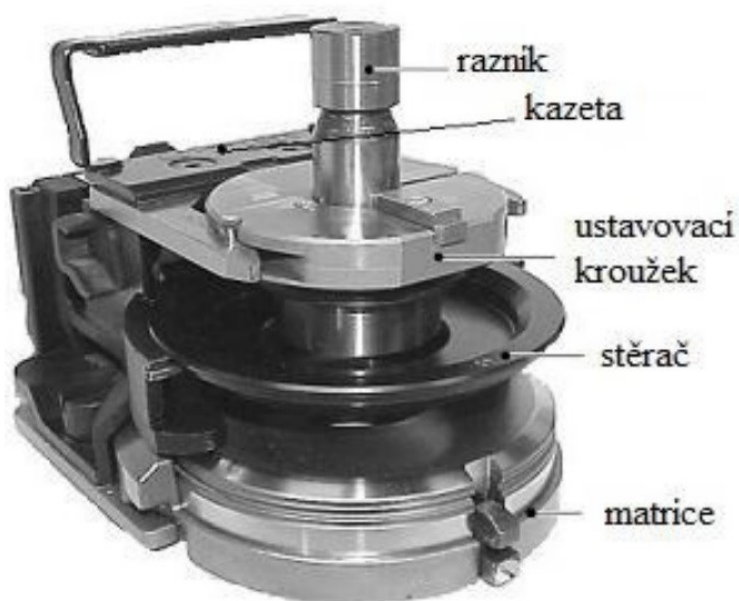
5.1 Vysekávací stroj TruPunch 5000

Firma disponuje 2 kusy těchto strojů (obr. 32). Jedná se o vysekávací (děrovací) stroj s rychlostí až 1350 zdvihů (úderů) za minutu, který je schopen vytvářet i tvarové prvky, jako je například jazýček, můstek, pupek, kalíšek, důlčík, větrací otvor, ohyb pro klavirový pant nebo i krček s tvářeným závitem nahrazující zalisovanou matici.



Obr. 32. Vysekávací stroj TruPunch 5000.

Pracovní rozsah stroje je 3050 x 1550 mm s maximální tloušťkou plechu 8 mm. Maximální vysekávací síla je 220 kN. Do nástrojové lišty se vejde 21 kusů nástrojů formou kazet (střížník a střížnice, které jsou složeny do tzv. kazety) a doba výměny nástroje trvá přibližně 3 sekundy. Stroj zabírá plochu 7600 x 7000 mm [23].



Obr. 37. Nástrojová sestava (kazeta) [28].

5.2 Kombinovaný stroj TruMatic 6000 a TruMatic 7000

Ve strojovém parku firmy jsou 3 kusy těchto strojů (2 stroje TruMatic 6000 a 1 stroj TruMatic 7000 – obrázek 33). Stroj je konstrukčně velice podobný typu TruPunch 5000, ale navíc má laserovou hlavu, hned vedle vysekávací hlavy. Tím pádem je stroj mnohem variabilnější z hlediska tvorby přířezů (přístřihů). Pracovní rozsah stroje je 3050 x 1550 mm, dělit lze plech do tloušťky 8 mm. Maximální vysekávací síla je 220 kN, maximální sled zdvihů je 900 za minutu a nástrojová lišta pojme až 21 nástrojů, opět ve formě kazet. Výkon laseru je 3200 W.

Rozdíl mezi stroji TruMatic 6000 a TruMatic 7000 je jen v tom, že novější typ stroje (TruMatic 7000) má vyšší počet zdvihů (1000 za minutu), přídavné dvě osy u laserové hlavy a aktivní matici, což snižuje škrábání plechu ze spodní strany, hlavně u použití tvarových nástrojů. Stroj zabírá pracovní plochu 8070 x 7650 mm [24], [25].



Obr. 33. Kombinovaný stroj TruMatic 7000.

5.3 Materiál zkoušky

V rámci testu se musel zvolit vhodný materiál na zkoušku. Z logiky věci to musel být materiál, který se nejvíce používá. Proto byl zvolen plech z nízkouhlíkové nelegované oceli (dle označení ČSN - 11 321, dle označení EN - DC 01) válcovaný za studena tloušťky 1,5 mm.

Tento plech firma nakupuje ve svitcích šířky 1500 mm (obr. 35), které se stříhají na různé délky na rovnacím a stříhacím stroji firmy Forstner. Vlivem různé délky nastříhané

tabule lze snížit prořez, tím pádem vzniká méně odpadu. Svitky mají hmotnost obvykle 4 tuny.



Obr. 35. Plechové svitky.

Vlastnosti materiálu 11 321 jsou uvedeny v tabulkách 3 a 4 a data v nich byla vybrána z atestů dodavatelů.

Tab. 3. Chemické složení oceli ČSN 11 321.

| Materiál | C max [%] | Mn max [%] | P max [%] | S max [%] |
|-----------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 11 321 | 0,12 | 0,60 | 0,045 | 0,045 |

Tab. 4. Mechanické vlastnosti oceli ČSN 11 321.

| Materiál | Mez pevnosti v tahu Rm [MPa] | Mez kluzu Re [Mpa] | Tažnost A min [%] |
|-----------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|
| 11 321 | 410 | 280 | 28 |

5.4 Zkoušené nástroje

Jak bylo uvedeno výše, povlaky se testovaly na třech typech střížníků, střížnice (matrice) zůstaly bez povlaku. Střížníky jsou standardně nakupovány z materiálu HSS, což je druh oceli třídy 19 určený pro výrobu vysoce namáhaných nástrojů.

5.4.1 Kruhový střížník Ø 3 mm

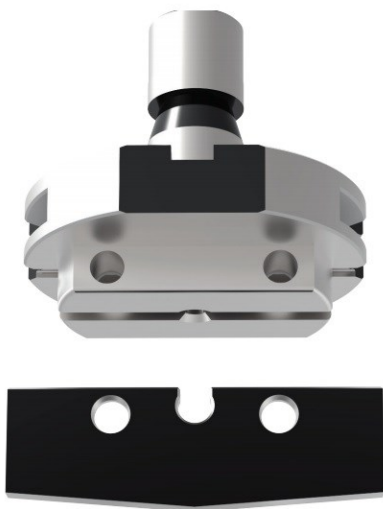
Jedná se jehlový kruhový střížník průměru 3 mm s délkou 60 mm, který se převážně využívá na předrážení otvoru pro následné řezání laserovým paprskem, takže se využívá hlavně u kombinovaných strojů.



Obr. 36. Jehlový kruhový střížník.

5.4.2 Obdélníkový (dělicí) střížník 76,2 mm x 5,0 mm

Tento střížník je využíván hlavně u vysekávacích strojů, protože díky němu se odsekávají dlouhé vzdálenosti, většinou obvody dílů. Proto je v praxi nazýván „děličák“. Prakticky každý vysekávaný díl je tímto nástrojem obsekán, takže je v rámci všech testovaných střížníků nejvíce využíván. Existuje ve dvou provedeních a to buď jako výměnná destička (naš případ – obrázek 38) a nebo jako celý nástroj (včetně stopky – obrázek 39). Výměnná destička je levnější (asi 46 € = 1250 Kč), přičemž celý střížník stojí asi 110 €, což je asi 3000 Kč. Celý střížník je celistvý a není nutné ho složitě centrovat, destičku je nutné přesně ustavit do držáku.



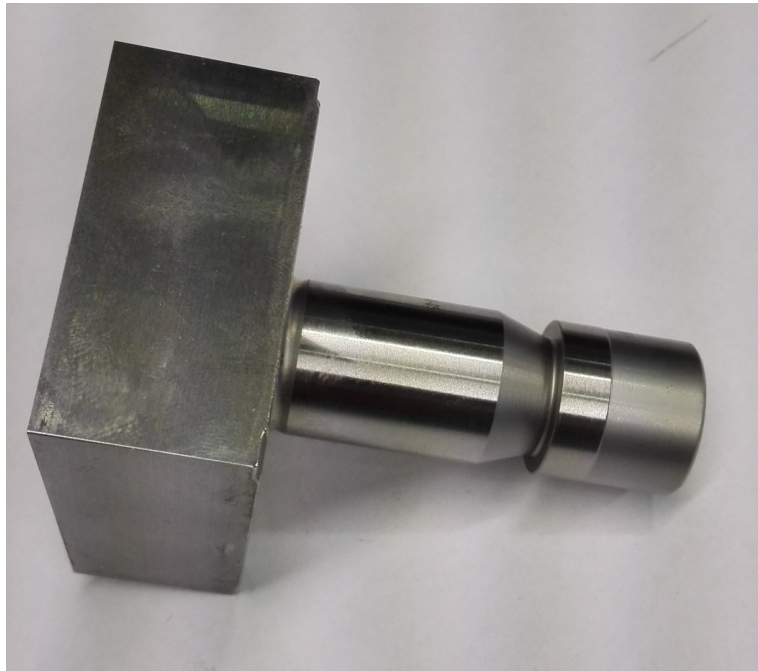
Obr. 38. Dělicí destička s držákem [29].



Obr. 39. Dělicí střížník [30].

5.4.3 Čtvercový střížník 50,0 mm x 50,0 mm

Čtvercový střížník 50,0 mm x 50,0 mm (obrázek 40) je s výhodou používám na vysekávání velkých ploch, většinou vnitřních otvorů rámu, krytů a typově podobných výstřížků. V testu tento střížník byl nejméně používán, ale zastupoval zde nezbytnou kategorii největších střížníků.



Obr. 40. Čtvercový střížník 50,0 mm x 50,0 mm.

5.5 Povlaky jednotlivých nástrojů

Všechny povlaky byly vytvořeny metodou PVD, tedy fyzikálním napařováním/napařováním z pevné fáze (targetů).

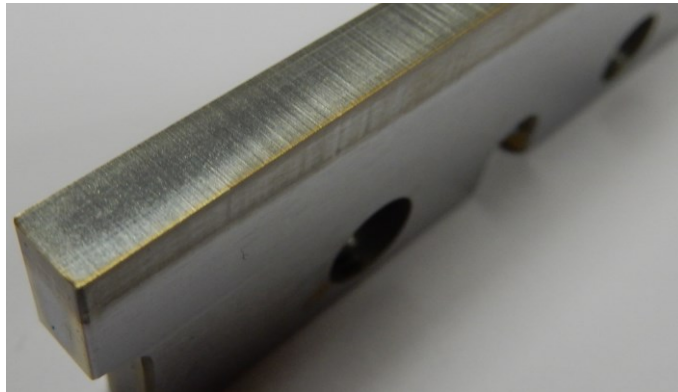
Z důvodu nezávislosti hodnocení povlaků byli osloveni 3 dodavatelé povlaků a to firma Trumpf, která své vysekávací nástroje dodává buď bez povlaku anebo s povlakem. Většinou se pak jedná o povlak TiCN.

Dalším dodavatel povlaku byla firma, která si nepřeje být zveřejňovaná v této práci. V rámci identifikace vzniklo označení Valenta a zastupuje zde povlak TiCrN.

A poslední dodavatel povlákutých nástrojů byla firma Oerlikon Balzers Coating, která vytvořila povlaky TiN, AlCrN a jediný zástupce multivrstev TiAlN + WC/C.

5.5.1 TiCrN – Valenta

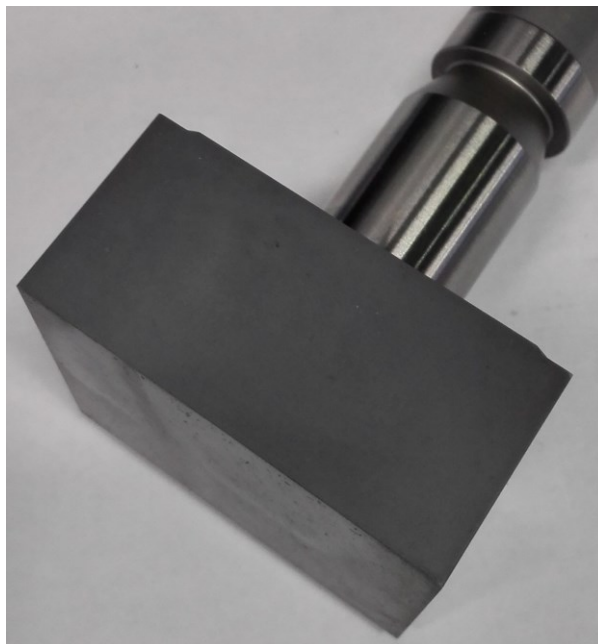
Povlak TiCrN vytváří na střížnicích stříbrný povlak s okraji, které mají nádech do zlaté barvy. Názorně to ukazuje obrázek 41 povláknuté dělicí destičky 76,2 mm x 5,0 mm. Tato barva je způsobena vazbou Ti-N. Povlak byl vyroben v tloušťce 1 μm . Další informace, typu mikrotvrdost, součinitel tření, max. teplotní použití dodavatel povlaku nezajistil.



*Obr. 41. Dělicí destička 76,2 mm x 5,0 mm
s povlakem TiCrN.*

5.5.2 TiCN – Trumpf

Jako předchozí povlak, i tento je monovrstva o tloušťce 3 μm nanesená technologií PVD. Povlak je modrošedé barvy – obrázek 42. Koeficient tření (proti oceli za sucha) je 0,3. Mikrotvrdost povlaku by měla dosahovat 3000 HV a maximální teplota použití je 400 °C. Povlak se vytváří okolo teploty 450 °C.



*Obr. 42. Čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm
s povlakem TiCN od firmy Trumpf.*

5.5.3 TiAlN + WC/C – Oerlikon

Tento povlak je jediný zástupce multivrstvených povlaků a navíc je to kluzná vrstva. Proto koeficient tření dosahuje hodnoty 0,15. Tloušťka povlaku je opět okolo 3 μm a povlakovací teplota je 450 $^{\circ}\text{C}$. Povlak je schopen odolávat teplotám do 800 $^{\circ}\text{C}$ a mikrotvrdost, byť jde o kluznou vrstvu, která se sebou občas nese nižší hodnoty tvrdosti, je 30000 HV. Barva povlaku je antracitová (obrázek 43).



Obr. 43. Kruhový střížník $\varnothing 3$ mm s povlakem TiAlN + WC/C firmy Oerlikon.

5.5.4 AlCrN – Oerlikon

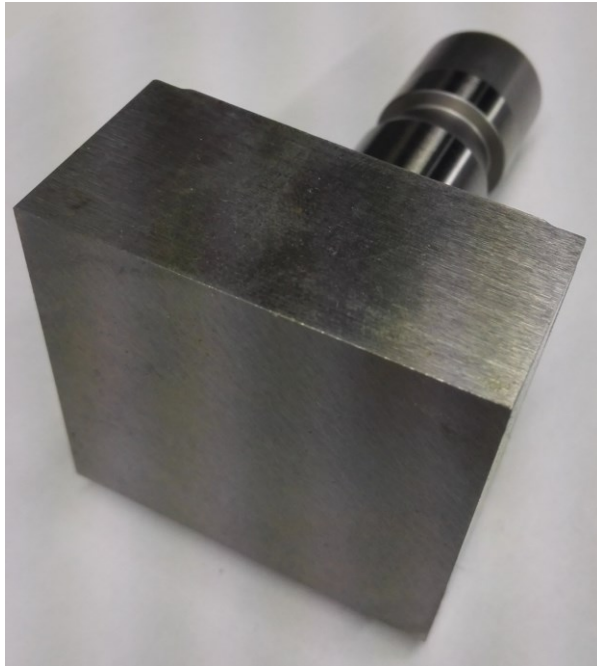
Další povlak na bázi Cr v podání od firmy Oerlikon vyniká svojí schopností odolávat teplotám až 1100 $^{\circ}\text{C}$. Povlak je nanesen v tloušťce 3 μm , barva vrstvy je světle šedá (obrázek 44), mikrotvrdost je 3200 HV a koeficient tření je 0,35.



Obr. 44. Povlak AlCrN nanesený na dělicí destičce 76,2 mm x 5,0 mm.

5.5.5 Bez povlaku – Trumpf

Firma EDP nakupuje většinu vysekávacích nástrojů přímo od firmy Trumpf, která svoje nástroje vyrábí konvenčním obráběním z HSS oceli a následně je tepelně zušlechťuje (většinou kalení a popouštění).



*Obr. 45. Střížník 50,0 mm x 50,00 mm z HSS
výrobce Trumpf.*

5.5.6 TiN - Oerlikon

Pro komplexnější porovnání uvedených povlaků, přibyl ke všem ještě ten nejzákladnější a to je TiN, vytvořený firmou Oerlikon. Povlak má krásně sytou zlatou barvu (obrázek 46) a je nanesen v tloušťce 3 μm . Dosahuje mikrotvrlosti 2300 HV a koeficient tření je 0,3. Maximální teplota které povlak odolá je 600 $^{\circ}\text{C}$ a nanáší se při teplotě 450 $^{\circ}\text{C}$.



*Obr. 46. Dělicí výměnná destička 76,2 mm x 5,0 mm s povlakem TiN
od firmy Oerlikon.*

6 PRŮBĚH TESTOVÁNÍ

Záměr testování byl jasný – pustit do výroby všechny povláknuté střížníky, sbírat data a pak udělat vyhodnocení. Ovšem v průběhu testování, které započalo v lednu 2015, se událo několik událostí, které změnili pohled na testování. Nutno dodat, že v průběhu testu bylo vytvořeno všemi testovanými nástroji přes 10 milionů děr.

6.1 Testování kruhových střížníků Ø 3 mm

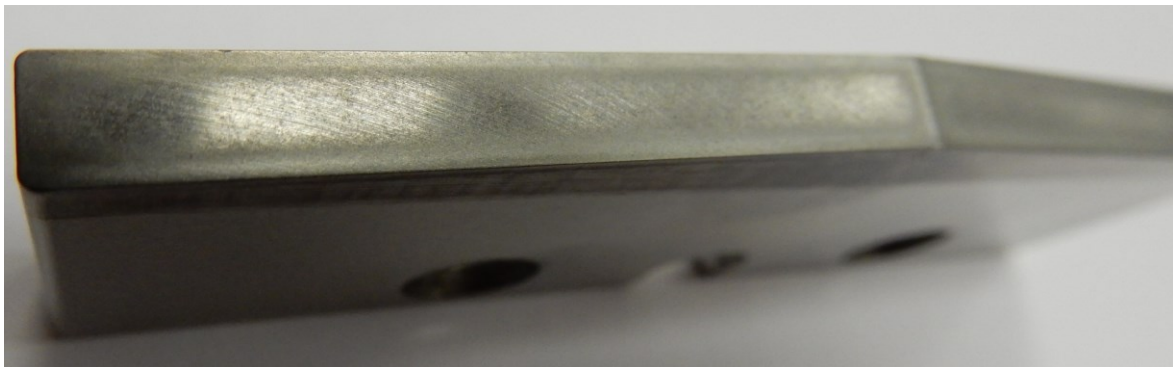
Nejmenší zástupce střížníků, kulatý Ø 3 mm, je primárně používám na předsek děr pro následné řezání laserem (aby laser nemusel dělat zápal, protože je to pomalá operace), takže kvalita jeho stříhu není až tak moc podstatná, jelikož vyseknutá díra leží mimo výstřížek, tudíž je v odpadu a vzniklý otvor Ø 3 mm může mít i celkem velký otřep (jehlu) oproti ostatním vysekávacím nástrojům. To znamená, že nástrojaři nechávali sekát tyto nástroje neúměrně dlouho. To mělo za následek rozkolísané hodnoty ve sběru dat a větší pravděpodobnost zničení (zlomení) nástroje. Což se ve výsledku i potvrdilo a z 6 testovaných jehlových střížníků Ø 3 mm byla zničena v průběhu celého testu přesná polovina, tedy 3 střížníky tohoto typu. Obrázek 47 demonstruje zlomení střížníku s povlakem TiCN od firmy Trumpf. Na konci testu všechny tyto jehlové střížníky vytvořily přes 6,6 milionů děr (úderů), ovšem vzhledem k tomu, že polovina se jich „nedožila“ konce, nemůžeme brát sebraná data za dostatečně vypovídající.



Obr. 47. Zlomený kruhový střížník Ø 3 mm
s povlakem TiCN.

6.2 Testování dělicích (obdélníkových) střížníků 76,2 mm x 5,0 mm

Testováním tohoto typu střížníku bylo vytvořeno bezmála 3,5 milionů děr. Střížník je dostatečně tuhý (velký), takže zlomení, jako v případě jehlového střížníku, nehrozilo a ani k němu nedošlo. Všechny 6 střížníků zvládlo test až do konce. Každý z testovaných střížníků tohoto typu byl alespoň 3 krát přebroušen, takže i získaná data mají vypovídací hodnotu. Tupý nástroj před broušením ukazuje obrázek 48.



Obr. 48. Tupá dělicí destička (obdélníkový dělicí střížník) rozměru 76,2 mm x 5,0 mm bez povlaku.

6.3 Testování čtvercových střížníků 50,0 mm x 50,0 mm

Největší z řady testovaných střížníků měl potenciál se stát tím pravým důkazem o výhodnosti povlakování vysekávacích nástrojů. Vedlo k tomu několik faktů. Například, že střížník je dostatečně velký, takže nemůže dojít k jeho zničení během testu (celkové životnosti). Dalším faktem byla cena nástroje, tzn. že pokud by výsledky povlaků několikanásobně zvyšovaly životnost nástroje, pak dojde i k největší úspoře z hlediska pořizování nových nástrojů. Nástroje tohoto typu, vzhledem k tomu, že jsou vyrobeny z nástrojové oceli, stojí v rozmezí 100 – 150 € (2700 – 4000 Kč).

K relevantním výsledkům se během testu nedošlo, byť trval test déle než jeden rok, protože množství vysekaných děr (úderů) u všech těchto šesti testovaných čtvercových střížníků jen lehce překročilo 300 tisíc. S ohledem na to, že nástroj (střížník) bez povlaku tohoto rozměru vydrží cca 150 tisíc děr (úderů nebo zdvihů) do otupení, pak je jasné, že některé testované povlaky na těchto čtvercových střížnicích ještě nebyly ani u prvního přebroušení.

Z tohoto hlediska sebraná data u tohoto typu střížníku jsou nedostatečná, tzn., že nemají dostatečnou vypovídací hodnotu pro hodnocení jednotlivých testovaných povlaků.



*Obr. 49. Čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm
s povlakem TiN.*

7 VÝSLEDKY TESTU

Primárním záměrem testu bylo zhodnotit všechny povlaky na všech třech typech střížníků a z toho následně usoudit, jestli ten či onen povlak se vyplatí nebo ne. Jinak řečeno, posoudit jednotlivé povlaky vůči střížníku bez povlaku.

7.1 Naměřená data jednotlivých typů střížníků

Princip měření dat byl jednoduchý – jakmile se ve výrobě (na dělírně) bude zpracovávat plech dle ČSN 11 321 (DC 01) tloušťky 1,5 mm a na seřizovacím programu (program pro dělicí stroj) bude jeden nebo i více z testovaných střížníků, pak nástrojař pustí do výroby některý z povlakovaný střížníků (ideálně pak chronologicky po sobě) a po skončení programu zapíše počet děr (úderů) do tabulky na serveru. Další podmínka testu byla ta, že je nutné evidovat i kdy je nástroj (střížník) tupý, tudíž evidovat kdy nastalo přebroušení. Problémy v průběhu testování ovšem znemožnily posouzení všech střížníků, jak je psáno v kapitole 6.

V následujících tabulkách, kde se nacházejí naměřená data od jednotlivých typů střížníků, se vyskytují tři typy barev.

- Žlutá pole značí, že etapa byla ukončena. tzn. že proběhl interval mezi jednotlivými přebroušeními, popř. když byl nástroj nový, tak se ztupil a bylo ho nutné nabrousit.
- Zelená pole značí, že ještě nebyla ukončena etapa mezi jednotlivými přebroušeními nástroje (střížník je stále dostatečně ostrý).
- Červená pole pak značí, že byl nástroj zničen a není schopen dále v testu pokračovat.

7.1.1 Naměřená data u kruhových střížníků Ø 3 mm

Na tomto typu střížníku bylo vykonáno nejvíce děr (úderů), proto by měly být výsledky co nejpřesnější. Ale vzhledem k destrukci tří ze šesti střížníků v průběhu testu, není možné objektivně posoudit povlaky vůči sobě. Navíc do toho vstupuje fakt, který je popsán níže.

Tab. 5. Data z testování povláknutých střížníků Ø 3 mm.

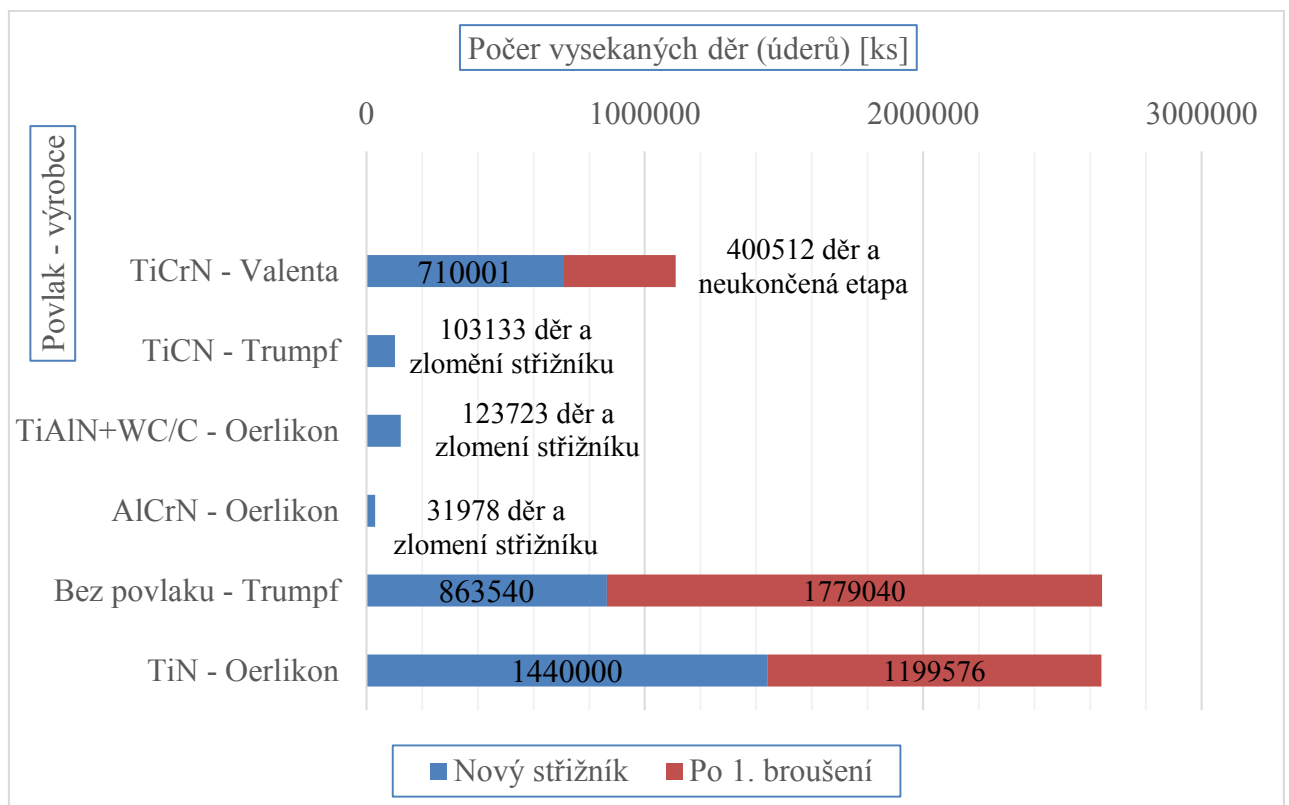
| Povlak – výrobce povlaku | Počet děr | |
|--------------------------|-----------|---------------------|
| | Nový [ks] | Po 1. broušení [ks] |
| TiCrN - Valenta | 710001 | 400512 |
| TiCN - Trumpf | 103113 | |
| TiAlN+WC/C - Oerlikon | 123723 | |
| AlCrN - Oerlikon | 31978 | |
| Bez povlaku - Trumpf | 863540 | 1779040 |
| TiN - Oerlikon | 1440000 | 1199576 |

Legenda:

Ukončená etapa (tupý)

Neukončená etapa

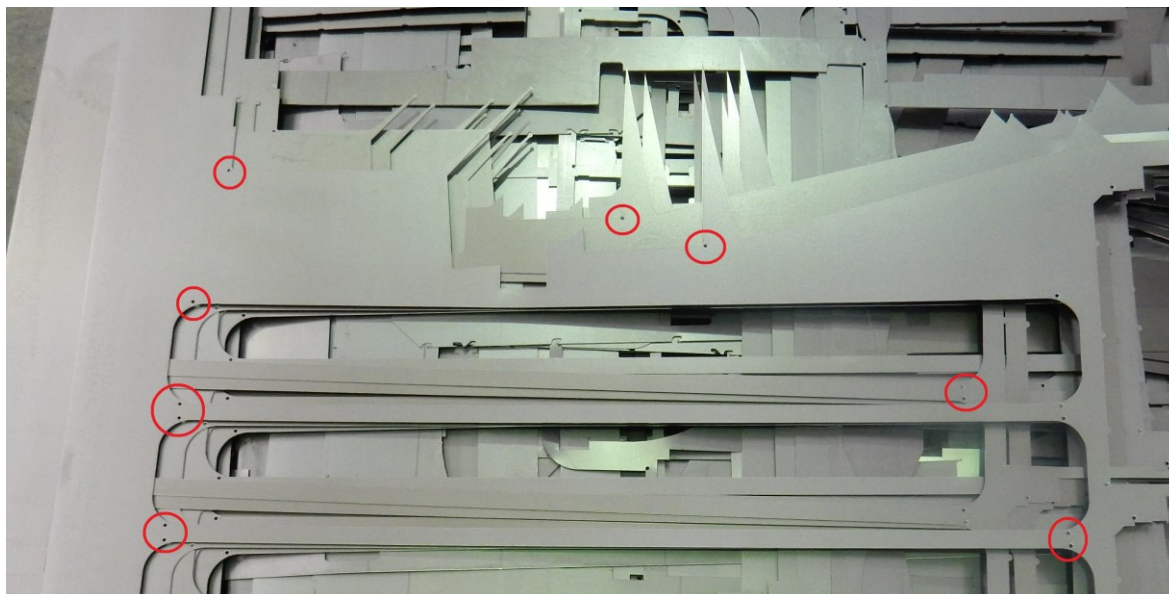
Zničení střížníku



Obr. 52. Porovnání životnosti povlaků u kruhových střížníků Ø3 mm.

Data z tabulky 5 a graf na obrázku 52 jasně vypovídá o tom, že u tohoto typu střížníku, který převážně předsekává kulaté otvory (díry) průměru 3 mm, aby laserový paprsek nemusel dělat tzv. vpich do plechu, je na posuzování povlaku nástroje nevhodný. Hlavní důvod je ukryt v tom, že vzniklý otvor průměru 3 mm zůstává v odpadu zbylého plechu,

takže kvalita stříhu (ostřina) je v celku nepodstatná, tedy může být i velká. To znamená, že nástroj může pracovat prakticky i tupý. Pro názornost obrázek 50 demonstruje, jak často je používán kruhový střížník pro předsek otvoru pro laserový paprsek. Červená kolečka na odpadu po vyřezání/vysekání plechu znázorňují některé otvory pro laserový paprsek vytvořené právě kruhovým střížníkem průměru 3 mm.



Obr. 50. Odpad plechu a na něm označeny (červeně) předseknuté díry střížníkem \varnothing 3mm.

7.1.2 Naměřená data u dělicích (obdélníkových) střížníků 76,2 mm x 5 mm

Tento typ střížníků byl ideálním z hlediska vhodného získávání dat pro hodnocení. Velká střížná plocha přispívala k objektivnosti při posuzování povlaku a střížníky byly často používány v provozu. Proto i nasbíraná data mají největší vypovídací hodnotu. Nasbíraná data jsou uvedena v tabulce 6.

Tab. 6. Data z testování povlákнутých obdélníkových (dělicích) střížníků 76,2mm x 5,0mm.

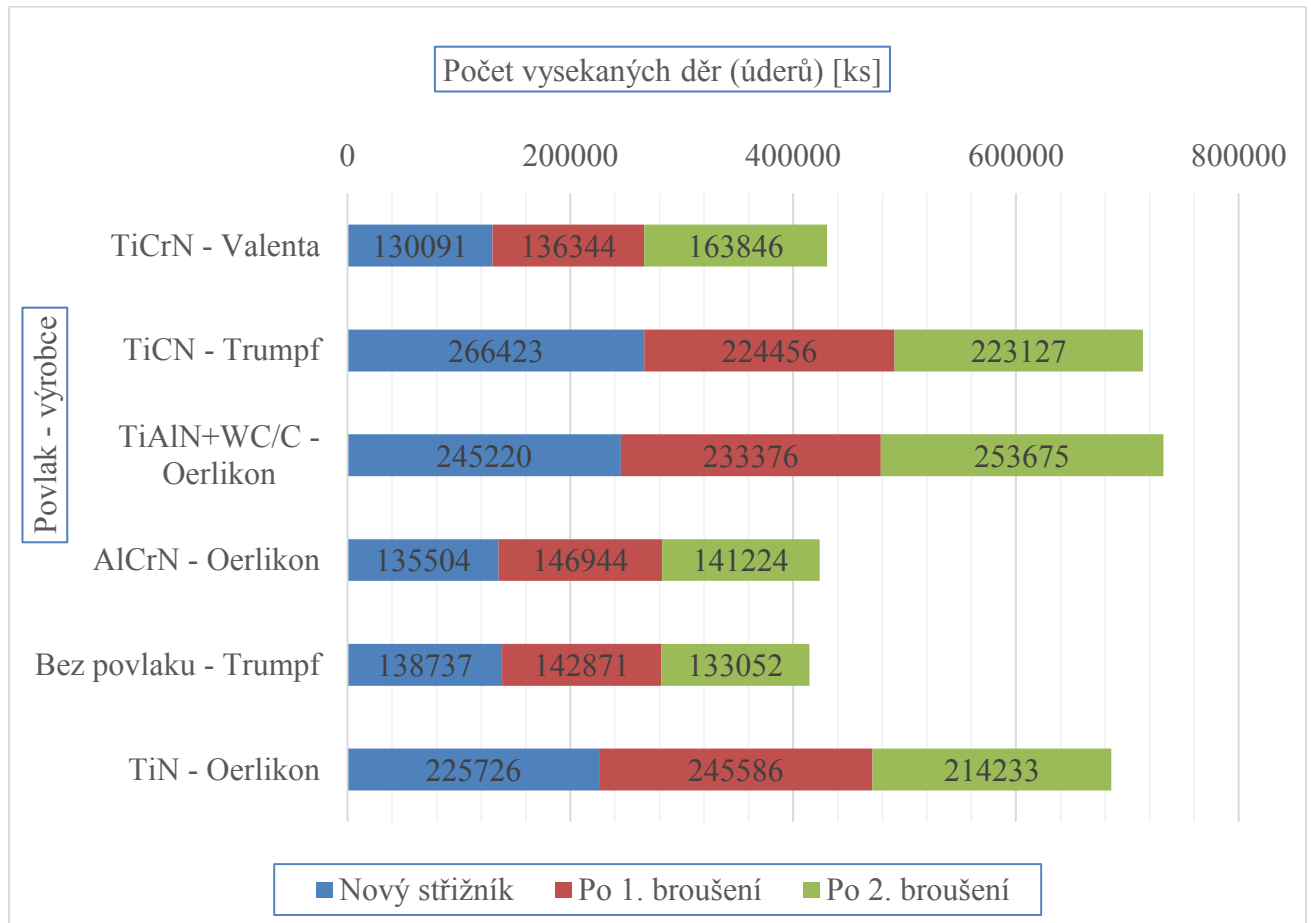
| Povlak – výrobce povlaku | Počet vysekaných děr | | |
|--------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | Nový [ks] | Po 1. broušení [ks] | Po 2. broušení [ks] |
| TiCrN - Valenta | 130091 | 136344 | 163846 |
| TiCN - Trumpf | 266423 | 224456 | 223127 |
| TiAlN+WC/C - Oerlikon | 245220 | 233376 | 253675 |
| AlCrN - Oerlikon | 135504 | 146944 | 141224 |
| Bez povlaku - Trumpf | 138737 | 142871 | 133052 |
| TiN - Oerlikon | 225726 | 245586 | 214233 |

Legenda:

Ukončená etapa (tupý)



Tato získaná data byla ta nejlepší ze všech testovaných typů střížníků. U všech povlakovaných střížníků („děličáků“) proběhlo minimálně dvojí přebroušení, takže je možné porovnat povlaky mezi sebou, což vykresluje obrázek 51 získaný z dat tabulky 6.



Obr. 51. Porovnání životnosti povlaků u střížníků 76,2mm x 5,0mm.

Z obrázku 51 lze jasně vyčíst, že střížník bez povlaku, typu obdélník (děličí) 76,2mm x 5,0mm, má interval přebroušení přibližně 138 tisíc děr (úderů). Obdobnou životnost v rámci cyklu přebroušování mají i povlaky TiCrN a AlCrN. Zhruba dvojnásobnou životnost navyšují povlaky TiCN, TiN a TiAlN+WC/C.

7.1.3 Naměřená data u čtvercových střížníků 50,0 mm x 50,0 mm

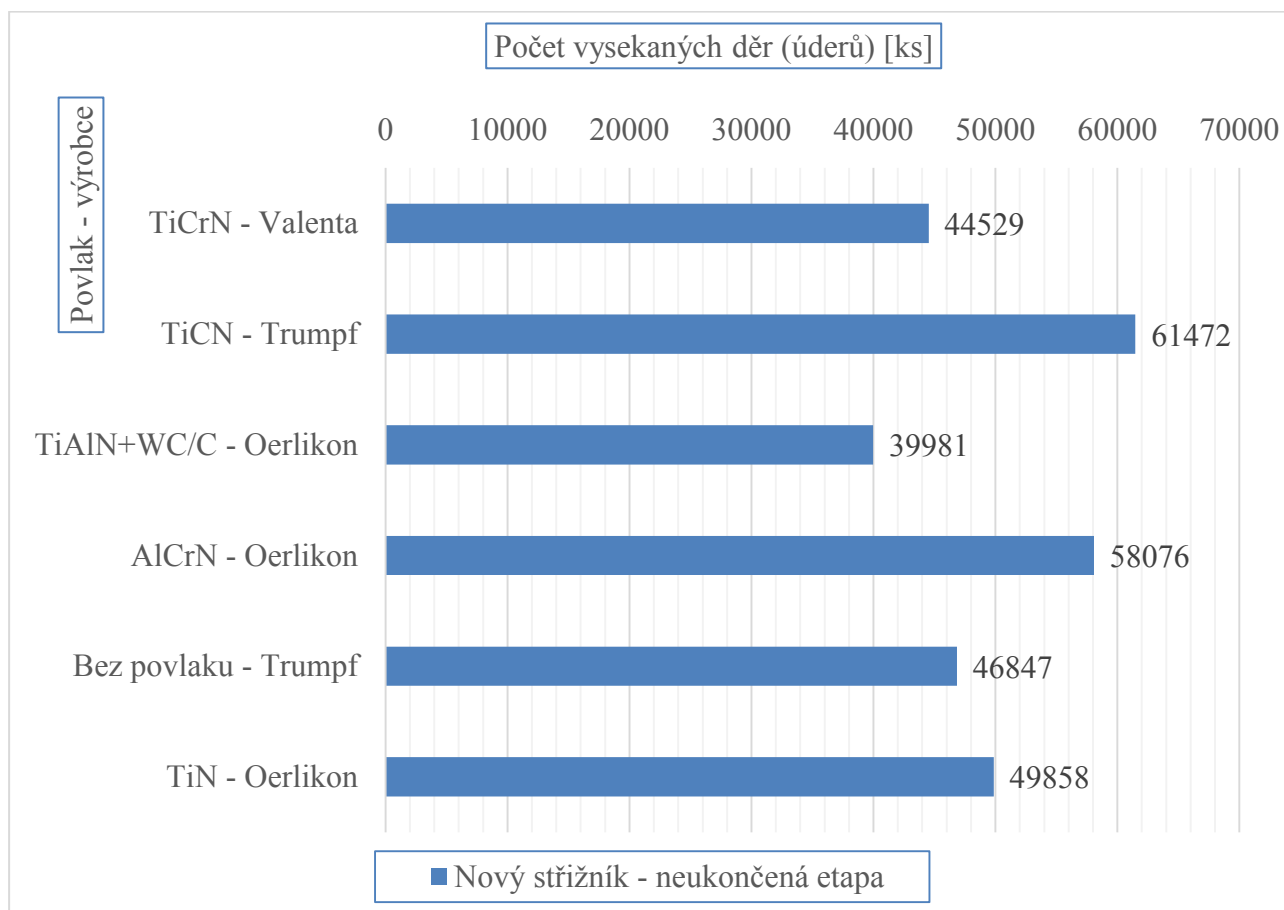
U získávání dat z největšího z testovaných střížníků byl problém v tom, že ve výrobě není dostatečné množství dílů, které se tímto střížníkem opracovávají, proto hodnoty nasbíraných dat jsou velmi malé.

Tab. 7. Data z testování povláknutých čtvercových střížníků 50,0mm x 50,0mm

| Povlak – výrobce povlaku | Počet vysekaných děr |
|--------------------------|----------------------|
| | Nový [ks] |
| TiCrN - Valenta | 44529 |
| TiCN - Trumpf | 61472 |
| TiAlN+WC/C - Oerlikon | 39981 |
| AlCrN - Oerlikon | 58076 |
| Bez povlaku - Trumpf | 46847 |
| TiN - Oerlikon | 49858 |

Legenda:

Neukončená etapa



Obr. 53. Porovnání živostnosti povlaků u čtvercových střížníků 50,0mm x 50,0mm.

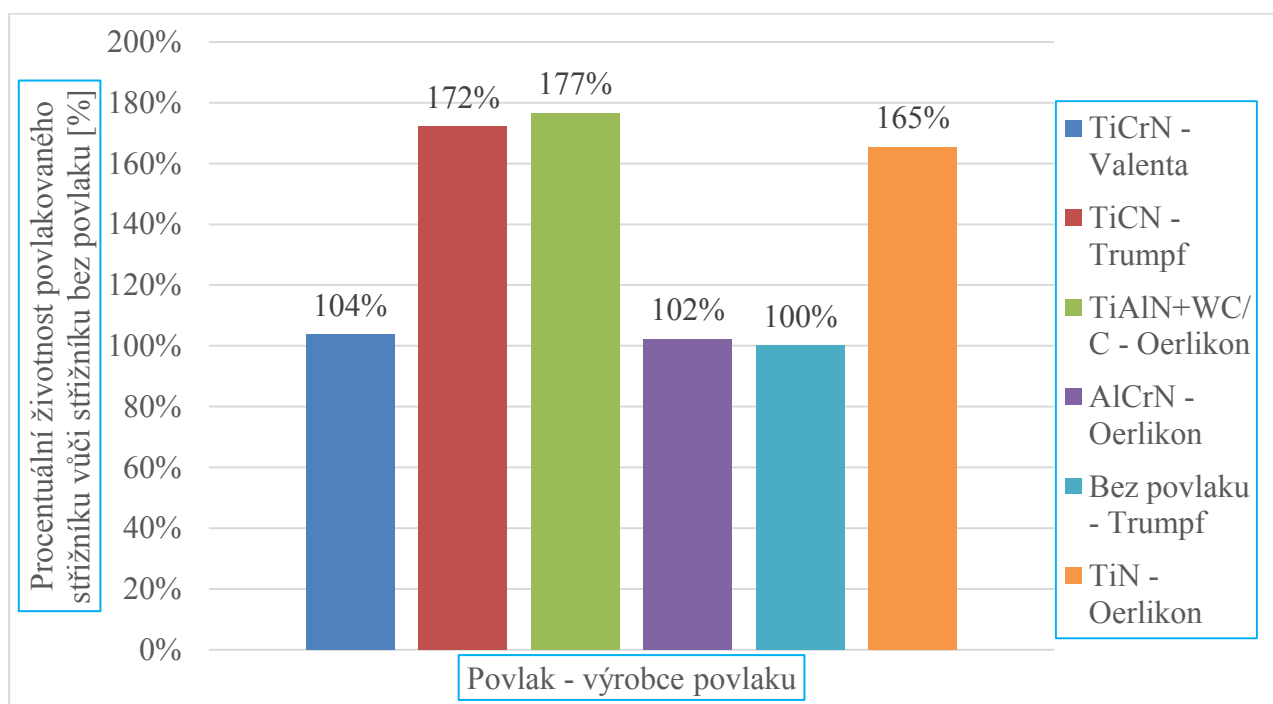
Z tabulky 7 a obrázku 53 je jasné, že nějaké objektivní hodnocení povlaků nemá cenu, protože ani jeden z těchto střížníků ještě nedošel do fáze otupení, dokonce i střížník bez povlaku.

7.2 Porovnání povlákнутých střížníků vůči střížníku bez povlaku – zjištění životnosti

V testu byl v každé sadě střížníků i jeden střížník bez povlaku. Proto můžeme porovnat i různé povlaky vůči nepovlakovanému střížníku. Postup byl zvolen následovně. Data jsou pro toto hodnocení relevantní opět jen z obdélníkového střížníku 76,2mm x 5,0mm (dělicího). Sečteme všechny vysekané díry (úderý) od každého střížníku s jiným povlakem a získané sumy porovnáme se sumou děr (úderů) se střížníkem bez povlaku. Hodnocení bude procentuální hodnota povlaku vůči nepovlaku, jinými slovy procentuální životnost povlaku vůči nepovlaku. Výsledky ukazuje tabulka 8 a obrázek 54.

Tab. 8. Procentuální životnost povlakovaného střížníku vůči střížníku bez povlaku (obdélníkové dělicí střížníky 76,2mm x 5,0mm).

| Povlak – výrobce povlaku | Suma vysekaných děr (úderů) po 2. broušení [ks] | Procentuální životnost povlakovaného střížníku vůči střížníku bez povlaku [%] |
|--------------------------|---|---|
| TiCrN - Valenta | 430281 | 104% |
| TiCN - Trumpf | 714006 | 172% |
| TiAlN+WC/C - Oerlikon | 732271 | 177% |
| AlCrN - Oerlikon | 423672 | 102% |
| Bez povlaku - Trumpf | 414660 | 100% |
| TiN - Oerlikon | 685545 | 165% |



Obr. 54. Porovnání životnosti povlakovaných střížníků vůči střížníku bez povlaku.

Z tabulky 8 a obrázku 54 je patrné, že nejvyšší životnost byla naměřena u kluzného povlaku TiAlN+WC/C od firmy Oerlikon. Následuje TiCN od firmy Trumpf a TiN od firmy Oerlikon. Prakticky stejné výsledky životnosti střížníku mají povlaky TiCrN a AlCrN jako životnost střížníku bez povlaku.

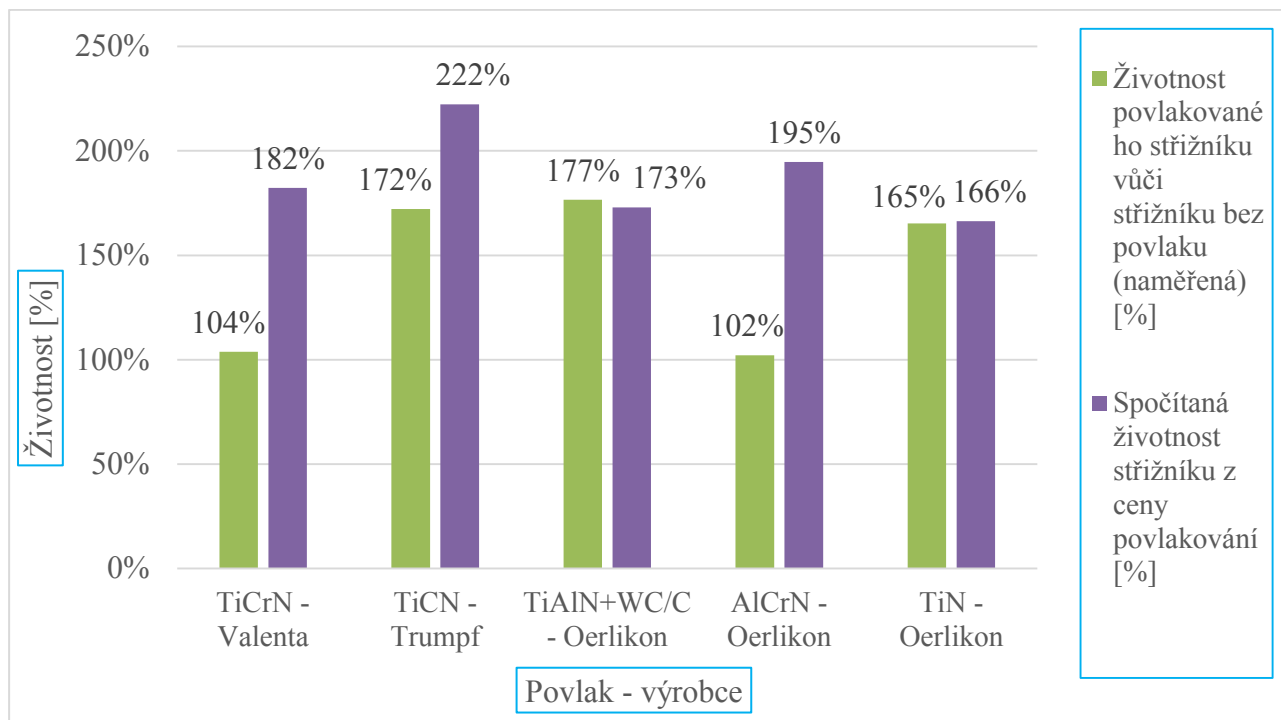
7.3 Ekonomické zhodnocení

Povlakování nástrojů něco stojí, proto bylo provedeno ekonomické zhodnocení. Opět bylo čerpáno z dat, která byly naměřeny u testování obdélníkového střížníku (dělicího) 76,2mm x 5,0mm. Zhodnocení provedeme na každý typ střížníku zvlášť, což ukazují tabulky 9, 10 a 11 a obrázky 55, 56 a 57. Ekonomické zhodnocení bylo spočítané z dat tabulky 8, kde je vypočítaná procentuální životnost povlákutého střížníku vůči střížníku bez povlaku. Dalším parametrem pro ekonomické zhodnocení je nutnost znát cenu povlaku a cenu nového (nepovlákutého) střížníku. Následně (z ceny povlakování) spočítáme kolik procent musí střížník vydržet (životnost), aby se alespoň povlakování zaplatilo a toto vzniklé procento porovnáme s procentem životnosti z tabulky 8. Pakliže je reálná (naměřená) životnost vyšší, než spočítaná z ceny povlakování, pak se povlakování vyplatí (PRAVDA). V opačném případě je povlakování nerentabilní (NEPRAVDA).

7.3.1 Ekonomické zhodnocení povlakování pro kruhový střížník Ø 3 mm

Tab. 9. Ekonomické zhodnocení povlakování pro kruhový střížník Ø 3 mm.

| Povlak - výrobce povlaku | Cena povlakování pro kruhový razník Ø3mm [Kč] | Cena nového střížníku (bez povlaku) [Kč] | Životnost povlakaného střížníku vůči střížníku bez povlaku (naměřená) [%] | Spočítaná životnost střížníku z ceny povlakování [%] | Vyplatí se |
|--------------------------|---|--|---|--|------------|
| TiCrN - Valenta | 200,00 | 243 | 104% | 182% | NEPRAVDA |
| TiCN - Trumpf | 297,00 | 243 | 172% | 222% | NEPRAVDA |
| TiAlN+WC/C - Oerlikon | 177,09 | 243 | 177% | 173% | PRAVDA |
| AlCrN - Oerlikon | 230,22 | 243 | 102% | 195% | NEPRAVDA |
| TiN - Oerlikon | 160,99 | 243 | 165% | 166% | NEPRAVDA |



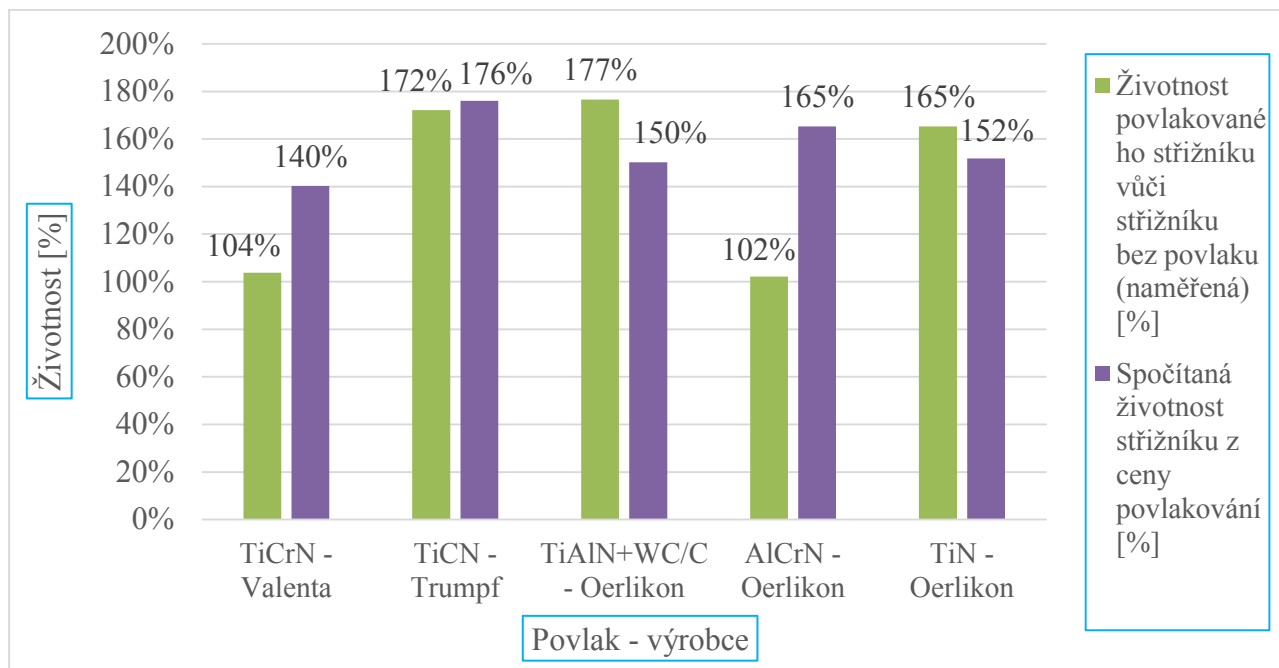
Obr. 55. Ekonomické zhodnocení povlakování pro kruhový střížník \varnothing 3 mm.

U kruhových střížníků \varnothing 3 mm by z hlediska rentability obstálo pouze povlakování kluznou vrstvou TiAlN+WC/C. Ovšem je to na hranici (173% vůči 177%) a vzhledem k výše uvedeným problémům povlakování nedoporučoval. Z obrázku 55 lze snadno vyčíst, že pokud sloupec spočítané životnosti (fialový) je vyšší než sloupec naměřené životnosti (zelený), pak je povlakování nerentabilní.

7.3.2 Ekonomické zhodnocení povlakování pro dělicí střížník 76,2mm x 5,0mm

Tab. 10. Ekonomické zhodnocení povlakování pro dělicí střížník 76,2mm x 5,0mm.

| Povlak - výrobce povlaku | Cena povlakování pro obdélníkový razník 76,2mm x 5,0mm [Kč] | Cena nového střížníku (bez povlaku) [Kč] | Životnost povlakovaného střížníku vůči střížníku bez povlaku (naměřená) [%] | Spočítaná životnost střížníku z ceny povlakování [%] | Vyplatí se |
|--------------------------|---|--|---|--|------------|
| TiCrN - Valenta | 500,00 | 1242 | 104% | 140% | NEPRAVDA |
| TiCN - Trumpf | 945,00 | 1242 | 172% | 176% | NEPRAVDA |
| TiAlN+WC/C - Oerlikon | 623,59 | 1242 | 177% | 150% | PRAVDA |
| AlCrN - Oerlikon | 810,67 | 1242 | 102% | 165% | NEPRAVDA |
| TiN - Oerlikon | 643,98 | 1242 | 165% | 152% | PRAVDA |



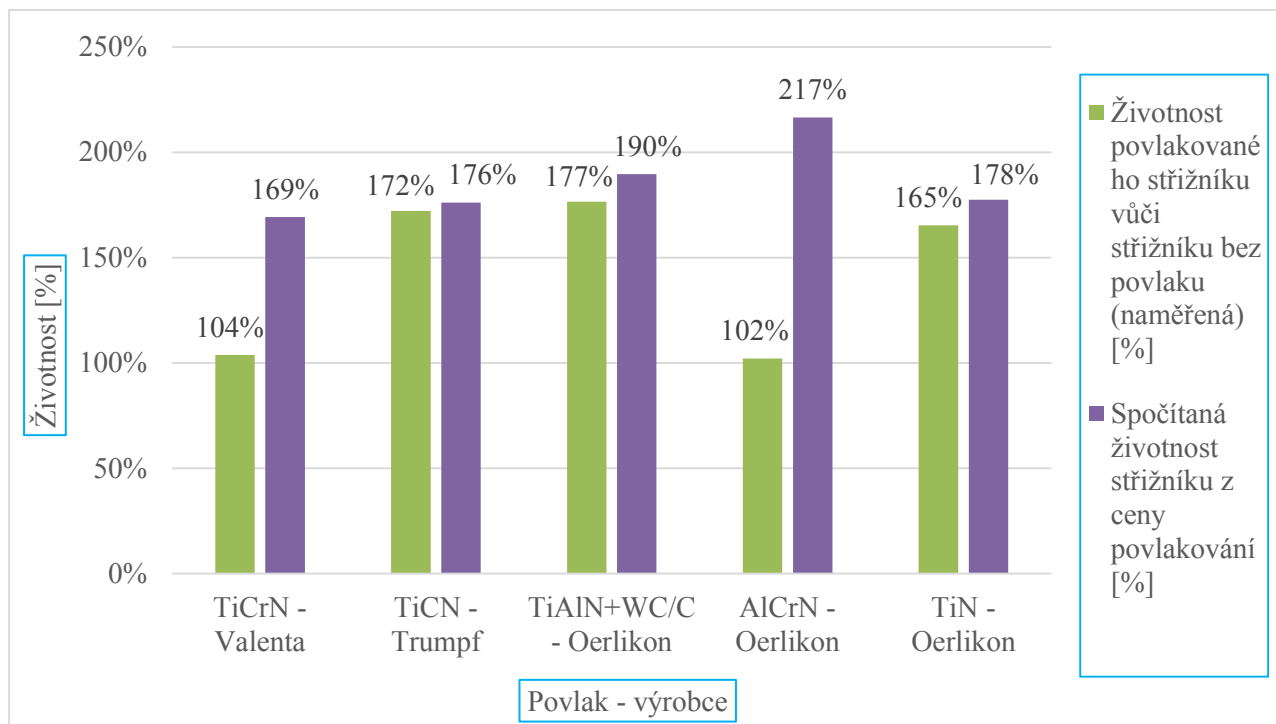
Obr. 56. Ekonomické zhodnocení povlakování pro obdélníkový (dělicí) střížník 76,2mm x 5,0mm.

U obdélníkových střížníků 76,2mm x 5,0mm je rentabilní kluzná vrstva TiAlN+WC/C a základní povlak TiN. Tedy je možné využít oba povlaky v praxi a výběr ať toho či onoho bude mírně ekonomicky výhodný. Výsledky dokresluje obrázek 56, kde převyšující naměřená životnost (zelený sloupec) oproti spočítané životnosti (fialový sloupec) ukazuje, že povlak je v tomto případně ekonomicky výhodný.

7.3.3 Ekonomické zhodnocení povlakování pro čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm

Tab. 11. Ekonomické zhodnocení povlakování pro čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm.

| Povlak - výrobce povlaku | Cena povlakování pro čtvercový razník 50,0mm x 50,0mm [Kč] | Cena nového střížníku (bez povlaku) [Kč] | Životnost povlakovaného střížníku vůči střížníku bez povlaku (naměřená) [%] | Spočítaná životnost střížníku z ceny povlakování [%] | Vyplatí se |
|--------------------------|--|--|---|--|------------|
| TiCrN - Valenta | 2000,00 | 2889 | 104% | 169% | NEPRAVDA |
| TiCN - Trumpf | 2198,00 | 2889 | 172% | 176% | NEPRAVDA |
| TiAlN+WC/C - Oerlikon | 2589,21 | 2889 | 177% | 190% | NEPRAVDA |
| AlCrN - Oerlikon | 3365,97 | 2889 | 102% | 217% | NEPRAVDA |
| TiN - Oerlikon | 2239,00 | 2889 | 165% | 178% | NEPRAVDA |



Obr. 57. Ekonomické zhodnocení povlakování pro čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm.

Čtvercové střížníky 50,0mm x 50,0mm není rentabilní povlakovat. Důvodem je vysoká cena povlakování, protože ceny povlakování se odvíjejí hlavně od hmotnosti (objemu) povlakovaného nástroje a tento typ střížníku je jeden z největších střížných nástrojů v rámci CNC dělení nástrojového systému Trumpf. Jak ukazuje obrázek 57, tak ve všech případech převyšuje spočítaná životnost (fialový sloupec) naměřenou životnost (zelený sloupec), takže povlakování tohoto typu střížníku je ekonomicky nevýhodné.

ZÁVĚR

Testování různých povlaků na vysekávacích nástrojích (střížnicích) probíhalo ve firmě EDP s.r.o. na standardní výrobě déle než jeden rok a za tuto dobu bylo vysekáno více než 10 milionů otvorů třemi různými typy střížníků, které se testu zúčastnily. Do testu vstoupilo celkem 5 povlaků, od nezákladnějšího TiN, přes TiCN, TiCrN, AlCrN, až po vícevrstvý kluzný povlak TiAlN + WC/C. Spolu s těmito povlaky byla puštěna do testu i sada střížníků bez povlaku pro následné porovnání se střížníky s povlaky. Takže celkem se testu zúčastnilo 18 střížníků.

Pro jehlové střížníky, malého průměru (v našem případě kruhový střížník \varnothing 3 mm) je povlakování v rámci výroby, kde testování probíhalo, ekonomicky nevýhodné. Tři ze šesti testovaných střížníků byly v průběhu testu zlomeny a ze zbylých tří byla získána nesusoudá data způsobená taky tím, na co se daný typ střížníku používá.

Nejobektivnější výsledky byly získány pomocí obdélníkových dělicích střížníků rozměru 76,2mm x 5,0mm. Zde nebyl problém se zničením nástrojů a skladba výroby umožňovala naměřit velké množství relevantních dat. Takže bylo možné porovnat životnost povlakových střížníků se střížníkem bez povlaku. Ovšem následné ekonomické hodnocení vyzdvihlo pouze základní povlak TiN a vícevrstvý kluzný povlak TiAlN+WC/C a to jen těsně (152% spočítané životnosti z ceny povlaku vůči 165% naměřené životnosti, respektive 150% vůči 177%).

U největších z testovaných střížníků (čtvercový 50,0mm x 50,0mm) bylo naměřeno málo dat na objektivní zhodnocení, protože výrobně je tento střížník používaný mnohem méně než předchozí střížník (v průběhu testu udělaly obdélníkové střížníky skoro 3,5 milionů děr, čtvercové pouze lehce přes 300 tisíc děr). A i následné ekonomické zhodnocení ukázalo, že je nerentabilní povlakovat tento typ střížníku z důvodu ceny povlaku (většinou vá část ceny povlakování se odvíjí od hmotnosti povlakovaného předmětu).

Ze všech pěti povlaků nejlépe obstál vícevrstvý kluzný povlak TiAlN+WC/C, což je pochopitelné z hlediska jeho nízkého koeficientu tření 0,15. Životnost střížníku s tímto povlakem se zvýšila o 177% oproti střížníků bez povlaku.

TiCN povlak zvýšil životnost o 172%, což je dobrý výsledek vzhledem k této monovrstvě s koeficientem tření 0,3. Ale nutno dodat, že výrobcem tohoto povlaku je firma

Trumpf, která se výrobou a povlakováním vysekávacích nástrojů zabývá mnoho let, takže byla jistě i výborná předúprava substrátu před nanesením tohoto jednovrstvého povlaku.

Nejzákladnější povlak TiN také velice dobře obstál a zvýšil životnost střížníku o 165%. Tyto výsledky lze opět zdůvodnit autorem povlaku, kterým je na trhu dlouho fungující Oerlikon Balzers. Koeficient třetí je tohoto povlaku 0,3.

Nejhůře dopadly oba povlaky s chromem (TiCrN a AlCrN), které životnost střížníku prakticky nezvýšily (104%, respektive 102% životnosti vůči střížníku bez povlaku). Toto selhání lze vysvětlit vyšším koeficientem třetí (okolo 0,4).

Povlakování je dobrý směr ke zvyšování produktivity výroby, ovšem v rámci této diplomové práce bylo zjištěno, že pro testované vysekávací (střížné) nástroje a zvolené povlaky je povlakování na hraně ekonomické výhodnosti, u většiny testovaných nástrojů a povlaků spíše ekonomicky nevýhodné.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Technologie plošného tváření - stříhání* [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm
- [2] VEJREK, Tomáš. *Návrh progresivní technologie výroby střížného nástroje: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 69 s., 9 příloh. Ing. Oskar Zemčík, CSc.
- [3] *Prášková metalurgie* [online]. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/Metalurgie.htm>
- [4] *Břítové destičky s TiN povlakem* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-nastroje-a-rezne-materialy.html>
- [5] *Střížník a střížnice firmy Trumpf* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/sluzby/vysekavaci-nastroje-a-prislusenstvi/vysekavaci-nastroje.html>
- [6] *Princip elektroerozivního obrábění* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2573
- [7] *Frézování* [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.prumysl.cz/seco-rozsiruje-produktovou-radu-frez-pro-frezovani-do-rohu-turbo-10/>
- [8] *Příklady výrobků z práškové metalurgie* [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/praskova_metalurgie.pdf
- [9] KANTAR, F. *PVD povlaky nové generace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš.
- [10] FOLTÝN, M. *Povlakované slinuté karbidy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [11] NĚNIČKA, Jakub. *Odstraňování původních povlaků řezných nástrojů před novým povlakováním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. s. 78, příloh 6. Doc. Ing. Anton Humár, CSc.

- [12] *Metoda PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)* [online]. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-nastroju-metodou-pacvd.html>
- [13] TUNA, J. *Metody povlakování řezných nástrojů: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 97 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [14] NOVOTNÝ, M. *Metody povlakování řezných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [15] MARŠÁLEK, Radek. *Navržení povlakovaných nástrojů pro technologii soustružení součásti "příruba"*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 42 s. 10 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.
- [16] PILLAI, R. Rajeev. *CVD and PVD Thin Film Techniques* [online]. Slideshare, Poslední úpravy 2010-05-26 [cit. 2015-02-06]. Dostupný z:
<http://www.slideshare.net/rpillairajeev/cvd-and-pvd-thin-film-techniques>.
- [17] DOLEŽAL, J. *Metody povlakování řezných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc..
- [18] BITTNER, J. *Metody povlakování řezných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 42s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [19] *Jednovrstvý povlak TiN* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z:
<http://www.umms.sav.sk/index.php?ID=679>
- [20] *Nové trendy vývoje tenkých vrstev vytvořených PVD a CVD technologií* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf
- [21] *Krystalická struktura diamantové vrstvy* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.chm.bris.ac.uk/pt/diamond/image/cvdtop.gif>

- [22] HUDEČEK, P. *Testování řezivosti nástrojů ze slinutých karbidů povlakovaných PVD nanokrystalickými kompozity*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 73 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [23] *Vysekávací stroj TruPunch 5000* [online]. In: . [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/vysekovani/vysekovaci-stroje/trupunch-5000.html>
- [24] *Kombinovaný dělicí stroj TruMatic 6000* [online]. In: . [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/obrabeni-vysekovanimlaserem/vysekovacilaserove-stroje/trumatic-6000.html>
- [25] *Kombinovaný dělicí stroj TruMatic 7000* [online]. In: . [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/obrabeni-vysekovanimlaserem/vysekovacilaserove-stroje/trumatic-7000.html>
- [26] PODSEDNÍK, J. *Výroba svařované součásti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 38 s. 4 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.
- [27] *Nové trendy v povlakování nástrojů* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf
- [28] KUDLÁČ, Lukáš. *Optimalizace procesu vysekávání na stroji TruPunch 1000*. Brno, 2015. 44 s, 1 výkres, 9 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.
- [29] *Dělicí střížná destička 76,2 mm x 5,0 mm* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: http://www.toplantis.cz/wp-content/uploads/trumpf_delici_nastroje.pdf
- [30] *Dělicí střížník 76,2 mm x 5,0 mm* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.clarkandosborne.com/resources/pdf/cetooling/sec7trumpf.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|--------------------------------|--|
| A | Ampér |
| Al | Hliník |
| Al ₂ O ₃ | Oxid hlinitý |
| AlCrN | Chrom nitrid hliník |
| Ar | Argon |
| C | Uhlík |
| CACVD | Cascade Arc Chemical Vapour Deposition |
| cm | Centimetr |
| Co | Kobalt |
| Cr | Chrom |
| CrN | Nitrid chromu |
| CVD | Chemical Vapour Deposition – chemická depozice z plynné fáze |
| ČSN | Česká státní norma |
| DLC | Diamond like carbon - uhlík podobný diamantu |
| EDP | European Data Project |
| EN | Evropská norma |
| fcc | Krychlová plošně středěná mřížka |
| g | Gram |
| GPa | Giga pascal |
| H ₂ | Molekula vodíku |
| HFCVD | Hot Filament Chemical Vapour Deposition |
| HIPIMS | High Power Impulse Magnetron Sputtering |
| HSS | High speed steel - rychlořezná ocel |
| HV | Tvrdomost dle Vickerse |
| CH ₃ CN | Acetonitril |
| CH ₄ | Methan |
| Kč | Koruna česká |
| kN | Kilo newton |
| kPa | Kilo pascal |
| kW | Kilo watt |
| LCVD | Laser Chemical Vapour Deposition |
| LICVD | Laser Induced Chemical Vapour Deposition |
| MHz | Megahertz |
| min | Minuta |
| mm | Milimetr |
| Mn | Mangan |
| Mo | Molybden |

| | |
|--------------------------------|---|
| MPa | Mega pascal |
| MTCVD | Middle Temperature Chemical Vapour Deposition |
| MW | Mega watt |
| MWPCVD | MicroWave Plasma Chemical Vapour Deposition |
| N | Dusík |
| N ₂ | Molekula dusíku |
| NbN | Nitrid niobu |
| NH ₄ | Amoniak |
| nm | Nanometr |
| Ø | Průměr |
| O ₂ | Molekula kyslíku |
| P | Fosfor |
| Pa | Pascal |
| PACVD | Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition |
| PECVD | Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition |
| PVD | Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování/naprašování |
| Re | Mez pevnosti v kluzu |
| RF | Radiová frekvence |
| Rm | Mez pevnosti v tahu |
| S | Síra |
| Si | Křemík |
| Si ₃ N ₄ | Nitrid křemičitý |
| Ta | Tantal |
| TiAlN+WC/C | Vícevrstvý povlak TiAlN s kluznou vrstvou WC/C |
| TiC | Karbid titanu |
| TiCl ₄ | Chlorid titaničitý |
| TiCN | Karbo nitrid titan |
| TiCrN | Chrom nitrid titan |
| TiN | Nitrid titanu |
| TiO | Oxid titanu |
| TiZrN | Zirkon nitrid titan |
| V | Volt |
| W | Wolfram |
| WC | Karbid wolframu |
| µm | Mikrometr |
| µm/h | Mikrometr za hodinu |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|----------|--|----|
| Obr. 1. | Schéma principu stříhání | 12 |
| Obr. 2. | Břitové destičky s TiN povlakem | 10 |
| Obr. 3. | Střížník a střížnice firmy Trumpf | 14 |
| Obr. 4. | Princip elektroerozivního obrábění | 15 |
| Obr. 5. | Frézování | 14 |
| Obr. 6. | Příklady výrobků z práškové metalurgie | 16 |
| Obr. 7. | Schéma postupného vzniku povlaku | 17 |
| Obr. 8. | Princip povlakovacího zařízení pro metodu CVD | 19 |
| Obr. 9. | Schéma metody PACVD | 20 |
| Obr. 10. | Schéma metody PECVD | 21 |
| Obr. 11. | Schéma povlakovacího zařízení metody HFCVD | 22 |
| Obr. 12. | Princip metody LCVD | 23 |
| Obr. 13. | MWPCVD reaktor | 24 |
| Obr. 14. | Princip metody PVD | 27 |
| Obr. 15. | Schéma odporového napařování | 28 |
| Obr. 16. | Schéma katodové skvrny | 29 |
| Obr. 17. | Schéma indukčního napařování | 30 |
| Obr. 18. | Schéma napařování elektronovým paprskem | 31 |
| Obr. 19. | Schéma napařování doutnavým výbojem rovinné diody | 32 |
| Obr. 20. | Vyvážený a nevyvážený magnetron | 33 |
| Obr. 21. | Schéma radiofrekvenčního napařování | 34 |
| Obr. 22. | Schéma metody HIPIMS | 35 |
| Obr. 23. | Schéma nanášení povlaku TiCN obloukovou iontovou implantací | 36 |
| Obr. 24. | Jednovrstvý povlak TiN | 39 |
| Obr. 25. | Vícevrstvý povlak TiN – Al ₂ O ₃ – TiCN | 40 |
| Obr. 26. | Multivrstevný systém TiN – TiCN | 40 |
| Obr. 27. | Šíření trhliny | 43 |
| Obr. 28. | Krystalická struktura diamantové vrstvy | 44 |
| Obr. 29. | Nanovrstva | 41 |
| Obr. 30. | Schéma nanokompozitní struktury AlTiN – Si ₃ N ₄ | 42 |
| Obr. 31. | Struktura DLC v porovnání s diamantem a grafitem | 45 |
| Obr. 32. | Vysekávací stroj TruPunch 5000 | 49 |
| Obr. 33. | Kombinovaný stroj TruMatic 7000 | 50 |
| Obr. 34. | Sada testovaných střížníků | 48 |
| Obr. 35. | Plechové svitky | 51 |
| Obr. 36. | Jehlový kruhový střížník | 52 |
| Obr. 37. | Nástrojová sestava (kazeta) | 49 |

| | | |
|----------|---|----|
| Obr. 38. | Dělicí destička s držákem | 52 |
| Obr. 39. | Dělicí střížník | 52 |
| Obr. 40. | Čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm | 53 |
| Obr. 41. | Dělicí destička 76,2mm x 5,0mm s povlakem TiCrN | 54 |
| Obr. 42. | Čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm s povlakem TiCN od firmy Trumpf | 54 |
| Obr. 43. | Kruhový střížník Ø3 mm s povlakem TiAlN + WC/C firmy Oerlikon | 55 |
| Obr. 44. | Povlak AlCrN nanesený na dělicí destičce 76,2 mm x 5,0 mm | 55 |
| Obr. 45. | Střížník 50,0 mm x 50,00 mm z HSS výrobce Trumpf | 56 |
| Obr. 46. | Dělicí výměnná destička 76,2mm x 5,0mm s povlakem TiN od firmy Oerlikon | 56 |
| Obr. 47. | Zlomený kruhový střížník Ø 3 mm s povlakem TiCN | 57 |
| Obr. 48. | Tupá dělicí destička (obdélníkový dělicí střížník) rozměru 76,2 mm x 5,0 mm bez povlaku | 58 |
| Obr. 49. | Čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm s povlakem TiN | 59 |
| Obr. 50. | Odpad plechu a na něm označeny (červeně) předseknuté díry střížníkem Ø 3mm | 62 |
| Obr. 51. | Porovnání životnosti povlaků u střížníků 76,2mm x 5,0mm | 63 |
| Obr. 52. | Porovnání životnosti povlaků u kruhových střížníků Ø3 mm | 61 |
| Obr. 53. | Porovnání životnosti povlaků u čtvercových střížníků 50,0mm x 50,0mm | 64 |
| Obr. 54. | Porovnání životnosti povlakovaných střížníků vůči střížníku bez povlaku | 65 |
| Obr. 55. | Ekonomické zhodnocení povlakování pro kruhový střížník Ø 3 mm | 67 |
| Obr. 56. | Ekonomické zhodnocení povlakování pro obdélníkový (dělicí) střížník 76,2mm x 5,0mm | 68 |
| Obr. 57. | Ekonomické zhodnocení povlakování pro čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm | 69 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|----------|---|----|
| Tab. 1. | Nástrojové oceli používané pro výrobu střížníků a střížnic | 13 |
| Tab. 2. | Porovnání PVD metod napařování a napařování | 26 |
| Tab. 3. | Chemické složení oceli ČSN 11 321 | 51 |
| Tab. 4. | Mechanické vlastnosti oceli ČSN 11 321 | 51 |
| Tab. 5. | Data z testování povláknutých střížníků Ø 3 mm | 61 |
| Tab. 6. | Data z testování povláknutých obdélníkových (dělicích) střížníků 76,2mm x 5,0mm | 62 |
| Tab. 7. | Data z testování povláknutých čtvercových střížníků 50,0mm x 50,0mm | 64 |
| Tab. 8. | Procentuální životnost povlakovaného střížníku vůči střížníku bez povlaku (obdélníkové dělicí střížníky 76,2mm x 5,0mm) | 65 |
| Tab. 9. | Ekonomické zhodnocení povlakování pro kruhový střížník Ø 3 mm | 66 |
| Tab. 10. | Ekonomické zhodnocení povlakování pro obdélníkový (dělicí) střížník 76,2mm x 5,0mm | 67 |
| Tab. 11. | Ekonomické zhodnocení povlakování pro čtvercový střížník 50,0mm x 50,0mm | 68 |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 DVD