



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POVLAKOVÁNÍ STŘIŽNÝCH NÁSTROJŮ ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ

On the coating of shearing cemented carbide tools

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADANA NOVÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radana Nováková

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

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Povlakování střížných nástrojů ze slinutých karbidů

v anglickém jazyce:

On the coating of shearing cemented carbide tools

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza možností zvýšení výkonnosti střížných nástrojů ze slinutých karbidů na měděné materiály pomocí povlakování

Cíle diplomové práce:

Úvod

1. Teoretický rozbor problému
2. Navržené varianty řešení povlakování
3. Experimentální zkoušky
4. Diskuze výsledků
5. Závěry

Seznam odborné literatury:

M.G.J. Veprek-Heijman, S. Vepřek. Industrial applications of superhard nanocomposite coatings. *Surface & Coatings Technology* 202 (2008), pp. 5063-5073

Veprek, S., Veprek-Heijman, M.J.G., Holubář, P., Cselle, T., Galassi, I., Píška, M. Applications of Hard and Superhard Nanocomposite Coatings on Tools for Machining, Forming and Stamping - A Guide for SMEs, 3/2011; VINF (The Virtual Institute of Nano Films)

Musil, J.: Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness. *Surface & Coatings Technology* 207 (2012), pp.50–65.

Sam Zhang, Deen Sun, Yongqing Fu, Hejun Du. Recent advances of superhard nanocomposite coatings: a review *Surface and Coatings Technology* 167, (2003), pp. 113–119

HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

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

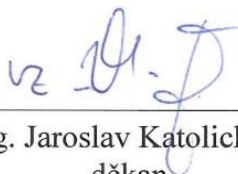
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 4. 12. 2014



vz. 

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

vz. 

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou PVD povlakování střížných nástrojů ze slinutých karbidů, se zaměřením na zvýšení životnosti postupových nástrojů. Především poukazuje na využití povlakovaných nástrojů v praxi a procesních kroků před a po procesu povlakování. V teoretické části jsou popsány obě základní metody povlakování, tj. fyzikální metoda PVD a metoda CVD, založena na chemickém procesu. Dále jsou představeny jednotlivé způsoby vlastních procesů povlakování se stručným popisem výhod i nevýhod jejich využití. Praktická část je zaměřena na testování, jehož podstatou byl nejen vhodný výběr samotného povlaku pro daný materiál, ale i úpravy před a po povlakování, které jsou často opomínány. Ty jsou však nezbytnou součástí a mají výrazný vliv nejen na výsledný povlak, ale i na kvalitu pracovního procesu. Vyhodnocením experimentu je souhra určení nejproduktivnějšího povlaku v závislosti na dané úpravě.

Klíčová slova

Slinutý karbid, CVD Metoda, PVD Metoda, Úpravy před povlakování, Úpravy po povlakování, Postupový nástroj, Analýza použitých povlaků.

ABSTRACT

This Master's thesis describes coating issue for cutting tools from cemented carbide with focus of increasing progressive tool life-time. Especially it points on using of coated tools in practice and procedure steps before and after coating process. In theoretical part are described both coating methods, it is Physical Method of Coating – PVD and CVD Method, which is based on Chemical Process. Single ways of self-process are introduced by briefly description of advantages and disadvantages for their using. The Practice part was focused on testing, whose principle was not only the choice of coat for engaged material, but also pre-deposition modification and modifications after coating, which are very often forgotten. However the modifications are necessary part of coating process and have important influence not only on finish coat, but also on working process quality. The result of experiment is determination summary of the most productive coat in dependence on performed modifications.

Key words

Hard Metal, CVD Method, PVD Method, Pre-deposition modification, Modification after coating, Progressive tool, Analysis of used coats.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁKOVÁ, Radana. *Povlakování střížných nástrojů ze slinutých karbidů*. Brno 2015. 9 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Odbor technologie obrábění. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Povlakování střížných nástrojů ze slinutých karbidů** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Radana Nováková

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. a odbornému konzultantovi Ing. Ondřeji Zindulkovi z firmy SHM, s.r.o. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce. Zejména také děkuji Michalovi Fišerovi z firmy SHM, s.r.o. Šumperk a Jiřímu Mynaříkovi ze společnosti TE Connectivity z oddělení Stamping za možnost realizace.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

| | |
|--|----|
| ÚVOD | 10 |
| DEFINOVÁNÍ CÍLŮ | 12 |
| 1 SLINUTÉ KARBIDY | 13 |
| 1.1 Historický vývoj | 13 |
| 1.2 Úvod do slinutých karbidů..... | 14 |
| 2 NEPOVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY | 15 |
| 2.1 Výroba..... | 15 |
| 2.2 Mechanické vlastnosti..... | 16 |
| a) Tvrdost..... | 16 |
| b) Lomová houževnatost..... | 17 |
| c) Pevnost v ohybu..... | 17 |
| d) Pevnost v tlaku..... | 17 |
| e) Pevnost v tahu..... | 17 |
| 3 POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY | 18 |
| 3.1 CVD Metoda | 20 |
| 3.2 PVD Metoda..... | 22 |
| 4 TECHNOLOGIE ÚPRAV NÁSTROJŮ PŘED A PO POVLAKOVÁNÍ | 36 |
| 4.1 Volba materiálu..... | 36 |
| 4.2 Vybroušení nástroje | 37 |
| 4.3 Úprava ostří..... | 37 |
| 4.4 Mokrý čištění..... | 37 |
| 4.5 Chemické čištění (odmaštění) | 39 |
| 4.6 Iontové čištění | 39 |
| 4.7 Pískování (mikro-pískování)..... | 40 |
| 4.8 Stripping (redepozice)..... | 40 |
| 4.9 Integrita povrchu součásti | 40 |
| 5 VLASTNOSTI POVLAKŮ A JEJICH POSOUZENÍ | 42 |
| 5.1 Vlastnosti povlaků..... | 42 |
| 5.2 Měření vlastností povlaků..... | 43 |

| | | |
|-----|---|----|
| 6 | PROCES STRÍHÁNÍ | 47 |
| 6.1 | Úvod | 47 |
| 6.2 | Princip technologie..... | 47 |
| 7 | EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 48 |
| 7.1 | Podmínky experimentu | 48 |
| 7.2 | Popis Experimentu | 51 |
| 7.3 | Výsledky experimentu – první fáze | 53 |
| 7.5 | Grafický souhrn výsledků z jednotlivých fází testování..... | 55 |
| 8 | TECHNICKO EKONOMICKÉ HODNOCENÍ | 56 |
| 9 | DÍLČÍ POZNATKY | 57 |
| 10 | ZÁVĚR | 58 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 59 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH symbolů..... | 64 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH zkratk..... | 65 |

ÚVOD

Slinuté karbidy (SK) se pro postupové střížné nástroje používají zejména pro funkční části nástrojů pro sériovou a hromadnou výrobu výstřížků. Celkové náklady nástroje na výrobu jednoho výstřížku jsou v porovnání s nástrojovými oceli menší, přestože pořizovací cena je vyšší. Především je to díky vyšší trvanlivosti, kvalitě výlisků a menším nákladům na údržbu. Z hlediska mechanických vlastností mají SK až dvakrát vyšší pevnost v tlaku, než kalená nástrojová ocel. Pro postupové nástroje se používají převážně slinuté karbidy skupiny K, které jsou na bázi karbidu wolframu a kobaltu.

Pro práci bylo zvoleno téma „Povlakování střížných nástrojů ze slinutých karbidů“. K tomuto rozhodnutí přispěla skutečnost, že v současné době pracuji v této oblasti pro oddělení Stamping ve společnosti Tyco Electronics Czech s.r.o. v Kuřimi, které se touto problematikou zabývá.

Tyco Electronics Czech s.r.o. je součástí společnosti TE Connectivity, která se zaměřuje na výrobu a distribuci produktů pro nejrůznější průmyslové oblasti. Pobočka v Kuřimi se specializuje na produkci kabelové a konektorové techniky pro automobilový průmysl (Škoda, Opel, Volkswagen, BMW, a další.), včetně pojistkových systémů pro hybridní automobily i elektromobily.

Praktická část je zaměřena na mechanismus opotřebení povlakovaného střížného nástroje a jeho vliv na výsledný produkt. Příkladem mechanického opotřebení v operaci stříhání, je zejména destrukce hran nástroje, kdy dochází k vylamování částic z materiálu. V první fázi byl proveden rozbor přebrušování v intervalech (vizuální kontrola), odolnosti povlaku vůči abrazi (kontrola střížné vůle) s následným vyhotovením analýzy opotřebení nástroje (porovnání střížného nástroje před a po jeho použití), dle které byl zvolen optimální povlak pro tuto operaci.

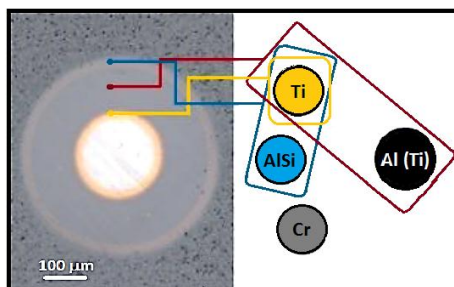
Jako společnost zprostředkující povlakování nástrojů pro operace stříhání, byla zvolena SHM Šumperk, která se v posledních letech zabývá aplikací povlaků pro rozvíjející se oblast tvářecích nástrojů nebo také forem pro tlakové lití hliníku.

Společnost SHM (Super Hard Materials = Velmi tvrdé materiály) s působením v ČR, na Slovensku a v Polsku, se specializuje na přípravu PVD povlaků, které jsou rozšířené do všech průmyslových aplikací. Pracuje především s vlastními patentovanými technologiemi – odpařováním pomocí nízkonapěťového oblouku a magnetickým naprašováním. Jedná se o povlaky s velice malou tloušťkou, od jednoho do pěti mikrometrů. Vysoká produktivita obrábění ale i zvýšení odolnosti je umožněno především díky vysoké tvrdosti, tepelné i chemické odolnosti.

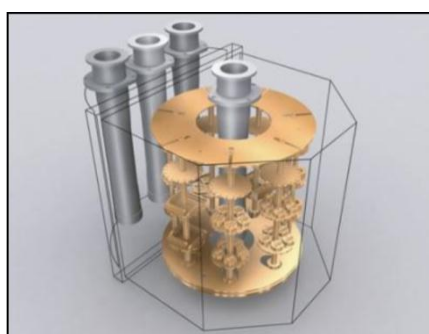
Pod názvem SHM byla firma založena roku 1993 a je dceřinou společností firmy PIVOT, která vyrábí PVD povlakovací zařízení a zaštiťuje jejich prodej přes druhou mateřskou společnost PLATIT do celého světa. Zařízení vyráběná v Šumperku jsou aktuálně v 35 zemích a jejich počet stále roste.

Firma se také zaměřuje na povlaky s nanokompozitní strukturou na bázi chromu a hliníku pro tvářecí nástroje, tvářecí formy i na tlakové lití hliníku. Technologie vyvinutá odborníky ze Šumperka představuje ve světě tu nejvyšší laťku a pro mnohé nedosažitelný vrchol. Aktuálně firma SHM nabízí 10 základních druhů povlaku vytvořených metodou PVD (Marwin, Alwin, Darwin, a jiné). Roku 2008 představila společnost nový typ povlaku – Triple Coatings³ (Povlak TripleCoatings³ TiN + AlTiN + TiAlSiN.²⁹) vyvinutých přímo touto společností v zařízení Pi300 (Obr. 2), využívajícím 3+1 katodu. Tři LARC katody (Lateral Rotating Cathodes) jsou umístěny ve dveřích a jedna, onačena jako CERC

(Central Rotating Cathode) je, jak již vyplývá z názvu, umístěna v centru povlakovací komory. Tyto povlaky jsou připravovány pomocí obloukové technologie, která využívá rotující, především neslitinové targety.^{29,30,31}



Obr. 1 Povlak TripleCoatings3 TiN + AlTiN + TiAlSiN.²⁹



Obr. 2 Povlakovací zařízení Pi300.²⁹

Výzkum a vývoj nových aplikací – Od roku 2012 je výzkum a vývoj zaměřen na povlaky pro nové a netradiční aplikace (zejména pro nástroje určené k tváření). Vývoj bude také zaměřen na velmi hladké a tvrdé povlaky a povlaky s nízkým koeficientem tření.

Aktuálně se společnost zaměřuje na výzkum v oblasti nanokompozitních povlaků (SHM byla světově první firma, která tyto supertvrdé povlaky byla schopná vytvořit, a to již od roku 1996), vliv obsahu kyslíku na jejich strukturu a vlastnosti, společně s Technickou univerzitou v Mnichově, konkrétně s Prof. S. Vepřekem. Ve vývoji mají podporu různých výzkumných institutů, vysokých škol (například Masarykova univerzita v Brně) i průmyslových partnerů, nejen v ČR, ale i po celé Evropě. V České republice firma nejvíce spolupracuje se zákaznickou společností Pramet Tools, pro kterou jsou hlavním dodavatelem PVD povlaků. Společnost se řídí dle standardů ISO 9001.

Hlavním zaměřením firmy je služba povlakování nástrojů zákazníků. Žádané moderní PVD povlaky pro nástroje vykazují od spotřebitelů vysoké nároky na kvalitu, široký sortiment a včasné dodržení termínů.³⁰

DEFINOVÁNÍ CÍLŮ

Diplomová práce se zabývá oblastí povlakování střížných nástrojů ze slinutých karbidů, s úmyslem zvýšení jejich efektivity a využití pro zvýšení životnosti postupových nástrojů. Je poukázáno na vlastnosti a procesní kroky v průběhu povlakování, jako jsou modifikace před a po povlakování. U těchto jednotlivých kroků budou analyzovány vlivy na výslednou kvalitu testovaných povlaků, se zaměřením na dosažení nejvyšší jakosti.

Dílčí cíle – navrhovaný experiment prověří jednotlivé typy úprav i povlaků z hlediska počtu vyrobených kusů do prvního přebroušení, chodu střížníku v matrici i kvalitu stříhu kontaktu:

1. Úpravy

- Ruční leštění (Ra 0,05 μm),
- Aero Lap – obdoba pískování (konečná po-úprava),
- Mokré pískování (Ra 0,1 μm),
- Bez úprav.

2. Typy povlaků

- CrAlSiN (obchodní označení Alwin),
- TiCN Plus.

Výstupem práce bude určení optimálního procesu povlakování a jeho aplikace pro proces stříhání. Přínosem je zvýšení efektivity střížného procesu, zlepšení kvality stříhaných ploch, navýšení trvanlivosti střížníku, doprovázené nižšími pořizovacími náklady na nástroj a tím i nižší cenou produktu.

1 SLINUTÉ KARBIDY

1.1 Historický vývoj

Na konci 19. století Henri Moisson (Paříž 1897) francouzský chemik a nositel Nobelovy ceny za chemii v roce 1906, učinil zajímavý objev. Zjistil, že smísením práškového wolframu a uhlíku by mohl vytvořit novou sloučeninu. Sloučenina, která byla ohřívána v elektrické obloukové peci, speciálně navržené Moissonem, vytvořila nový materiál, který byl obzvláště tvrdý a odolný proti opotřebení. Nicméně tento materiál byl příliš křehký, což však vyřešil v roce 1914 Karl Schröter.³

V té době pracoval jako výzkumný pracovník pro německou Společnost Osram. Snažil se najít nové materiály, které by mohly být použity jako žhavicí vlákno pro elektrická světla žárovek. Vlákná byla dělena použitím ocelového stroje, který v průběhu času získával větší řezný bod. Schröter dostal za úkol najít materiál, který byl odolnější při dělení wolframu než ocel.³

Po různých pokusech bylo nalezeno řešení - směs wolframu a kobalt, což otevřelo cestu k objevu nového materiálu. Při vývoji materiálu pro průvlaky k tažení drátu zjistil, že smícháním WC s kovem jako je nikl nebo kobalt (s mikrozrnnou strukturou), získal ohřevem vylisovaného celku nad teplotu 1300°C ve vodíkové atmosféře výrobek s nízkou pórovitostí, vynikající houževnatostí, značnou tvrdostí a pevností.³

Tento materiál byl poprvé použit při výrobě řezných nástrojů Krupp, německých železáren, v roce 1927 pod značkou "Widia" (wie Diamant - jako Diamand). Roku 1927 představila společnost karbid Widia N s 6% Co (později označen G1 v německé normě). V letech 1930-1932 karbid G2 a G3 s vyšším obsahem kobaltu (G2 - 11%, G3 - 15%). Další typ byl nazván H1, který měl stejné složení jako G1, ale jeho struktura měla jemnější zrna. Roku 1931 vznikl karbid na bázi dvou karbidů, označený Widia X (86,5% WC + 8,5% TiC + 5% Co). Produkce slinutých karbidů od ostatních firem byla postavena na bázi německých patentů na karbidy typu WC-Co.³

Později byly karbidy vyráběné na bázi WC a TaC s pojivem Co + Ni užívány dlouhou dobu v USA. V Evropě byly poté zvoleny analogické materiály - karbidy typu WC-TiC-Co. Historický vývoj slinutých karbidů prakticky probíhal ve dvou směrech. První směr byl zaměřen na výrobu materiálů, které karbid wolframu obsahovaly, naopak ve druhém směru byla snaha o jeho úplné vyloučení ze struktury (v současnosti jsou tyto materiály separátní skupinou a nesou označení „cermety“).¹

Konec 60. let byl pro vývoj slinutých karbidů převratný. V této době již byla struktura karbidů jemnozrnná a rovnoměrná (původní zrna karbidů dosahovala velikosti 2-3 μm, nová jemnozrnná struktura měla zrna velikosti pod 1 μm). Velikost zrn nejnovějších druhů SK dosahuje pod 0,5 μm. Jemnozrnná struktura značně ovlivňuje mechanické vlastnosti jako je např. pevnost, která se s jemnějším zrnem zvyšuje.¹

Dalším významným přínosem při vývoji slinutých karbidů bylo umožnění řízení množství uhlíku, jehož stechiometrický obsah v WC je 6,12 hmotnostních %. Pokud jeho obsah tuto hodnotu převyšuje, vzniká ve struktuře volný uhlík, který způsobuje snížení pevnosti materiálu. Uhlík celkově má značný vliv na mechanické vlastnosti jako je tvrdost či pevnost v ohybu a to i přes vykazování běžné struktury. To mělo za následek zpřesnění obsahu uhlíku na rozmezí od 0,02 do 0,03%, které je platné do dnes.¹

1.2 Úvod do slinutých karbidů

Slinuté karbidy jsou materiály vyráběné práškovou metalurgií, která se využívá především k výrobě předmětů s takovými fyzikálními a technologickými vlastnostmi, jež nelze získat běžnými výrobními způsoby, nebo tehdy, je-li využití této metody ekonomicky výhodnější, ať už z hlediska složitosti, náročnosti či množství výrobků.^{1,2}

Tyto materiály jsou především směsí částic karbidu wolframu (WC) a kovového pojiva na bázi kobaltu (Co), popřípadě niklu (Ni). Kobalt je nekarbidotvorný prvek, který tvoří pojivo mezi zrny karbidů. WC vytváří s kobaltem pevné vazby, díky čemuž je vytvořené pojivo houževnaté a tím zvyšuje pevnost SK v ohybu. Velikost zrna WC a obsah pojiva jsou podstatnými parametry ovlivňujícími tvrdost / houževnatost a odolnost proti plastické deformaci. Při vyšším obsahu pojiva se zvýší houževnatost, která současně snižuje odolnost vůči plastické deformaci. Naopak nízký obsah pojiva může způsobit křehkost daného materiálu. Kromě výše uvedených směsí jsou podstatnou součástí příměsí kubického karbonitridu titanu (TiCN). Tyto karbonitridy (termochemické difúzní sycení dusíku, uhlíku a kyslíku), nazývané též jako γ -fáze, zvyšují tvrdost a odolnost proti opotřebení za vysokých teplot.^{1,2}

Přehled karbidů z těžkých kovů viz Tab. 1 :

Tab. 1 Přehled karbidů z těžkých kovů:¹

| Typ karbidu | Vlastnosti |
|---|--|
| WC | Tvrdost za vysokých teplot, chemická stálost a odolnost proti opotřebení. |
| TiC, TaC, NbC, Cr ₃ C ₂ , VC. | Tvrdost a chemická stálost za vyšších teplot, zjemňuje strukturu, snižuje pevnost v ohybu, zvyšuje křehkost, zhoršuje tepelnou vodivost. |

Slinuté karbidy jsou považovány za nejpevnější mezi tvrdými nástrojovými materiály a mohou být použity pro obrábění vysokými posuvovými rychlostmi i pro náročné přerušované řezy. Problém ovšem nastává při využití pro vysoké řezné rychlosti, kdy mají nízkou termochemickou stabilitu.^{1,2}

Kromě slinutých karbidů se pro střížné nástroje používá také nástrojová ocel, která získá po příslušném tepelném zpracování vlastnosti vhodné právě pro operace stříhání, jako je tvrdost, pevnost a rozměrová stálost.^{1,2}

2 NEPOVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

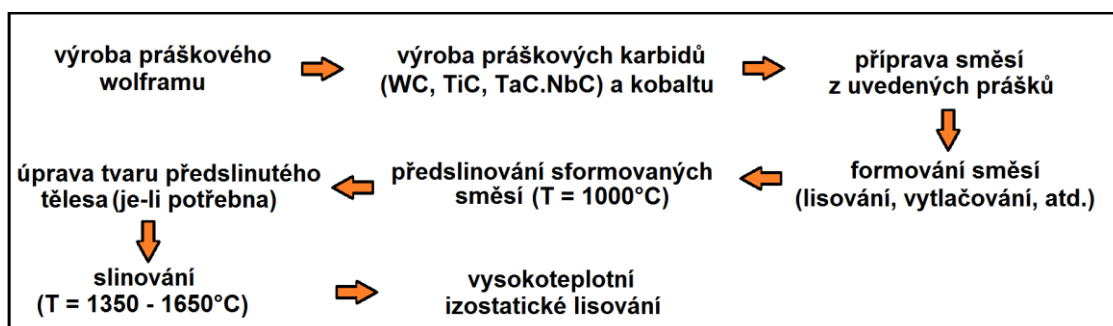
Běžně jsou slinuté karbidy rozděleny do 6 skupin označených písmenem a příslušnou barvou dle normy ISO 513 (viz Tab. 2). Toto dělení je založeno na druhu materiálů, které jsou jimi obráběny. Hlavní skupiny jsou dále děleny do aplikačních skupin označených písmenem hlavní skupiny a klasifikačním číslem, které vyjadřuje charakteristiku řezné rychlosti, posuvu, otěruvzdornosti a houževnatosti. S rostoucím číslem roste posuv a houževnatost SK, ale klesá řezná rychlost a otěruvzdornost SK.

Tab. 2 Použití slinutých karbidů dle skupin.

| Typ skupiny | Použití |
|-------------|--|
| K | Pro materiály tvořící krátkou třísku. Šedá, temperovaná, kokilová litina a litina s globulárním grafitem. |
| P | Pro materiály tvořící dlouhou třísku. Nelegovaná, slitinová a korozivzdorná ocel. |
| M | Pro materiály tvořící krátkou i dlouhou třísku. Lité, manganové a korozivzdorné oceli, tvárné litiny. |
| N | Pro neželezné kovy a jejich slitiny. |
| S | Pro obrábění žáruvzdorných a žárupevných slitin na bázi železa, titanu, niklu a těžce obrobitelných slitin. |
| H | Pro vysoce tvrdé, kalené oceli a litiny. Dobrá tepelná odolnost. |

2.1 Výroba

Jak již bylo zmíněno, slinuté karbidy jsou produktem práškové metalurgie, která umožňuje získávat výrobky se speciálními vlastnostmi (otěruvzdornost, žáruvzdornost, žárupevnost, a jiné), kterých nemůžeme docílit jinou technologií. Prášková metalurgie se zabývá výrobou prášků a jejich zhutňování (lisování a slinování) do konstrukčních materiálů či součástí. Vlastní proces výroby slinutých karbidů je potom založen na lisování směsi prášku tvrdých karbidických částic s práškem pojícího kovu, zejména kobaltu s následným slinováním na teplotu blízkou bodu tavení. Celý proces výroby slinutých karbidů je uveden na Obr. 3.

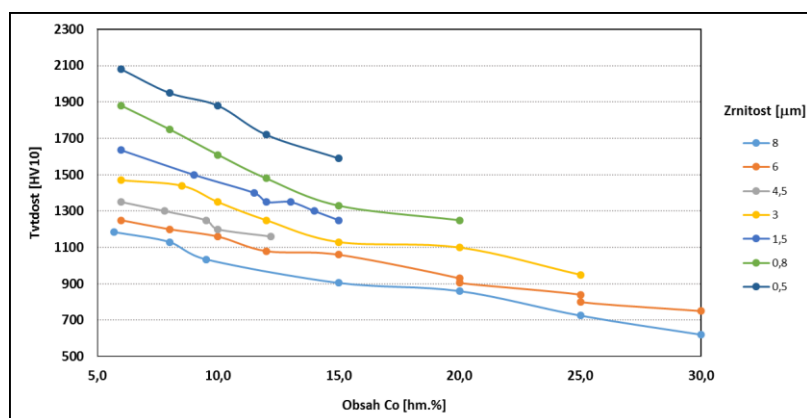


Obr. 3 Schéma výroby slinutých karbidů. ⁴

2.2 Mechanické vlastnosti

a) Tvrdost

Na tvrdost slinutých karbidů má výrazný vliv struktura karbidické fáze, tj. velikost zrn a obsah pojiva – kobaltu. Pojivo samotné není výrazně tvrdé, jeho tvrdost dosahuje 200HV. Je dobře známo, že nanostrukturované materiály vykazují vyšší tvrdost než struktury hrubých materiálů stejného složení (s jemnější strukturou tvrdost roste). Závislost slinutých karbidů na obsahu pojiva ve struktuře je zobrazena na Obr. 4. Z grafu je zřejmé, že při stejném obsahu kobaltu, ale jemnější zrnitosti, tvrdost roste. V posledních dvou desetiletích bylo kladeno velké úsilí k dosažení nanostruktury karbidu wolframu.



Obr. 4 Graf závislosti tvrdosti SK na obsahu pojiva (Co) a velikosti karbidických zrn. ⁶

Je však třeba zdůraznit, že je zde i druhá relevantní vlastnost slinutých karbidů – lomová houževnatost, s jejímž vzrůstem se tvrdost snižuje. To znamená, že cílem je získat vysoké hodnoty obou těchto parametrů pro zlepšení výkonnosti (životnost, odolnost). Vlastnosti slinutých karbidů s nanostrukturou jsou zobrazeny v Tab. 3.

Tab. 3 Vlastnosti SK (WC-10Co-0.25VC-0.45Cr₃C₂) s nanostrukturou. ⁷

| Tvrdost [HV30] | Lomová houževnatost K_{IC} [MPa m ^{1/2}] | Velikost zrna [nm] |
|----------------|--|--------------------|
| 1 632 | 8,56 | 352 |
| 1 703 | 8,90 | 425 |
| 1 719 | 7,45 | 360 |
| 1 745 | 10,90 | 369 |
| 1 746 | 7,89 | 365 |
| 1 763 | 11,57 | 344 |
| 1 789 | 11,21 | 382 |
| 1 789 | 11,71 | 380 |
| 1 795 | 11,72 | 310 |
| 1 811 | 9,26 | 308 |
| 1 812 | 9,81 | 339 |
| 1 818 | 9,54 | 336 |
| 1 832 | 10,68 | 362 |
| 1 985 | 10,97 | 338 |

Mezi další ovlivňující faktory tvrdosti patří teplota pracovního procesu. Ta je při obrábění SK vysoká díky velkým řezným rychlostem. S takto rostoucí teplotou tvrdost SK klesá. Tento fakt je způsoben vlastností pojiva, jehož bod tavení je nižší než bod tavení karbidických částic (pojivo má bod tavení kolem 1500°C, bod tavení WC se pohybuje okolo 2600°C). ⁵

b) Lomová houževnatost

Lomová houževnatost, která je vyjádřena kritickým součinitelem intenzity (K_{IC}), charakterizuje odpor materiálu proti křehkému porušení za přítomnosti ostré trhliny. Je podstatným faktorem u všech nástrojů, které jsou namáhány vlivem odporu obráběného materiálu, což má za příčinu zvýšení pravděpodobnosti vzniku porušení. Zkouší se postupným zatěžováním zkušebního tělesa opatřeného vrubem a prodlouženou únavovou trhlinou až do lomu při dané teplotě.

Výpočet je založen na rozměrech vtisku, při měření tvrdosti a parametřů tohoto měření dle výpočtového vztahu (1).

$$K_{IC} = A \cdot \sqrt{\frac{H \cdot P}{\Sigma l}} \quad [MPa \cdot m^{\frac{1}{2}}], \quad (1)$$

Kde: A [-] je konstanta,

H [$N \cdot mm^{-2}$] je tvrdost,

P [N] je zatížení,

Σl [mm] je součet délek trhlin.

Hodnota lomové houževnatosti je konstantní v rozmezí teplot 500 až 700°C, kdy po překročení těchto hodnot enormně vzrůstá. Dále je její růst závislý na obsahu pojiva a velikosti zrn. S rostoucím obsahem pojiva a hrubším zrnem roste i lomová houževnatost. Výpočet lomové houževnatosti je závislý také na hodnotách tvrdosti, proto ji ovlivňuje i způsob slinování.⁸

c) Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu slinitých karbidů je rovněž závislá především na obsahu pojiva, s jehož vzrůstem stoupá. Tato závislost ovšem není lineární. Při daném obsahu pojiva dosáhne pevnost v ohybu svého maxima a s přibývajícím obsahem pojiva naopak klesá. Velikost karbidických zrn je rovněž závislá na hodnotě pevnosti ohybu, avšak opět do určité velikosti zrn. Obecně čím menší je velikost zrn, tím je pevnost v ohybu větší. Dalším ovlivňujícím parametrem je teplota, při jejímž zvýšení rapidně dochází ke snížení pevnosti v ohybu, jak je tomu obdobně u tvrdosti.¹

d) Pevnost v tlaku

Analogicky, jako předešlé mechanické vlastnosti, je i pevnost v tlaku závislá především na obsahu pojiva (s rostoucím obsahem klesá) a velikosti zrna (s jemnozrnnou strukturou dosahuje vyšších hodnot). V porovnání s ostatními materiály vykazují slinité karbidy WC-Co mnohem vyšší pevnost v tlaku.¹

e) Pevnost v tahu

Vzhledem k výrazné křehkosti SK lze jen velmi obtížně tuto vlastnost stanovit. Údaje doposud dostupné spíše porovnávají vztah s mezí pevnosti v ohybu. Při tomto srovnání se uvádí, že mez pevnosti v tahu tvoří cca 50% meze pevnosti v ohybu.¹

3 POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

Jsou to běžné slinuté karbidy, jejichž povrch je opatřen tvrdými povlaky, které se vyznačují nejen vysokou povrchovou tvrdostí, ale také termochemickou stabilitou, odolností proti otěru, snížením koeficientu tření a snížením přenosu tepla do nástroje – dá se říci, že povlaky jsou zároveň i bariérou proti difúznímu opotřebení nástroje. Struktura povlaků je tvořena oxidy, nitridy, karbidy, případně jejich kombinací. Někdy je využíván také polykrystalický diamant (PKD).^{1,9}

Tvrdost povlaků je v porovnání s podkladovým materiálem výrazně vyšší, jelikož povlaky neobsahují žádné pojivo. Jejich struktura je jemnozrnná a prakticky bezporuchová. Moderní povlaky také výrazně zlepšují řezivost a prodlužují trvanlivost. Povlakované SK mají rozlehle spektrum využití. Jsou používány pro obrábění vysokými posuvovými a řeznými rychlostmi a hlubokým úběrem. Některé typy se také hodí pro náročné obrábění s přerušovaným řezem. Jejich využití je uplatněno i u veškerých lisovacích a střížných nástrojů.^{1,9}

První povlakované slinuté karbidy představila firma Sandvik Coromant v roce 1969 formou břitových destiček pro obrábění. Jednalo se o jednovrstvý povlak první generace (nebyl přítomen eta-karbid) na bázi karbidu titanu (TiC) o tloušťce 4 - 5 μm . Adheze tohoto typu povlaku však nebyla dostatečná. Následovaly tedy jednovrstvé povlaky na bázi nitridu titanu (TiN) a karbonitridu titanu (TiCN), v literatuře označované jako povlaky druhé generace. Tyto povlaky dosahovaly tloušťky až 13 μm . V polovině 70. let byly na trh uvedeny povlaky na bázi oxidu hlinitého, který je též označován jako slinutý korund (Al_2O_3). Tyto typy povlaků se řadí mezi povlaky třetí generace, které jsou již vícevrstvé (dvě i více vrstev). Poslední generací povlaků, jsou povlaky čtvrté generace, což jsou speciální vícevrstvé povlaky (často více než 10 vrstev a mezivrstev, např. TiC) u kterých se kombinují různé typy vrstev za účelem co nejlepších užitečných vlastností. Pro výrobu těchto typů povlaků je třeba schopnost řízení atmosféry v povlakovacím zařízení dle požadavků technologického procesu pro povlakování. Mezi povlaky čtvrté generace se řadí také diamantové, nanokompozitní (tvořen dvěma i více vzájemně nerozpustnými složkami, z čehož přinejmenším jedna musí být krystalická), gradientní (struktura vrstvy se plynule mění od povlakovaného materiálu k povrchu povlaku), a další.^{1,9}

Běžně se však aplikují jak jednovrstvé, tak i vícevrstvé povlaky v závislosti na způsobu jejich využití, neboť každý povlak má své specifické vlastnosti. Kupříkladu TiC má nejvyšší tvrdost a odolnost proti abrazi, na rozdíl od TiN, který je měkčí a tím má i nižší otěruvzdornost, ale vykazuje odolnost proti výmolu na čele nástroje v důsledku termodynamické stability. Al_2O_3 je naopak vhodný z hlediska otěruvzdornosti při vysokých teplotách (tj. při vysokých řezných rychlostech). Vícevrstvé povlaky mají tedy velký význam pro vytváření optimálních kombinací požadovaných vlastností. Srovnání vlastností těchto primárních povlaků je uvedeno v Tab. 4.^{1,9}

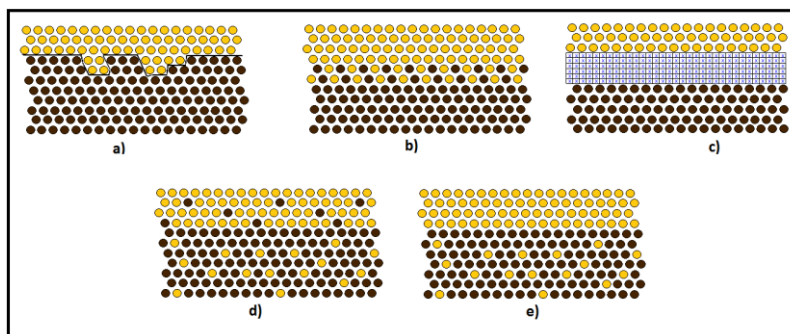
Tab. 4 Porovnání vlastností základních povlakovaných materiálů.¹

| Hodnocení | Chemická stabilita | Odolnost proti oxidaci | Tvrdost | Tvrdost za Tepla |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Nejlepší | Al_2O_3 | Al_2O_3 | TiC | Al_2O_3 |
| ↑ | TiAlN | TiAlN | TiAlN | TiAlN |
| | TiN | TiN | TiCN | TiN |
| | TiCN | TiCN | Al_2O_3 | TiCN |
| Nejhorší | TiC | TiC | TiN | TiC |

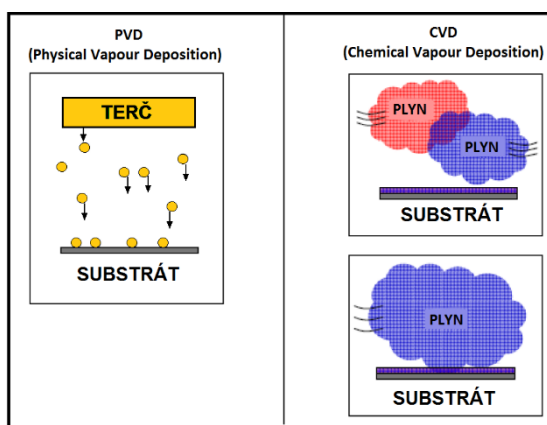
V současné době představují slinuté karbidy 80-90% břitových destiček používaných pro obráběcí nástroje. Jak již bylo zmíněno, povlaky jsou žádány také pro střížné postupové a moldingové nástroje, a to zejména díky své vynikající adhezi, která je nezbytnou podmínkou, a také z důvodu vysoké odolnosti vůči abrazi. Nejčastěji se používají povlaky třetí a čtvrté generace. Značný zájem výrobců je zaměřen také na vývoj a analyzování vlastností povlaků z PKD. Jejich úspěch je dán především kombinací odolnosti proti opotřebení a houževnatosti, ale také jejich možností formování složitých tvarů. Povlakované SK tvoří třídu, která je asimilována pro daný způsob aplikace. Jednotlivé technologie povlakování můžeme rozdělit dle technologie do dvou základních skupin: PVD (Physical Vapour Deposition = Fyzikální depozice par – nanášení odpařením z pevné fáze) a CVD (Chemical Vapour Deposition = Chemická depozice par – napařování z plynné fáze) viz Obr. 6.^{1,9}

Mezi povlakem a substrátem jsou různé přechodové oblasti, viz Obr. 5 :

- mechanická přechodová oblast (a) – spojení mezi povlakem a podkladovým materiálem, je na bázi mechanické vazby (dochází k vyplnění dutin a rýh),
- přechodová oblast, mono-vrstva (b) – oblast přechodu povlaku před jednu i více atomových rovin,
- sdružený přechod (c) – zóna ohraničené mezivrstvy s daným chemickým složením,
- difúzní přechod (d) – přechod z materiálu substrátu do materiálu povlaku s gradientní strukturou,
- pseudodifúzní přechod (e) – částice s vysokou energií se dostanou do určité hloubky, kde zůstanou zamknuty (bez působení difúzního mechanismu).



Obr. 5 Přechodové oblasti mezi substrátem a povlakem.⁴



Obr. 6 Rozdíl mezi PVD a CVD metodou.¹⁰

3.1 CVD Metoda

CVD metoda byla využívána jako první a to již na počátku 50. let. Pro její aplikaci a k docílení tvrdých povlaků je zapotřebí vysokých teplot (700 – 1500°C), které jsou podmínkou pro termickou disociaci plynů a podporou vzájemné chemické reakce složek atmosféry a tlaků plynné atmosféry (1 až 100 kPa). Rozvoj se soustředil zejména na povlaky TiN a TiC, které byly schopné různých mísení Ti (C, N) díky stejné krystalové mřížce a vytvářely „super mřížky“ s výbornými řeznými vlastnostmi (např. odolnost proti difuzi, způsobující výmoly na čele nástroje). K dalším pozitivům patřila dobrá adheze mezi povlakem a podkladem, stejnoměrné pokrytí všech ploch, umožnění nanesení vrstev o větší tloušťce (10 až 13 μm) a přispěly také k zaoblení ostří, což se pozitivně projevovalo zejména u hrubovacích řezných nástrojů, využívaných k obrábění litých materiálů s kůrou. Jako nevýhodu lze považovat ovlivnění podkladového materiálu (snížení ohybové pevnosti), neumožnění povlakovat ostré hrany a zbytková tahová napětí v povlaku. K povlakování slinutých karbidů je metoda CVD upřednostňována před metodou PVD.

Metoda CVD je chemický proces užívaný k tvorbě tenkých vrstev (tj. materiál o tloušťce několika desítek nanometrů až po několik mikrometrů, vytvořený na základním materiálu – substrátu). Princip tvorby tenkých vrstev na podkladovém materiálu je založen na reakci chemických sloučenin v plynné fázi v přímé blízkosti povrchu substrátu s následným umístěním produktů reakce na tomto povrchu. Tloušťka může dosahovat až 13 μm. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi, které se za vysokých teplot rozkládají. Nezbytným požadavkem na tyto plyny je stabilní obsah prchavé sloučeniny, která se v důsledku přivedené energie (ohřevem, laserem, plazmou) chemicky rozkládá (např. kovový halogenid, TiCl₄). Podmínkou pro proběhnutí požadované reakce, je také obsah nekovového reaktivního plynu, jako je N₂, NH₄, CH₄. Pro dosažení struktury s kubickými zrny (Ti, WC), která mají vysokou tvrdost a dostatečnou houževnatost, se využívá gradientního slinování (tj. tvrdé jádro a houževnatý povrch), u kterého je podstatně vyšší obsah pojiva a snížený podíl zrn kubických karbidů. Tyto funkčně gradientní slinuté karbidy by byly bez povlaku zcela nepoužitelné.

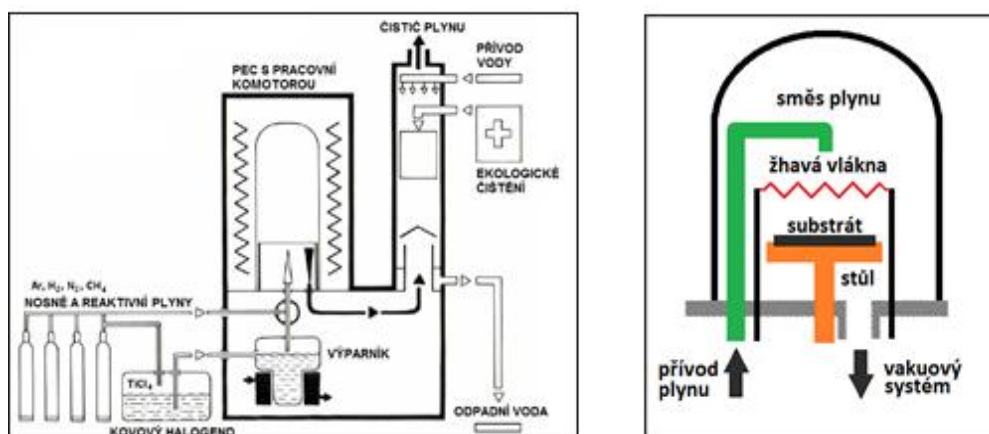
Rozlišujeme čtyři druhy metody CVD:

- tepelně indukované,
- plazmaticky aktivované,
- elektronově indukované (elektronový paprsek),
- fotonově indukované (např. laser).

Mezi přiváděné plyny patří i nosné médium – plyn (Ar, H₂), který přepravuje danou směs plynů k povlakovanému předmětu, umožňuje řízení celého procesu, ovlivňuje rychlost růstu vrstvy povlaku a mimo jiné je důležitý při redukci oxidů na povrchu substrátu, což umožňuje vznik povlaku s dobrou adhezí. Plynulých změn ve složení povlaků se dosahuje cíleným řízením obsahu plynné směsi v čase. Tímto způsobem je možné vytvářet multivrstvé povlaky – povlaky čtvrté generace, což jsou povlaky, kde se střídají minimálně dva druhy vrstev. Přechody mezi jednotlivými vrstvami zabraňují šíření poruch, což vede ke zvýšení tvrdosti a houževnatosti.^{1, 10}

Proces povlakování metodou CVD probíhá v tzv. reaktorech, které se rozlišují na reaktory s horkou stěnou a reaktory se studenou stěnou. U reaktorů s horkou stěnou je nutné ohřívat nádobu pomocí topných elementů, aby teplota na substrátu i na stěně reaktoru byla konstantní. Nevýhodou tohoto typu je možnost usazování povlaku po stěnách a možná kontaminace povlaku substrátu z chemických reakcí mezi stěnou a parami. Tento

reaktor je tedy vhodný pouze pro využití exotermických reakcí (vysoká teplota stěny zamezí nežádoucímu usazování povlaku). U reaktoru se studenou stěnou je zahříván pouze držák substrátu. Reaktor je tedy vhodný spíše pouze pro endotermické reakce, jelikož má substrát větší teplotu než stěna reaktoru, což způsobuje vznik reakcí přednostně na něm. Stěna reaktoru bývá velmi často chlazena, přičemž chladícím médiem je nejčastěji voda. Schéma povlakovacího zařízení a detailní pohled na vnitřek reaktoru HF CVD s dvojitým předpětím na depozici diamantových vrstev, využívající žhavená wolframová vlákna (HF = hot filament), jsou zobrazeny na Obr. 7.^{1, 10}



Obr. 7 Schéma povlakovacího zařízení pro metodu CVD (vlevo).¹

Detailní pohled na vnitřek reaktoru (vpravo). Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.

K výhodám povlakování metodou CVD patří:

- vysoká hustota povlaku,
- výborná adheze k substrátu,
- dobrá stechiometrie povlaku,
- rovnoměrná tloušťka u tvarově složitých nástrojů a součástí,
- schopnost napovlakovat předmět ze všech stran (i nepřístupné dutiny), důsledkem vysokých pracovních tlaků plynné směsi (1 – 10kPa),
- proces je ekonomicky výhodnější pro tvorbu silných vrstev.

Mezi nevýhody metody CVD patří:

- vysoká energetická náročnost,
- dlouhý pracovní cyklus (8 až 10 hodin),
- vysoká teplota (až 1500°C) – snaha o její snížení,
- ekologicky nevyhovující pracovní plynné směsi,
- nelze praktikovat některé kombinace vrstev různých typů kovů (například TiAlN),
- tahová pnutí ve vrstvě.

V posledních letech se začaly implementovat různé modifikace metody CVD:

PACVD – Plasma CVD, plazmaticky aktivovaná CVD metoda. Rozdíl mezi klasickou metodou CVD je zejména v pracovní teplotě, která je u PACVD nižší (běžně 600°C). Princip tvorby povlaku zůstává stejný, tedy pomocí plynné fáze. Metoda PACVD je založena na zvýšení energie plynné atmosféry v povlakovací komoře pomocí její ionizace a aktivace v plazmatickém výboji. Plazma, která je takto chemicky aktivována, umožňuje snížit teplotu nezbytnou pro ukládání povlaku na povrchu povlakovaného dílu. Tvorba plazmy je tedy závislá na zdroji vnějšího elektrického napájení (střídavé napětí o nízké i vysoké frekvenci, stejnosměrné napětí) nebo pomocí reaktivního plynu (např. NH₃). PACVD metodou byly zhotoveny např. povlaky TiN (tvrdost 2200 HV, teplotní odolnost do 450 °C) a TiCN (tvrdost 3000 HV, teplotní odolnost do 350 °C).⁹

MTCVD – Middle Temperature CVD, další metoda založena na principu snížení vysokých teplot. MTCVD umožňuje nanášet povlaky z plynné fáze za výrazně nižších teplot (700÷850 °C), než je používáno u metody CVD. Díky těmto teplotám nevznikají ve vrstvě výrazná pnutí, která způsobují tvorbu trhlinek. Vstupní sloučeninou je acetonitril (CH₃CN, zdroj dusíku), nebo metylkyanid, který je ovšem vysoce toxický a hořlavý. U konvenční metody CVD se jako plyn používá čistý dusík a metan CH₄, který je zdrojem uhlíku. Zdrojem titanu je pro obě metody chlorid titaničitý (TiCl₄). Rychlost růstu TiCN vrstvy je u této metody zhruba třikrát větší než je tomu u konvenční metody CVD. Je zde prakticky vyloučen vznik křehkého eta-karbidu mezi povlakem a substrátem díky zanedbatelné difúzi uhlíku, která vzniká vlivem SK.¹²

HFCVD – Hot-Filament CVD, CVD využívající žhavé vlákno. Tato metoda je oproti dvěma předešlým založena na principu velmi vysokých teplot a využívá se zejména pro tvorbu diamantových povlaků. Plynné složky jsou rozkládány odporově ohřátým wolframovým vláknem (až 2400 °C), umístěným ve vzdálenosti cca 80mm od podkladového materiálu.^{4,12}

LICVD – Laser Induced CVD, laserově indukovaná CVD metoda. LICVD metoda se využívá ve dvojím provedení. Prvním z nich je pyrolytická metoda, kdy dochází ke štěpení molekul plynu na rozhraní plyn-podkladový materiál. K této reakci dochází v místě lokálního ohřevu pomocí laserového paprsku. Tato metoda je využitelná pouze za podmínek, kdy jsou zdroje par pro danou vlnovou délku laserového záření dobře průteplivé a povrch substrátu silně absorbující. Druhou variantou je fotolytická metoda, která je založena na fotochemické reakci, která probíhá u molekul poblíž substrátu.^{4,12}

3.2 PVD Metoda

Metoda PVD je charakterizována nízkými pracovními teplotami (350 – 600°C) a sníženým tlakem (0,1 – 1,0 Pa) kondenzací částic (atomů, popřípadě shluku atomů), uvolněných ze zdroje částic (nejčastěji kovových terčů / targetů) pomocí fyzikálních metod. Podstatou fyzikální depozice je vypařování materiálu (vytvářejícího vrstvu) ve vakuu nebo rozprašování ve výboji udržovaném za nízkých tlaků (atmosféra je řízená). Existuje několik způsobů uvolňování těchto částic:

- fyzikální metoda – rozprašování (působením urychlených iontů Argonu vytvářených ve zkříženém elektromagnetickém poli),
- metoda odpařování (indukčně, nízkonapěťovým obloukem, laserem nebo elektronovým paprskem),
- klasický odporový ohřev.

Nejvyužívanější technologií je však odpařování částic z katody pomocí elektrického oblouku, kdy jsou ionizované částice tvořící plazma, přitahovány k substrátu záporným přepětím.

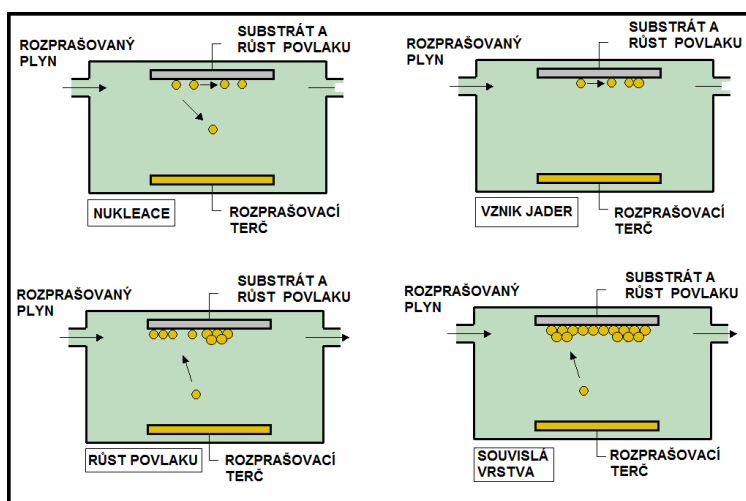
Proces depozice lze obecně rozdělit do třech na sobě závislých kroků:

- transformace materiálu do plynné fáze,
- přeprava par ze zdroje k substrátu,
- tvorba vrstvy na povrchu substrátu.

K reakci dochází mezi uvolněnými ionizovanými částicemi, které jsou urychlovány záporným předpětím (ve stovkách voltů) k povrchu povlakovaného materiálu a atmosférou komory, kde je obsažen inertní a reaktivní plyn (Ar, N₂, a jiné). Takto urychlené ionizované částice sedimentují formou tenké vrstvy sourodého povlaku (tloušťka 1 až 5 μm). Je-li v atmosféře obsažen dusík, dochází k tvorbě povlaku TiN.

Při nanášení PVD procesu, jako je magnetronové napařování a obloukové napařování, je filmový materiál obvykle tvořen atom po atomu na substrát přeměnou kondenzací parní fáze na pevnou fázi (proces kondenzace není náhodný). Po nárazu na substrát atomy drží na povrchu v místě dopadu díky meziatomovým přitažlivým silám, tepelné mobilitě i vlivem povrchových vad.

Růst povlaku dynamickým procesem lze rozdělit do čtyř fází (viz Obr. 8). Tou první je nukleace (tvorba krystalových zárodků z přesyceného roztoku) jednotlivých atomů dopadajících na povrch substrátu. Atomy se pohybují po povrchu, kde jsou buď zachyceny trvalou vazbou, nebo zpětně uvolněny. Díky pohyblivosti atomů na povrchu mohou další dopadající atomy vytvářet izolované zárodky (jádra) a ostrůvky rostoucí vrstvy, které se dále spojují, dokud nedojde k vytvoření monolitní vrstvy, rostoucí do konečné tloušťky. Podmínkou pro vytvoření ostrůvků během migrace atomů je dostatek času (určen atomovou energií) k setkání s dalšími atomy předtím, než dojde k jejich odpaření.



Obr. 8 Schéma vzniku PVD povlaku¹

Dalším ovlivňujícím parametrem na kvalitu (hustotu) povlaku je teplota podkladu a rychlost nanášení. Pokud jsou atomy usazeny s nízkou teplotou substrátu, kondenzované atomy nemají dostatek kinetické energie a dochází k přeskočení atomů s následným dosažením pozice s nižší potenciální energií. K podobnému jevu dochází i při použití

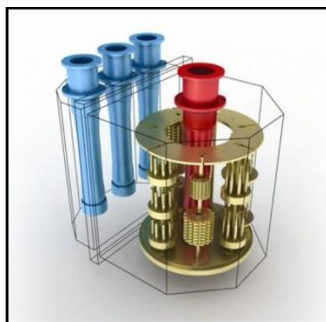
vysoké rychlosti depozice. Atomy nemají dostatek času k nalezení nižší energetické stránky před tím, než jsou pokryty dalšími atomy.¹⁴

PVD metoda byla vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, avšak v současnosti je ve velké míře používána pro řadu dalších aplikací, například k povlakování vyměnitelných břitových destiček (VBD) ze slinutých karbidů, vhodných pro přerušovaný řez (například při operaci frézování). Lze jí také vytvářet vrstvy se specifickými optickými vlastnostmi, jako jsou například oxidické povlaky (Zr, Al), které se vyznačují vysokou odolností proti lomovému porušení. Další možností této technologie jsou kovové vrstvy (například vrstvy hliníku s podkladem ze slitiny titanu, dále upravované plazmovou oxidací na oxid hlinitý – Al_2O_3) se specifickými povlaky na keramických deskách a jiné. Vlastností tvrdých nitridů a oxidů je zvýšení odolnosti proti korozi povlakovaných materiálů (platí zejména pro oceli, kde je tloušťka povlaku většinou větší než $10\ \mu\text{m}$). Existují i kombinace těchto vrstev (např. oxidicko-nitridová vrstva), kdy pro zkrácení doby povlakování je příznivější využít energeticky výkonnější iontové depozice (např. duální magnetrony).^{1,13}

Hlavní průlom v průmyslové přípravě se dostavil až s rotačními katodami, jejichž princip byl patentován firmou SHM v roce 2000. V porovnání s předchozím uspořádáním přinesl systém rotačních katod mnoho výhod:

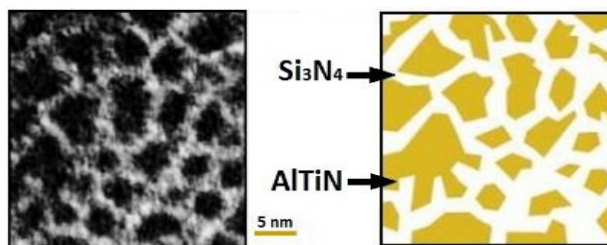
- delší doba mezi výměnami terčů, což znamená vyšší trvanlivost odpařovaných terčů,
- větší rovnoměrnost tlouštěk povlaků po výšce substrátů,
- možnost přípravy multivrstevných povlaků a jejich optimalizace,
- odpařování až 4 různých materiálů v jednom procesu,
- čištění substrátů jak pomocí MIE (Metal Ion Etching), tak i v kombinaci s LGD (Larc Glow Discharge),
- větší povlakovací komora, tedy větší vsázky,
- snazší tvorba nanokompozitů – v našem případě povlaků na bázi TiAlSiN (Marwin) a CrAlSiN (Alwin).

Ojedinečnost řešení obloukové technologie s rotačními katodami (nejde jen o rotační princip, ale i o řídicí systém oblouku, který je ukryt uvnitř katod) a možnost průmyslově připravovat nanokompozitní povlaky byly velkou motivací pro švýcarskou firmu Platit AG k založení podniku na vývoj, výrobu a servis povlakovacích zařízení. Celá řada povlakovacích zařízení (Pi80, Pi111, Pi300 / 311 a Pi 411), která je od roku 2003 nabízena na světovém trhu, využívá stejný princip, viz Obr. 9.¹⁵



Obr. 9 Uspořádání povlakovací komory v Pi411 s centrálním magnetronem pro technologii SCL.¹⁵

Dosavadní zásadnější pokrok ve vývoji technologií byl uskutečněn firmou SHM s.r.o Šumperk v roce 2010, kdy byl představen systém Darwin – hybridní technologie. Jedná se o sdružování obloukové a magnetronové technologie. Tato technologie byla opět s patentovaným centrálním magnetronem, který umí řešit některé nevýhody magnetronových technologií v oblasti přípravy tvrdých a supertvrdých povlaků. Technologie je nazývána hybridní z důvodu principiálně odlišné technologie kombinovat současně a vytvářet tak nové, neobyčejné povlaky což je zcela odlišné od konkurenčních principů. Tato technologie se začíná nabízet v nových zařízeních Pi411 s obchodním označením SCiL.¹⁵



Obr. 10 Schematické zobrazení nanokompozitní struktury.⁴⁴

Zákaznické požadavky na povlaky původně směřovaly ke zvýšení ořezavzdornosti řezných nástrojů z rychlořezné oceli. Později, v devadesátých letech, byly požadavky rozšířeny na ještě vyšší tvrdosti, tepelnou stabilitu a nízký koeficient tření (frikce). V současnosti je rozsah aplikací PVD povlaků tak velký, že i tradiční požadavky doznaly značného rozšíření. Povlaky musí být dostatečně houževnaté, musí kombinovat vysokou tvrdost i nízký koeficient tření. Podstatná je i různá chemická afinita k obráběným či tvářeným a jinak zpracovávaným materiálům. Další podmínkou je i odlišná barva dle oblasti použití, musí se dít snadno odstranit v případech renovací povlakovaných nástrojů apod. K tomu dnes slouží velmi flexibilní technologie, která umožňuje kombinovat mnoho složek v jednom procesu, vytvářet multivrstvé a nanovrstvé struktury, kombinovat PVD a PACVD technologie a především přesně a opakovatelně řídit celý proces.¹⁵

Zdokonalování PVD ořezavzdorných povlaků umožňuje použití produktivnějších procesních podmínek. Příkladem jsou nanokrystalické kompozitní vrstvy, prezentující jednu z nejnádějnějších skupin vrstev, které je možné dále vyvíjet a aplikovat i při těch nejnáročnějších řezných podmínkách. Nanokrystalické kompozitní povlaky jsou tvořeny monokrystaly o velikosti 3 až 5 nm, ukotvených v příslušné amorfní matici s tenkými mezikrystalickými hranicemi (ca 0.3 nm), které slouží jako efektivní bariéra proti šíření poruch, díky čemuž je dána vysoká tvrdost takovýchto materiálů. Jsou klasifikovány jako termodynamicky stabilní materiály i vzhledem k zrnitosti. Zrna jsou tedy stabilní i během zvýšení teploty.¹⁶

Nanovrstvy (Obr. 10) nebo supermřížky jsou tvořeny systémem střídajících se velmi tenkých vrstev s různými vlastnostmi. Zde je podstatná tloušťka singulárních vrstviček, která má vliv na výslednou charakteristiku povlaku (optimálně 3 až 10 nm). Výsledné povlaky mají značnou tvrdost a odolnost proti šíření mikrotrhlin. Použitím řízené rotace nástrojů během povlakování společně s rychlostí růstu povlaků lze takovéto struktury snadno dosáhnout. Pomocí rotačních katod lze také kombinovat více struktur v jednom povlaku. Zastupitelem jsou povlaky TripleCoatings, představující nejmodernější povlaky na trhu a kombinují vynikající houževnatost a tvrdost vrstev AlTiN (použita jako středová vrstva) a extrémně vysokou tvrdost nanokompozitních vrstev CrAlSiN (Alwin). Jako adhezivní vrstva je zde použit TiN. Dalším využitím rotačních katod a flexibilního řízení složení povlaků, mohou být tvořeny multivrstvy a gradientní struktury.¹⁵

Využijí-li se nové technologické poznatky, jako je zlepšování drsnosti povrchu vrstev, budou výhodně zužitkovány i tam, kde je požadován nízký koeficient tření. Tím se nanokrystalické kompozity řadí mezi velmi univerzální skupinu PVD vrstev. Příkladem je vrstva zvaná Marwin (TiAlSiN), u které jsou dosahované výsledky jasným důkazem reálnosti takového vývoje. Schéma zobrazení nanostruktury je uvedena na obrázku 6.¹⁷

Výhody PVD metody v porovnání s metodou CVD:

- schopnost povlakovat ostré hrany,
- vnitřní (zbytkové) tlakového napětí, které má tendenci uzavírat trhliny vzniklé tepelným a mechanickým namáháním.

Nevýhody PVD:

- oproti CVD vyžaduje důkladnější přípravu povrchu povlakovaného materiálu před povlakováním, jako je odmašťování a čištění,
- nutnost pohybu povlakovaných předmětů (vlivem směrového účinku, což znamená, že plochy, které jsou odvrácené od místa odpařování povlakového kovu, by bez nepřetržitého pohybu vzorku prakticky zůstaly bez povlaku),
- tenčí vrstva povlaku (kolem 5 μm),
- složitost vakuového systému,
- menší možnosti výběru typu povlaku.^{1, 9, 12}

Nejčastěji používané fyzikální metody jsou:

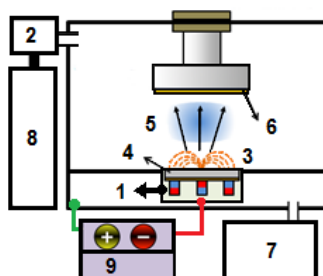
- napařování (doutnavým výbojem rovinné diody, magnetronové, reaktivní magnetronové, radiofrekvenční, iontové)
- napařování (odporové, indukční, obloukové, elektronovým paprskem, laserem).
- iontové plátování.

a) **Napařování**

Princip je založen na napařování materiálu z katody energetickými ionty a kondenzací částic odprášeného materiálu na podkladovém materiálu. Atomy se pohybují důsledkem bombardování zdrojového targetu (z vodivého materiálu, plochého či válcového tvaru), který je během procesu napařování uložen ve vakuové komoře (10^{-2} až 10^{-5} Pa), do které je přiváděn vysoký záporný potenciál (tisíce voltů). Následně je do komory přiváděn pracovní plyn (zejména Ar), který je regulován jehlovým ventilem.^{1, 18, 19}

Hodnota tlaku je řádově v jednotkách pascalu (méně než 0,7 Pa). Nízký tlak má za následek sedimentaci odprášených částic z targetů na povrchu povlakovaného materiálu, aniž by došlo ke kolizi s molekulami plynu v prostoru mezi zdrojem a podkladovým materiálem. Možností je i napařování prováděné vyšším tlakem (0,7 až 2,0 Pa), kdy dochází k ohřevu odprášených či odražených částic důsledkem kolize s molekulami plynu v době před umístěním na povrch. Bombardováním terče vzniká doutnavý výboj mezi terčem (katodou) a substrátem. Funkci anody zde zastává vakuová komora. Podstatná je přítomnost magnetického pole, které způsobuje zakřivení pohybu elektronů do spirál, což podporuje ionizaci pracovního média (Ar). Ionty jsou po zažehnutí výboje urychlovány elektrickým polem a směrovány na terč. Mají vysokou kinetickou energii, díky které jsou schopné z katody vyrážet jednotlivé atomy materiálu, které následně dopadají na pevný podklad (zejména na vnitřní povrchy). Před jejich sedimentací (dánou rychlostí disipace a kinetickou energií) se mohou následkem vysoké energie krátce pohybovat.^{1, 18, 19}

Napařováním lze produkovat povlaky o velmi tenké vrstvě. Během odpařovacího procesu je běžně požadována vysoká teplota targetu, která však u procesu napařování není podstatná. Koncepce napařovacího zařízení je zobrazena na Obr. 11., kde jsou vidět jednotlivé prvky.^{1, 18,19}



Obr. 11 Schéma napařovacího procesu.

1 – napařovací hlava; 2 – regulační ventil, pro nastavení optimálního proudu Argonu; 3 – naznačené siločáry magnetického pole, které zefektivňuje ionizaci média; 4 – terč; 5 – plazmový oblak; 6 – substrát; 7 – čerpací systém; 8 – zdroj Argonu; 9 – zdroj napětí.¹⁸

Rozprašování probíhá za přítomnosti plazmatu:

- inertního plynu (Ar), který reaguje s látkou povlaku chemicky,
- směsi inertního a reaktivního plynu.

Parametr, který charakterizuje proces napařování, se označuje jako napařovací výtěžek (eroze), udávající počet rozptýlených atomů targetu v poměru k počtu dopadajících částic. Jak již bylo zmíněno, při procesu napařování není vysoká teplota terče podstatná. Dalším neovlivňujícím prvkem je polarita bombardujících částic (nabitě či neutrální). Před umístěním na terč mohou být ionty argonu neutralizovány plazmovými elektrony. Pro zlepšení homogenity vrstvy je vhodný pohyb substrátu (například rotace). Rychlost eroze (odpařování) terče je dána empirickým vztahem (2).^{1, 18,19}

$$R = 6.23 \cdot \frac{J \cdot s \cdot M_a}{\rho} \text{ [nm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

Kde: J [$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$] je proudová hustota,

s [atomy / iont], je výtěžnost napařování,

M_a [g] je atomová hmotnost,

ρ [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] je hustota terče.

Napařování doutnavým výbojem rovinné diody – je to nejjednodušší systém, který je sestaven z katody (terč) a anody (držák substrátu). Doutnavý výboj je udržován pomocí sekundárních elektronů, jejichž zdrojem a zdrojem povlaku je samotný terč. Se zvyšujícím napětím narůstá proud (není zachována linearita vzhledem k napětí) výboje, přičemž roste intenzita napařování. Na intenzitu má také vliv napětí společně s navýšením pracovního tlaku. Při daném napětí s navýšením tlaku je umožněn její vzrůst (roste počet iontů zachycených na terči). Vzhledem k faktu, že plyn napařované atomy rozptyluje, intenzita při vysokém tlaku plynu klesá. Hodnoty pracovního tlaku se pohybují v rozmezí 4 až 15 Pa.¹

Mezi faktory ovlivňující rychlost depozice patří zejména:

- Hustota výkonu na povrchu terče,
- Velikost erodované oblasti,
- Vzdálenost mezi terčem a substrátem (obvykle 50 až 100 mm),
- Materiál terče,
- Tlak pracovního plynu (čím vyšší, tím větší pravděpodobnost kolize atomů).

Jednotlivé faktory spolu mohou být provázané, například tlak s hustotou výkonu.

Pracovní proces je tedy ovlivňován několika výše uvedenými parametry, jejichž vhodným nastavením lze dosáhnout optimálních pracovních podmínek, jako například zajištění maximálního aplikovatelného výkonu na terči bez vzniku trhlin, sublimace či tavení. Mezní hodnotu maxima výkonu je možné zvětšit díky intenzivnímu chlazení terče (nutnost správného sestavení chladících kanálků).¹

Výhody naprašování doutnavým výbojem rovinné diody:

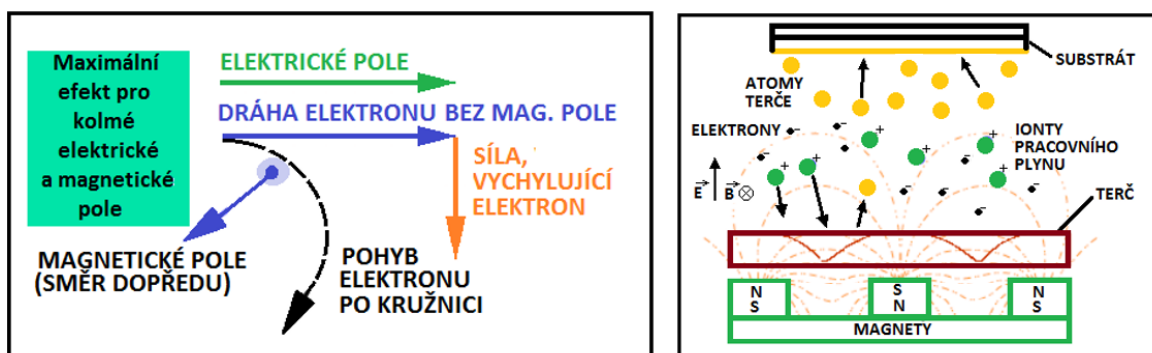
- Jednoduchost,
- Snadná výroba terče,
- Často využívaná, díky široké škále materiálů.

Nevýhody naprašování doutnavým výbojem rovinné diody:

- Nízká rychlost depozice (cca 1mm za hodinu),
- Nutnost vysoké energie,
- Malé povlakované plochy.

Magnetronové naprašování – jedná se prakticky o „inovaci“ klasického naprašování, kdy za pomoci využití magnetického pole (definovatelného tvaru) vytvořené elektromagnetem či permanentními magnety, dojde ke zvýšení účinnosti ionizace v blízkosti terče. Umístění magnetů je podél vnějšího okraje a uprostřed katody (v případě kruhového tvaru katody je umístěn v ose). Princip je téměř stejný jako u diodové naprašovací metody, tedy rozprašování částic z pevného terče (katody). Doutnavý výboj je zde lokalizován magnetickým polem těsně před katodou. Takto konstruované zařízení je nazýváno magnetron. Oproti předchozí metodě zde působí Lorentzovy síly (síla působící na náboj), díky kterým se dříve volné elektrony pohybují po šroubovici podél siločar k anodě (podílí se na kolizích, zejména s atomy plynu), což má za následek delší trajektorii v blízkosti katody a tím delší dobu výskytu v oblasti výboje (bez kolize je pravděpodobnost uchycení na anodě či stěnách komory poměrně malá). Tím dochází ke zvýšení pravděpodobnosti ionizace dalších atomů pracovního plynu a udržení výboje při nižším tlaku (desetiny pascalu) a napětí (stovky voltů). Nízký tlak je hlavním parametrem, který má vliv na čistotu vytvářených vrstev. Magnetronový efekt a schematický náčrt magnetronu je zobrazen na Obr. 12.¹⁹

Aby mohlo dojít k rozprašování částic (bombardování), musí být zaručena vodivost terče. Je-li terč nevodivý (například z keramického materiálu), vzniká na jeho povrchu elektrický náboj, který rozprašování brání. Využitím střídavého vysokofrekvenčního signálu je však bombardování umožněno. Vzhledem k tomu, že se jedná o střídavý signál, jsou zde dvě půlperiody, kdy v průběhu jedné dochází k rozprašování terče a v průběhu druhé (opačná polarita) jsou nahromaděné náboje dopadajících iontů neutralizovány. Doba bombardování je tedy v tomto případě závislá na změně polarit elektrického pole.¹⁹



Obr. 12 Magnetronový efekt (vlevo) a schématický náčrt magnetronu (vpravo).^{21, 23}

Magnetron může být vyvážený i nevyvážený.

- Vyvážený magnetron je tehdy, je-li síla vnitřních a vnějších magnetů téměř totožná (siločáry poté vytváří mezi magnety smyčku). Tyto magnetrony tvoří symetrické magnetické pole (působící kolmo na elektrické pole) se siločarami v blízkosti terče, kde řídí plazmu a zachytávají primární i sekundární elektrony a ionty. Elektrony jsou drženy blízko terče, díky čemuž se zvyšuje pravděpodobnost ionizace inertního plynu a zvýší se tak intenzita plazmového výboje (udržovaný i při nízkém tlaku). Oproti metodě s diodou, je naprašování při magnetronové metodě intenzivnější, jelikož ionty inertních plynů jsou těžší než elektrony a nejsou tedy magnetickým polem ovlivňovány. Sekundární elektrony jsou takzvaně bariérou povrchu terče, který je takto chráněn před nadměrných ohřevem a následným defektům.
- Nevyvážený magnetron je naopak takový, kdy je síla jednoho magnetu výrazně větší (většinou vnější). I u nevyváženého magnetronu je přítomné magnetické spojení mezi vnitřními a vnějšími magnety, ale ne všechny siločáry se na něm podílí. Zde magnetické pole tvoří past pro rychlé sekundární elektrony, které se sráží (iontové srážky) s neutrálními atomy plynu dále od katody, čímž se zvětší počet iontů. Následně je v okolí substrátu vytvořena sekundární plazma, jejíž ionty jsou urychlovány směrem k substrátu, což umožňuje řízení paramentů rostoucího povlaku.^{1, 19}

Hlavními parametry procesu ovlivňující strukturu vrstvy jsou:

- deponovaný materiál,
- složení a tlak pracovního plynu,
- napětí na magnetronu,
- výkon ve výboji,
- teplota substrátu.²²

Reaktivní magnetronové naprašování – je nazvána metoda, kdy je do vakuové komory připouštěna spolu s pracovním plynem reaktivní příměs, jako je kyslík, dusík, a jiné. Je tedy možné vytvářet oxidy, nitridy a další sloučeniny rozprašovaného materiálu.¹⁹

Porovnání magnetronového a diodového naprašování je uvedeno v Tab. 5.²¹

Tab. 5 Srovnání magnetronového a diodového naprašování.²¹

| | Tlak – p [Pa] | Hustota výkonu – ρ_v [$W \cdot cm^{-2}$] |
|--------------------------|---------------|---|
| Diodové naprašování | 10 | 0,1 |
| Magnetronové naprašování | 0,1 | až 100 |

Pulzní naprašování – je vysokovýkonné magnetronové naprašování, resp. Reaktivní vysoce výkonné magnetronové rozprašování. Proces je charakterizován využitím horkého plazmatu a vysokou ionizací kovů, vyznačující se značnou kinetickou energií, což přispívá k difúzi prvků (především kobaltu, jakožto pojivového prvku). Impulzy dosahují výkonu mezi 0,4 až 0,5 [MW] s dobou trvání až 20 [ms].

Výhody pulzního naprašování:

- dosažení požadované tvrdosti povlaků,
- součinitel tření pod 0,3 [-],
- vysoká jakost povrchu při teplotách pod 250°C,
- vhodné k obrábění HSS, zušlechtilých ocelí a obrábění za sucha.³²

Radiofrekvenční naprašování – metoda vhodná pro nevodivé terče. Využívá se v případě znemožnění aplikace stejnosměrného proudu důsledkem akumulace elektrického náboje na jejich povrchu. Touto metodou je možné vytvářet různé typy povlaků ať už vodivých, polovodivých či nevodivých.¹

Naprašovací metoda je výhodná zejména díky své jednoduché depozici a schopnosti zpracovat těžkotavitelné materiály. Vytvořená vrstva si uchovává složení slitinového terče se stejným poměrem jednotlivých složek.¹⁹

Hlavními přednostmi naprašování proti napařování jsou:

- jednoduchá depozice,
- schopnost zpracovávat těžkotavitelné materiály,
- stabilita zdroje (terče) – vysoká životnost,
- nízké zatížení tepelnou radiací,
- depoziční komora může mít malý objem,
- zcela stejné složení naprašované vrstvy přenesené z terče,
- homogenní depozice vrstev,
- výrazně lesklý povrch, vlivem nepřítomnosti makročásteček.

Nevýhody naprašování:

- nízká intenzita naprašování v porovnání s intenzitou tepelného odpařování,
- pro rovnoměrnou tloušťku povlaku je nutné pohyblivé upevnění substrátu,
- vysoká cena terčů,
- velké množství energie dopadající na terč, je přeměněno na teplo a musí se odvádět,
- možné znečištění povlaku vlivem aktivace plynové kontaminace v plazmě.^{1, 19}

Naprašování iontovým paprskem – metoda využívající iontový paprsek o vysoké energii (až 1000eV) vytvořený v iontovém zdroji (Kaufmanův zdroj). Není podmínkou, že se zdroj generování plazmy nachází přímo u substrátu. Může být i oddělen, díky čemuž je možné nezávisle řídit jeho teplotu, tlak plynu i typ naprašovaných částic. Zdrojem paprsku je reaktivní nebo inertní plyn.¹

Tato metoda je při vytváření tenkých povlaků využívána ve dvou konfiguracích. První možnost je nasměrování iontů ze zdroje na target. Odprašované částice poté sedimentují na

substrátu formou tenkého povlaku. Druhou možností je takzvaná depozice s asistencí iontového paprsku, kdy jsou ionty nasměrovány na již nezávisle povlakovaný substrát. Napětí výboje musí být zvoleno optimálně tak, aby byl výboj udržen na terči. Příliš vysoké napětí může způsobit nežádoucí nárůst produkce iontů.¹

Výhody iontového napařování:

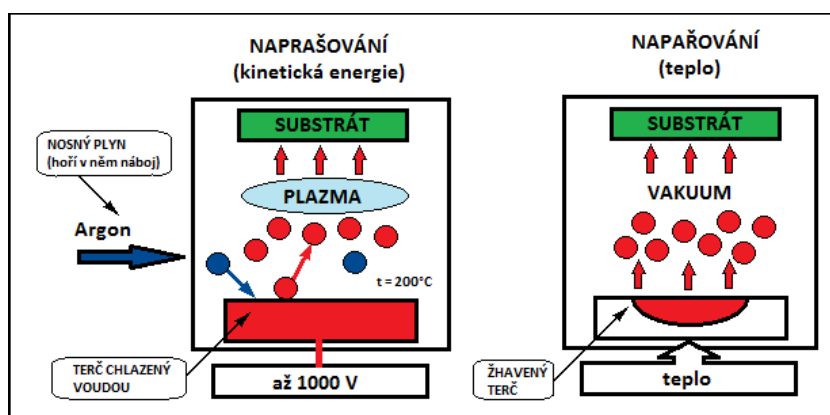
- variabilita složení povlaků,
- možnost řízení teploty substrátu, tlaku plynu, úhlu depozice i nezávislé řízení proudu a energie iontového svazku.
- vysoká adheze při sníženém tlaku (10^{-2} Pa),
- výborné mechanické vlastnosti i u tepelně zušlechťených materiálu,
- snadné čištění substrátu před povlakováním,
- možnost přesného měření všech ovlivňujících parametrů,

Nevýhody iontového napařování:

- mnoho proměnlivých procesních parametrů (nutno řídit),
- v porovnání s konvenčním napařováním je rychlost depozice nižší.¹

b) Reaktivní napařování

Zatímco proces napařování je založený na přenosu momentu hybnosti, mechanismus napařování využívá termální excitaci (viz Obr. 13). Samotný proces napařování je založen na odpařování materiálu ve vakuu s následnou kondenzací částic na substrátu, který může být ohříván a připojen na požadované předpětí využitím stejnosměrného či střídavého napájení (RF frekvence). Částice konají přímočarý pohyb, dokud nedojde ke srážce. Jde o nejrozšířenější techniku přípravy povlaků, využívanou v průmyslovém měřítku. Důležitým parametrem pro dosažení homogenní vrstvy je vzdálenost substrátu od zdroje, která se běžně pohybuje okolo 50 centimetrů. Díky této značné vzdálenosti se odpařované částice atomu pohybují před dopadem po nekolizních drahách, což má za následek nerovnoměrné rozložení povlaku. Největší tloušťky je dosaženo vždy v blízkosti terče, kdy se zvětšující vzdáleností klesá. Dalším podstatným parametrem k optimálnímu rozvrstvení kondenzovaných částic (homogenita) je zdroj par, kdy je možnost bodového zdroje či emitující plošky. Optimální hodnota pracovního tlaku se pohybuje v intervalu 10^{-3} až 10^{-8} Pa. Rychlost vypařování je závislá na tenzi nasycených par, kdy s vyšší tenzí je rychlost větší.^{1, 25}



Obr. 13 Schématické znázornění PVD procesů napařování a napařování.²¹

Aby mohl být růst povlaku kontrolován, je důležité stanovit tloušťku vrstvy. K jejímu určení mohou být využity následující způsoby:

- krystalová měrka (metoda dynamického vážení),
- vodivostní měrka (měření elektrického odporu),
- ionizační měrka (neměří přímo tloušťku, ale proud par – rychlost vypařování).

Pro přeměnu katody z tuhé či kapalné fáze do parního skupenství, se využívá několika zdrojů, které jsou rozděleny dle způsobu ohřevu:

- odporově,
- indukčně,
- obloukem,
- elektronovým paprskem,
- laserem, a jiné.

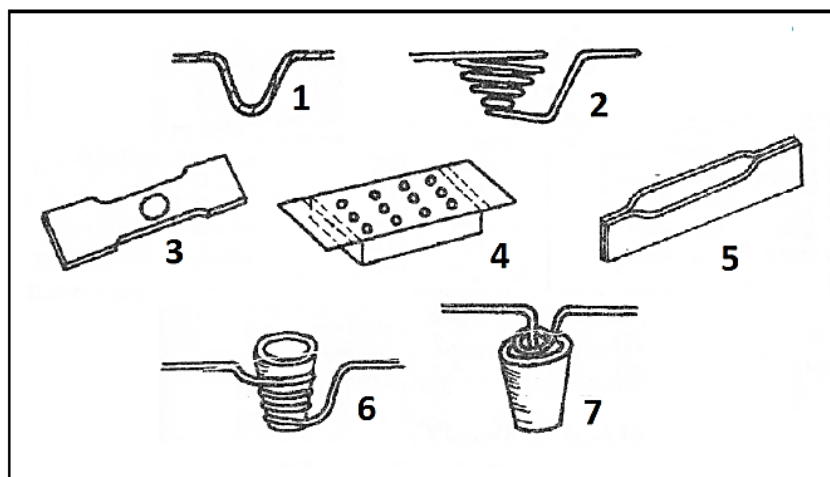
Obecné výhody napařování:

- poměrně jednoduše dostupný pracovní tlak (min. 10^{-3} Pa),
- nenáročná kontrola tloušťky vrstvy,
- vysoké rychlosti růstu povlaku.

Obecné nevýhody napařování:

- odporové lodičky nelze užít pro všechny typy materiálu (nutné elektronové dělo),
- směrovost napařování – nedochází k napařování materiálu, který zdroj „nevidí“.²¹

Běžně používané odporové zdroje (odpařovadla) jsou vyhřívány dráty, plechy a kovové fólie. Jedná se o tzv. odpařovací lodičky (viz Obr. 14), jejichž výhodou je jednoduchost, variabilita velikosti a tvaru a zejména cena. Další výhodou je malý odpor, proto nejsou nutné vysoké výkony napájení (1 až 3 kW). Hodnoty proudu jsou v rozmezí 20 až 500 A. Odpařovadla jsou vyráběna z kovu o vysoké tavicí teplotě (W, Mo, Ta), tudíž nedochází ke kontaminaci vytvářeného povlaku. V případě nižší teploty (pod 1000°C) je možným materiálem platina, nikl nebo železo.²⁵



Obr. 14 Typy odpařovacích lodiček.

1 a 2 – drátové lodičky; 3 až 5 – plechové lodičky; 6 a 7 – lodičky s kelímek.²⁵

Odpařovaný materiál má poměrně malý objem a hmotnost (maximálně 1 gram). V průběhu tavení dochází ke smáčení vlákna nebo fólie odpařovaným materiálem, který na nich ulpívá vlivem působení povrchového napětí. Další možností nanášení materiálu na drát, je pomocí elektrolytické metody.

Odpařování elektronovým paprskem (EB-PVD, Electron Beam Physical Vapour Deposition) – metoda založena na využití elektronových paprsků o velkém výkonu (generované elektronovými děly), které nataví kovové ingoty, ze kterých je následně odpařován materiál. Mohou být využity i k předehřevu substrátu ve vakuové komoře. Kritériem umožňující odpařování materiálů pomocí elektronového paprsku je nízký tlak par (Mo, W, C). Schopností zařízení je vytvářet multivrstvé povlaky s různými vrstvami (kovy, oxidy, karbidy, nitridy). Tahová napětí povlaku mohou být přeměněna na tlaková díky vysoké energii části paprsku – příkladem je iontová implantace.¹

Výhody odpařování odporem a elektronovým paprskem:

- vysoká kvalita povlaku z hlediska čistoty, díky kvalitním zdrojům,
- zdroj odpařovaného materiálu může být těleso v tuhém stavu, o libovolném tvaru a čistotě,
- možnost využití masek a clon k vymezení povrchu substrátu,
- jednoduchost zařízení,
- ohřev elektronovým paprskem má velice vysokou výkonovou hustotu (možnost řízení intenzity),
- umožnění chlazení odpařovaného materiálu při ohřevu elektronovým paprskem (zabrání se kontaminaci tyglíků),
- odpařování odporem je nejlevnější metoda PVD.

Nevýhody odpařování odporem a elektronovým paprskem:

- obtížná depozice slitin a sloučenin,
- během chemické reakce mezi odpařenými částicemi a jejich nosičem může dojít ke kontaminaci povlaku nečistotami (příkladem je odpařování titanu, jehož nosičem je oxid hořečnatý, u kterého je možnost znečištění kyslíkem a hořčíkem, které titan redukuje),
- nerovnoměrná tloušťka povlaku způsobená přímočarým pohybem částic,
- využití zdrojového materiálu je poměrně malé,
- přítomnost tepelné radiace,
- nutnost vakuové komory k udržení optimální vzdálenosti mezi substrátem a zdrojem.¹

Odpařování elektrickým obloukem – je nejvyužívanější technologií k odpařování částic. Principem je odpaření materiálu (pomocí nízkonapěťového elektrického oblouku, při nízkém tlaku) z pevného nebo kapalného terče ve vakuu s následnou kondenzací par na substrátu. Vnitřek komory je nejprve předehřát na zhruba 450°C, poté dojde k zapálení oblouku s následným odpařováním částic. Oblouk hoří po celé oblasti vakuové komory (anoda), na terči (katoda) hoří pouze bodově (průměr 20 μm). Nejstabilnější je ve vakuu. Pohyb katodové skvrny je náhodný, lze jej však regulovat magnetickým polem po dobu

desítek sekund → řízené odpařování. Je zde nutná přítomnost pomocné zapalovací elektrody.^{1, 21}

Koncepce zařízení pro obloukové napařování je složena z válcové katody chlazené vodou. Katoda je rozdělena na dva segmenty z titanu a eutektické slitiny AlSi (tvorba povlaku TiAlSiN). Hodnoty tlaku v komoře dosahují 0,2 Pa. Povlakované předměty jsou uchyceny v rotujících držácích, symetricky rozmístěných okolo hlavní katody.

Existují dva systémy:

- pulzní – oblouk je opakovaně zapalován a zhasen kondenzátorem,
- kontinuální.

Výhody obloukového odpařování:

- vysoká rychlost depozice (na úkor zhoršené kvality povlaku, vlivem makročástic),
- možnost odpařování elektricky vodivých materiálů,
- před depozicí mohou být ionty materiálu povlaku urychlovány na vysokou energii,
- nízké zatížení tepelnou radiací (katodická oblouková depozice),
- reaktivní plyny jsou aktivovány plazmatem, což zlepšuje procesy depozice,
- znečištění terče je mnohem menší než u reaktivního napařování.

Nevýhody obloukového odpařování:

- vysoké zatížení tepelnou radiací (anodická oblouková depozice),
- možnost odpařování pouze elektricky vodivých materiálů,
- možná kontaminace povlaku (tvorba kuliček), roztavenými kapénkami vyvrženými z katody a dopadajícími na substrát (tomuto jevu lze zamezit aplikací elektromagnetického filtru, který však snižuje rychlost depozice).¹

Laserové indukované odpařování – metoda založená na laserovém paprsku, který odpařuje materiál z povrchu targetu. V případě, kdy je laser umístěn mimo vakuovou komoru, musí být na odpařovaný materiál použito přenosové a zaostřovací zařízení.

Výhody laserového odpařování:

- produkce složek s vysokou energií, zlepšujících kvalitu povlaku,
- výborný přenos stechiometrie mezi terčem a povlakem.

Nevýhody obloukového odpařování:

- velmi nízká energetická účinnost,
- malá velikost povlakované plochy (díky malému bodu, kam dopadá laserový paprsek),
- snížená kvalita povrchu vlivem rozstřikovacího efektu mikročástic.

c) **Iontová implantace**

Jedná se kombinovaný (hybridní) vakuový proces povlakování, při kterém je povrch substrátu bombardován iontovým svazkem částic o vysoké energii (10 až 500 keV). Jako zdroj mohou být využity plyny, páry či odpařování nebo odpařování. K ionizaci a odpaření částic je dosaženo elektrickým výbojem v atmosféře, vlivem vytvořeného elektrického pole (až 1000 V) mezi substrátem a zdrojem odpařovaného materiálu.

Vytvořený povlak tedy vzniká iontovou reakcí. Zásadní vliv na vlastnosti vytvořeného povlaku má dopad inertních či reaktivních iontů, umožňující vznik sloučenin při nízkých teplotách. Metoda iontové implantace vykazuje mnoho výhod spojených s plazmaticky aktivovaným procesem, který má za následek zvýšení rychlosti iontů do povlakovací komory (plazmová iontová implantace). Částice tak nabývají velké energie.¹

Výhody iontové implantace:

- široká škála složení,
- výborné mechanické vlastnosti (i u tepelně zušlechťených materiálů nebo plastů), přesně definované chemické složení povlaku,
- vysoká hustota povlaku.

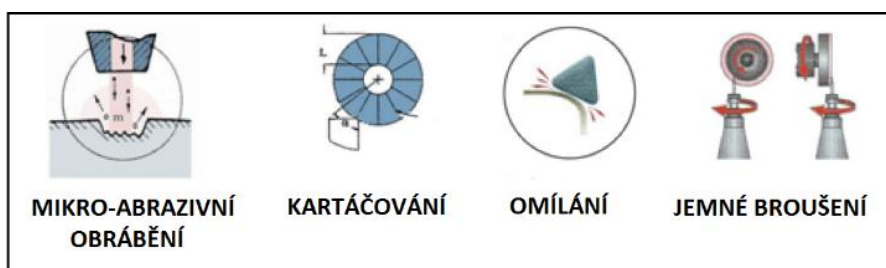
Nevýhody iontové implantace:

- možné přehřátí substrátu (kvůli nadměrnému ohřevu),
- nutnost regulace mnoha parametrů procesu,
- vznik nadměrných tlakových zbytkových napětí.¹

4 TECHNOLOGIE ÚPRAV NÁSTROJŮ PŘED A PO POVLAKOVÁNÍ

Úpravy před a po povlakování mají velice výrazný vliv na výsledný povlak, zejména z hlediska adheze povlaku k substrátu. Bohužel jsou však většinou opomínány a pozornost je kladena zejména na „nejznámější“ parametry procesu, jako je materiál, geometrie nástroje, povlakovací metoda, typ povlaku či aplikační podmínky. Parametrů ovlivňující finální povlak, je však více. Patří k nim především mezioperační úpravy nástrojů nebo také vedlejší vlivy samotných technologií výroby nástrojů.^{1, 26}

Na ostří nástroje se po jeho výrobě vyskytují hlavně známky broušení, otřepy a další různé nerovnosti povrchu. Takové nedokonalosti poté mají za následek nejen narušení homogenity povlaku, ale také jeho přilnavost k substrátu. Nástroj poté ztrácí na kvalitě – dochází ke snížení řezivosti a životnosti nástroje. Povrch nástroje nesmí být během úprav žádným způsobem narušen (hrozí zde kontaminace nečistotami). Obecně známo mají nižší adhezi povlaky vyrobené depoziční PVD metodou, u kterých jsou tyto nežádoucí jevy v porovnání s metodou CVD častější. Avšak výhodou PVD je možnost kombinování dvou různých typů vrstev, jakou jsou tvrdé a otěruvzdorné s kluznou vrstvou. Schémata mechanických příprav procesů jsou uvedena na Obr. 15.^{1, 26}



Obr. 15 Druhy mechanických procesů.²⁷

Úpravy před povlakováním zahrnují především tyto kroky:

- úprava ostří,
- odmaštění,
- mokré čištění,
- iontové čištění (v průběhu povlakovacího PVD procesu),
- pískování či jiné mechanické úpravy (standardně pro úpravu HM),
- odjehlení,
- stripping.

4.1 Volba materiálu

Volba materiálu je jedním z parametrů ovlivňující kvalitu povlaku. Prakticky se jedná o kompletní výrobní cyklus, zahrnující volbu nástrojového materiálu, vybroušení nástroje a následné povlakování nástroje. Materiál nástroje ovlivňuje typ úprav před nanášením povrchové vrstvy i samotný druh technologie PVD.

Výrazný rozdíl je především mezi běžnými materiály, vysokorychlostní ocelí (HSS) nebo slinutím karbidem (HM), kdy je důležitým parametrem odolnost proti vysokým teplotám, chemickým procesům a také proti abrazivnímu otěru. Odlišnost je zejména

v mechanických úpravách (kartáčování, omílání, mikro-abrazivní obrábění, apod.) i v teplotách během povlakování (například pro HSS se teploty pohybují do 450°C, pro HM do 600°C).^{1, 26}

4.2 Vybroušení nástroje

Soustava stroj, nástroj, chladící médium či samotný způsob broušení, má rovněž zásadní vliv na následující operaci povlakování. Vzhledem k možným nedostatečným informacím týkajících se původu nástroje, jsou voleny univerzální čistící procesy. Na kvalitu adheze má vliv nejen jakost broušených ploch, ale i jakost břitů. Dalším vlivným parametrem je vhodně zvolené abrazivní médium a jeho nosič. V průběhu procesu občas dochází k ulpívání mikroskopických částic na nástroji, které nelze běžnými čistícími metodami odstranit.

Cílem úprav před a po povlakování je:

- zvýšit homogenitu povlaku (zlepšením kvality povrchu i samotného procesu úprav),
- zlepšit adhezi povlaku vůči substrátu (snížením drsnosti povrchu, odstranění nečistot, eliminací vyloučeného kobaltu),
- minimalizovat riziko vylamování nástroje (pomocí stabilizace ostří).^{1, 26}

4.3 Úprava ostří

Především ostrá hrana či ostrý přechod, kde dochází ke koncentraci vnitřních plutí, mající za následek rychlé opotřebení – povlak se prakticky odlamuje z povrchu nástroje během pracovního procesu. Proto jsou hrany před aplikací povlaku zaobleny pomocí mechanických úprav. Tyto úpravy mají evidentně vliv na změnu mikro-geometrie nástroje, avšak v řádech pouze několika mikrometrů (cca do 10 μm). Pro vysokorychlostní oceli se využívá úprava odjehlením. Pro břítý nástrojů vyrobených se slinutých karbidů se užívá tzv. rektifikace. Dalším vlivným parametrem je vhodně zvolené abrazivní médium a jeho nosič. V průběhu procesu občas dochází k ulpívání mikroskopických částic na nástroji, které nelze běžnými čistícími metodami odstranit. Úpravou ostří může být životnost nástroje zvýšena až o 200%.

Po operaci broušení nástrojů ze slinutých karbidů, je povrch břitů nerovnoměrný, což může způsobit znehodnocení funkčnosti nástroje! Opět je zde riziko, že se aplikovaný povlak může odlupovat. Této skutečnosti lze zamezit mikro-úpravou, jako je omílání kartáčem a granuláty s abrazivy. Předmět je umístěn v zařízení s planetovým pohybem, ve kterém je umístěn granulát a abraziva. K vlastním úpravám ostří dochází pohybem předmětu. Aplikace metody mikro-úpravy břitů je možná i po nanesení PVD vrstvy.^{1, 26}

4.4 Mokrý čištění

Proces využívající kombinované metody, jakou jsou: (tlakové) oplachy, ultrazvuk, elektrochemické metody, vakuové sušení – odstředění, vyhřátí, odpaření kapalin. Koncepce zařízení se skládá z mycích linek s oddělenými oplachovými vanami s automatickou výměnou jednotlivých technologických lázní, které musí bezpodmínečně obsahovat soli i další rozpustné látky ve vodě. Kvalita oplachové vody tedy musí mít vysokou úroveň. Čistící prostředky, které jsou v kapalné formě, jsou dopravovány rovnou do nádoby s roztoky na bázi hydroxidů – hydroxid draselný nebo hydroxid sodný (alkalické prostředí). Někdy jsou přidávána různá smáčedla (kyselina citronová, popř. fosforečná), která zvyšují účinnost odmaštění. Prostředky samozřejmě nesmí negativně ovlivnit přilnavost povlaku k substrátu. Na zvýšení účinnosti má také vliv druh prostředí (kyselé / zásadité), kdy jsou pro její zvýšení nádoby strukturovány separátně. Všechny

čisticí lázně jsou prováděny v roztocích s demineralizovanou vodou, jejíž vodivost se musí pohybovat v řádu desetin [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$].^{1, 26}

a) Omílání granuláty

Tato mechanická úprava břítu, má rovněž výrazný vliv na dobrou adhezi vrstev. Účelem je odstranění otřepů, nečistot, zbytků lubrikantů i koroze, zaoblení nebo sražení ostrých hran. Výsledný povrch je prakticky dokonale lesklý.

Do válcové nádoby je přiveden omítací materiál a pomocí centrifugy je vytvořen otáčivý nebo vibrační moment. Ve vibračním stroji dochází k broušení a zároveň k leštění, vlivem vzájemného pohybu obrobků a brusných / leštících tělísek, která jsou vyrobena ze speciálních minerálních přísad. Po použití kyselých sloučenin jako čisticího média, je nutné dílce proplachovat čistou vodou, dokud nejsou zneutralizováni (po oplachu se vzorky kontrolují). Následnou úpravou je pasivace v kombinaci s oplachovými lázněmi, která má protikorozní účinek (doba trvání pasivace je do dvou dnů). Pasivátory mohou obsahovat neionogenní tenzidy, organické soli a alkoholy.

Pro zajištění kvalitního povrchu bez zbytkových map je potřeba dosáhnout rychlého osušení smáčených povrchů. K tomu jsou používány různé metody založené na odstředění zbytkové kapaliny, na odpaření zbytkové kapaliny na vzduchu či ve vakuu. Kvalita omílacího procesu je ovlivněna i jeho zařízením, ke kterému patří brusná nebo leštící tělíska, činidla (udržuje čistotu a schopnost abraze tělísek), sušky a také systém pro recyklaci procesní kapaliny (ekologický proces).

Druhy používaných tělísek:

- z keramických materiálů – tvoří světlé a lesklé povrchy (nevýhodou je štěpení),
- spékaná keramika – pro operaci mikro finišování,
- plastová tělíska – vhodné pro měkké materiály (oproti keramickým se neštěpí),
- ocelová tělíska – formou kuliček i jehliček,
- slupky z vlašských ořechů – nasáknuté diamantovou pastou,
- diamantové prášky.^{1, 26}

b) Kartáčování a (ruční) odjehlování

Kartáčováním se dosahuje prakticky stejné kvality povrchu, jako po leštění. Štětiny kartáče jsou z měkkého přírodního nebo polymerního materiálu a jsou uchyceny v podložce. Používá se buď pasta, nebo granulát z diamantového prášku – abrazivní smáčedla. Kartáčování se běžně používá v provedení s nylonovými vlákny či ocelovým drátem. Materiál vláken může být i nylon, užívaný pro zvláštní požadavky na povrch, kdy je odebíráno velmi malá vrstva materiálu. Při použití nylonových vláken se jako abrazivní médium používá SiC, AlO, popřípadě kubický nitrid bóru (CBD) nebo polykrystalický diamant (PCD). Pro ruční odjehlování se používají pilníky nebo tkaniny s abrazivy. Tento typ technologie je využíván zejména pro nástroje z HSS.^{1, 26}

c) Honování

Slouží pro úpravu řezných hran. Metoda využívá především gumové disky, ale i jiné elementy s přítomností abraziv.^{1, 26}

d) Otryskávání (suché / mokré)

Suché tryskání využívá jemných abrazivních částic, proudících v suchém stlačeném vzduchu, dopadajících velkou rychlostí na substrát. Účinek této metody je závislý na druhu abraziva, jeho hmotnosti, tvaru a úhlu dopadu. Suché otryskávání je využíváno zejména u vyměnitelných břitových destiček, jelikož je po této operaci povrch členitější a povlak lépe přilne.^{1, 26}

Výhodou suchého otryskávání je:

- rychlost (suché otryskávání je rychlejší, díky nepřítomnosti kapaliny),
- nízká cena,
- vysoká účinnost čištění,
- ekologický proces (možnost recyklace abraziva),
- vytváří výborné podmínky pro následné nanášení povlaků.

Mokrý tryskání využívá k čištění roztok, vodu a stlačený vzduch, díky čemuž dochází k omílání povrchu, který je pak „dokonale“ čistý a hladký. Roztok, který obsahuje slinutý korund, je tryskán pomocí pumpy, která je hlavní částí zařízení. Oproti suchému otryskávání, se používá pro povrchy, pro něž požadujeme lepší jakost povrchu. Mokřým pískování dochází k zahrazení a zaleštění. Mokřý tryskání je rovněž používané k rektifikaci břitů.^{1, 26}

Výhodou mokřého otryskávání je:

- eliminace prachových částic,
- redukce nerovnosti,
- odstranění kontaminace povrchu s abrazivním médiem,
- kvalitní povrch pro povlakování.

Výhodou obou způsobů je eliminace kobaltu vyloučeného během broušení, zvýšení odolnosti proti opotřebení nebo také snížení povrchových napětí (vznikem tahových napětí během operace řezání). Zlepšené adhezní podmínky jdou podloženy simulacemi i experimenty. Pracovním médiem mohou být: minerální písky, slupky vlašských ořechů, ocelo-litínové částice, sloučeniny zirkonu, sklo apod.^{1, 26}

4.5 Chemické čištění (odmaštění)

Chemické čištění má za úkol odstranit z povrchu mastnotu, částice brusiva a ostatní nečistoty, ulpívající na povrchu podkladového materiálu. Tyto jsou pak odstraňovány různými typy čistících kapalin, na bázi alifatických uhlovodíků (alkoholy a mastné kyseliny). Pro vysokou rozpustitelnost lze užít tzn. Aromatické uhlovodíky (benzol, xylol a jiné). Výhodou této úpravy je možnost využití ultrazvuku. Odmaštění se provádí v běžně dostupných jednoduchých odmašťovacích zařízeních podle kapacitních potřeb či velikosti nástrojů. Po této operaci musí být provedeno dostatečné vysušení. Nadměrné odpařování je eliminováno uhlovodíky a tenzidy (smáčedla), které jsou obsažené v odmašťovacích prostředcích. Zajišťují také dobrou smáčivost.^{1, 26}

4.6 Iontové čištění

Tento proces je opět pro zvýšení přilnavosti povlaku k podkladovému materiálu. Iontové čištění probíhá přímo během povlakování v depoziční komoře, pouze pro metodu PVD. Proces začíná před samotným povlakováním odplyněním nástrojů (předehřevem ve

vakuu), následováno přívodem inertního plynu (Ar) do povlakovací komory, který je ionizován doutnavým výbojem. Povrch je zbavován nečistot díky zápornému předpětí, působící na kladné ionty, které jsou následně urychlovány směrem pryč od nástroje.^{1,26}

4.7 Pískování (mikro-pískování)

Tato metoda se aplikuje zejména pro sériovou výrobu a je využívána k očištění nečistot uchycených v pórovitém povrchu. Pracovním médiem je karbid křemíku (SiC) nebo oxid hlinitý (Al_2O_3). Abrasivní částice mají velikost v řádech desítek mikrometrů (20 až 100 μm). Parametry pískování jsou velice obtížně stanovitelné a jejich optimální volba je záležitostí dlouhých experimentů.^{1,26}

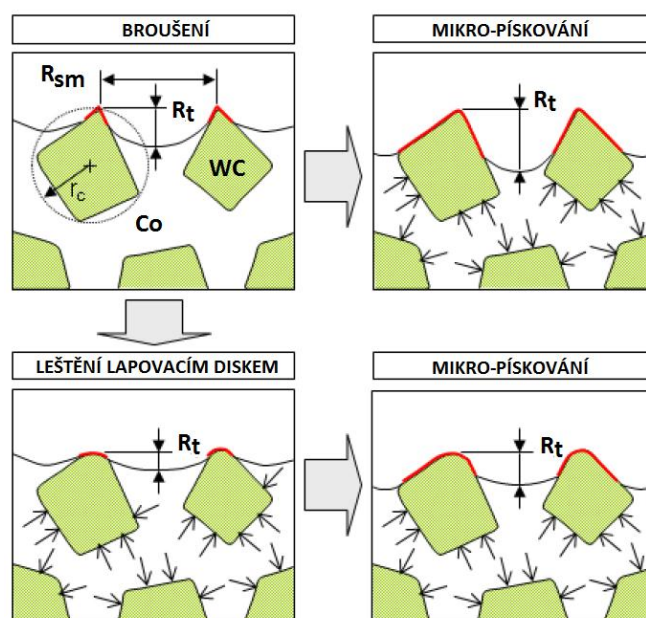
4.8 Stripping (redepozice)

Technologie strippování se používá pro odstranění staré vrstvy použitého nástroje, který má být opětovně povlakován. Stripping ovšem nemusí být vždy přínosný. Proces se liší dle materiálu, pro který je aplikován (HSS, SK). Na konci stripping procesu je nutný oplach nástroje s následnou pasivací daným činidlem. Volba technologie je velice důležitá a má zásadní vliv na výslednou strukturu. Může totiž dojít k vyleptání kobaltu ze struktury a tak celkově narušit povrch materiálu.

Na nástroje se SK jsou aplikována rozpouštědla na bázi hydroxidů a peroxidů vodíku, která nepříznivě ovlivňují kobaltové pojivo (vlivem intenzivního napadání), jehož obsah je 6 až 12 hm. % a je náchylné k reakcím s kyselím či zásaditým prostředím. Používají se proto především rozpouštědla na bázi peroxidu vodíku s nižší koncentrací, při pokojové teplotě a také je nutností před nanášením nového povlaku operace broušení. Pro nástroje z HSS se obvykle používá roztok peroxidu vodíku, vody a tetra-natrium-difosfátu (za teploty kolem 70 °C, což je klasifikováno jako reakce s horkým peroxidem). V porovnání s technologií používanou pro HSS je odstraňování povlaků ze SK obtížnější.^{1,26}

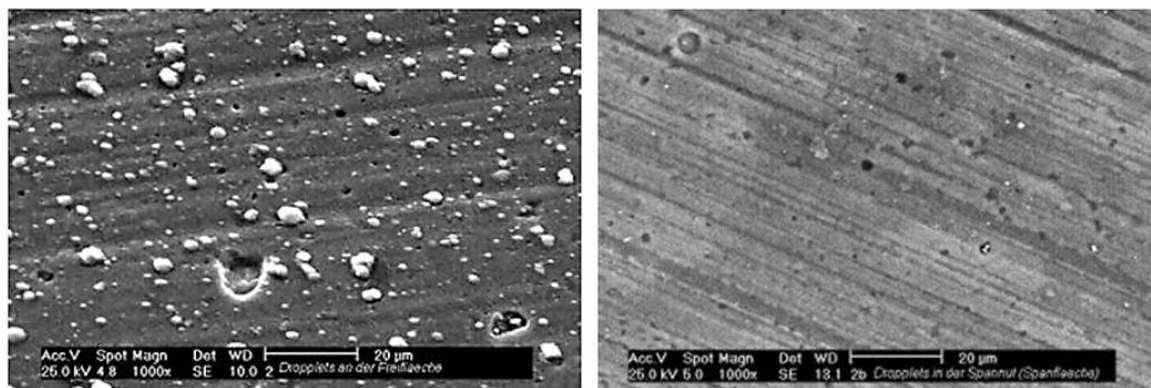
4.9 Integrita povrchu součástí

Příprava řezných / střižných hran mají na integritu povrchu velký vliv. Předpřípravy povrchu nebo hran před povlakováním nejsou požadovány pouze pro úpravy reliéfu a tvaru povrchu substrátu, ale také pro zvýšení kontaktní plochy a intenzity procesu. Dle studie bylo prokázáno, že kvalita povrchu substrátu je ovlivněna také jeho materiálem a to zejména u karbidů wolframu (WC) s kobaltem (Co) jako pojivem. Jedním z parametrů je drsnost povrchu R_t . Pokud je její hodnota větší, než poloměr opsané kružnice zrna WC – r_c ($R_t > r_c$), může dojít k narušení pojiva a tím i následného porušení povlaku. Dalším ovlivňujícím parametrem je vzdálenost mezi píky (výstupky) jdoucími za sebou R_{sm} . Adheze klesá se snižující se hodnotou mikrotvrdosti R_t a rostoucí hodnotou R_{sm} . Efekt úpravy povrchu substrátu je na Obr. 16.²⁷

Obr. 16 Efekt úpravy povrchu substrátu.²⁷

Leštění lapovacím diskem zaobluje zrna karbidu wolframu, díky čemu sníží plocha povrchu bez povlaku. Proces lapování diskem má dopad také na parametr R_t (který snižuje) a R_{sm} (který zvyšuje, tím klesá mechanická vazba mezi povlakem a substrátem). Tyto negativní vlivy může eliminovat jemné pískování, hodnota R_t však musí být menší než rádius zrna karbidu wolframu r_c ($R_t < r_c$). Tím je zajištěno sedimentování karbidických zrn v pojivu. Je-li hodnota R_{sm} snižována, dochází k uzamčení povlaku na substrátu, což je podstatnou podmínkou pro před-přípravu povlakovaných ploch.

Mikročástice, vznikající na povrchu povlaku, vznikají z vyloučeného titanu nebo hliníku. To má samozřejmě negativní vliv na výslednou kvalitu povlaku. Na obrázku Obr. 17 je vidět rozdíl mezi povlakovaným povrchem bez úprav i po nich.^{1, 26}

Obr. 17 Povlak před úpravou (vlevo) a po úpravě (vpravo).²⁸

5 VLASTNOSTI POVLAKŮ A JEJICH POSOUZENÍ

Přehled a vývoj jednotlivých povlaků:

- první povlaky – povlaky první generace, na bázi karbidu titanu (TiC) o tloušťce vrstvy 4 – 5 μm .
- jednovrstvé povlaky – povlaky druhé generace, na bázi nitridu titanu (TiN) a karbonitridu titanu (TiCN). Tloušťka vrstvy až 13 μm .
- multivrstvé povlaky (70. léta) na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) – povlaky třetí generace (dvě a více vrstev). Tloušťka jednotlivých monovrstev je cca 10 nm. Tvrdost až 50 GPa. Vynikající tepelná i chemická stabilita, dobré mechanické vlastnosti.
- kluzné povlaky (Lubrik), rovněž na bázi oxidů a uhlíku – výborné kluzné vlastnosti, snížení přilnavosti materiálů vůči obrobku → omezení tvorby nárůstku)
- povlaky čtvrté generace, speciální vícevrstvé povlaky – různé kombinace vrstev více, než 10 vrstev a mezivrstev, např. TiC.³²

Souhrn povlaků čtvrté generace:

- diamantové (malý součinitel tření, což umožňuje zvýšení řezných rychlostí),
- nanokompozitní povlaky – nanometrická, amorfni struktura (vzájemná rozpustnost složek je minimální), vyvinuté z multivrstvých povlaků (tvrdost nad 50Gpa) – jako první na světě uvedla tento typ povlaku na trh společnost SHM. Průběh tvrdosti se řídí dle Hall-Petchovy rovnice.
- gradientní (struktura vrstvy se plynule mění od povlakovaného materiálu k povrchu povlaku),
- kubický nitrid bóru (KBN) – tvrdost srovnatelná s diamantem (70 až 100 GPa), problematický z hlediska stability, stejně jako diamant.
- Triple Coating – nanokompozity s běžnými nitridovými vrstvami tvořící multivrstvy. Nanokompozity se na nitrid (popřípadě, TiAlN-TiN – viz SHM) nanášejí jako poslední závěrečná vrstva. SHM jako jediná firma zná know-how na navýšení čistoty v nanokompozitech.

Mezi běžně používané PVD povlaky patří vrstvy typu (Ti, Al)N, (Ti, Al, Si)N, (Al, Cr)N. Tyto typy povlaků dosahují vysoké tvrdosti, která však ne vždy je hlavním požadovaným parametrem k dosažení úspěchu. Dalšími požadovanými vlastnostmi povlaků jsou například: eliminace vzniku nárůstku, zejména pro obrábění materiálu s obsahem hliníku (TiB₂) nebo také houževnatost, která jak je známo, klesá na úkor větší tvrdosti.³²

5.1 Vlastnosti povlaků

Vlastnosti PVD povlaků jsou závislé na použité technologii povlakování. Těmi základními je katodický oblouk a magnetron, jejichž detailnější popis byl proveden v kapitole 3.2. Metody mají jedinečné vlastnosti a použití, vzhledem k dobře ionizaci odpařovaných materiálů, řízení iontového prostředí a dobré přilnavosti povlaku k substrátu. Lepší adheze je dosaženo při použití technologie řízeným obloukem. Při použití magnetronového rozprašování je dosaženo lepších výsledků v oblasti povrchu a rychlosti růstu vrstvy.

Doposud konečným stádiem vývoje povlaků jsou povlaky nanokompozitních struktur. Jak již bylo zmíněno, povlaky se vyznačují vysokou tvrdostí (strukturu tvoří malé

krystalky TiN, VN, WN, atd., o velikosti 3 až 4 nm, s monovrstvou na bázi neoxidové keramiky – Si₃N₄ na hranicích zrn). K rozluštění mechanismu tvrdosti významně přispěl Prof. Dr. Stanislav Vepřek, který byl mimo jiné u samotného zrodu supertvrdých nanokompozitních materiálů (r. 1995).

Největším problémem kvality nanokompozitních povlaků, je čistota targetů, které jsou zdrojem povlakujících částic. Zde hraje důležitou roli obsah kyslíku ve struktuře. Je-li hutnota větší než 0,3 at. %, brání tak zisku vysoké tvrdosti povlaku. Technologie povlakování je zaměřena také na různé druhy úprav.³²

5.2 Měření vlastností povlaků

Tloušťka povlakované vrstvy – patří mezi nejdůležitější parametry, ovlivňující životnost nástroje. Správná volba tloušťky povlakované vrstvy je velmi důležitá, závisí jak na druhu procesu, pro který bude nástroj použit, tak i na způsobu naložení povlakovací komory. Například pro závitové nástroje, se optimální tloušťka pohybuje v rozmezí 1 až 2 μm, u nástrojů pro operace frézování, může dosahovat až 8 μm. Příliš tenká tloušťka povlakové vrstvy, ovlivňuje vlastnosti substrátu (povlak na tvrdém substrátu, prokazatelně zvyšuje trvanlivost). Je-li naopak tloušťka povlaku výrazně větší, vzniká zde riziko odlupování povlaku.

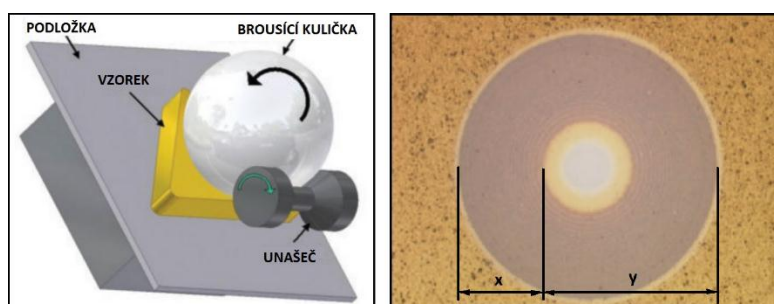
Tloušťky povlaků na rovinných částech nástrojů, jsou měřeny pomocí destruktivní zkoušky, tzv. kalotesterem. Metoda spočívá ve vybroušení kulového vrchlíku do vzorku. Princip zkoušky a vzniklý výbrus, zobrazený jako mezikruží, je vidět na viz Obr. 18. Nástrojem je kulička z kalené oceli (o průměru 25 mm) s nanesenou diamantovou pastou, konající otáčivý pohyb. Před měřením je z důvodu vyšší přesnosti, doporučeno leštění etalonů, použitím metalografie, což splňuje „podmínku“ dodržet maximální drsnost povrchu povlaku, Ra = 0,4 μm. Tloušťka nanesené vrstvy je pak stanovena dle průměru kuličky a vzdáleností „x, y“, měřených pomocí optického mikroskopu, dle výpočtového vztahu (3). Metoda lze použít i pro jednotlivé tloušťky multivrstvých povlaků.^{1, 34, 35}

$$t = \frac{x \cdot y}{d_k}, \quad (3)$$

Kde: x [μm] je vzdálenost mezi povrchovou vrstvou a substrátem,

y [μm] je vzdálenost mezi povrchovou vrstvou a průměrem kulového vrchlíku vzniklého mezikruží.

d_k [μm] je průměr kuličky.



Obr. 18 Schéma kalotestu (vlevo) a proleštěná vrstva (vpravo).³⁴

Tvrdost povlakované vrstvy – Obecně je tvrdost definována jako „odolnost materiálu proti vnikání cizích těles“ (charakterizuje mechanické vlastnosti). Je základním parametrem otěruvzdorných povlaků, které jsou aplikovány na nástroje namáhané abrazivním otěrem. Běžná tloušťka PVD vrstev je pouze několik mikrometrů.

Pro měření se obvykle používá statická zkouška tvrdosti materiálu dle Vickerse (ČSN 42 0374), jejímž indentorem je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136°. Indentor je zatížen silou F [N] (10 až 1000 N) působící kolmo na povrch, po dobu stanovenou dobu (10 až 15 sekund). Maximální hloubka vtisku měřicího hrotu by neměla přesáhnout jednu desetinu tloušťky. Hodnoty zátěže se volí v řádech gramů (cca 10 g). Kritériem tvrdosti materiálu je poměr vlačovací síly a délkou vzniklých úhlopříček po odlehčení jehlanu, jak uvádí výpočtový vztah (4).³⁷

$$HV = 0,189 \cdot \left(\frac{F}{d^2}\right), \quad (4)$$

Kde: F [N] je vlačovací síla,

d [mm] je úhlopříčka vtisku.

Stopy vtisku se vyhodnocují mikrotvrdoměry (přesnost dána v jednotkách nanometrů), které v průběhu zatěžování měří také hloubku jeho vnikání do vrstvy. Měření tvrdosti není využíváno jen k vyhodnocení kvality povlaku, ale také k „předpovědi“ výkonu povlaku. Nicméně, na opotřebení, má tvrdost povlakované vrstvy mnohem větší vliv, než ostatní faktory (chemická stabilita, kontrakce, odolnost proti únavě, a jiné). Tvrdost vrstev se uvádí v GPa, popřípadě zastarale $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}$.^{34, 35, 37}

Drsnost – Na drsnost PVD povlaků, má zásadní vliv kvalita povrchu opracovaného nástroje i samotný povlak. Snížení drsnosti je způsobeno přítomností makročástic, vznikajících během úprav před povlakem. Jakost povlaku má vliv na tepelné a mechanické namáhání, při zvýšení řezných sil. Kvalitního povlaku s nízkou drsností, lze tedy dosáhnout dostatečnou úpravou povrchu před povlakováním, ale i po povlakování.

Pro korektnost výsledku se během měření neuvažují vady povrchu, tj. náhodné, ojediněle se vyskytující a nepravidelné nerovnosti (rysky, trhlinky, důlky apod.), jejichž původem jsou vady materiálu, poškození, a jiné. Posuzování drsnosti je tedy vhodné provádět na vyleštěných vzorcích, jejichž výchozí drsnost R_a je 0,01 až 0,02 [μm]. Pro měření se využívá klasický dílenský drsnoměr, nebo také metoda AFM (Atomic Force Microscopy) založená na trojrozměrném zobrazování povrchů.³⁴

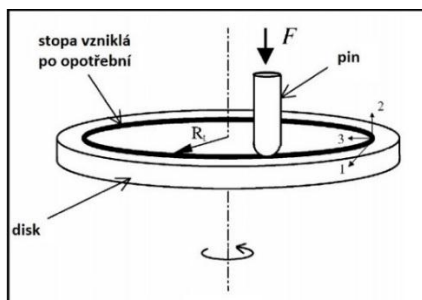
Kluzné vlastnost – odborným termínem je frikce. Kluzné vlastnosti mají vliv na tepelné zatížení nástroje, kdy v průběhu obrábění dochází ke zhoršování fyzikálně-chemických vlastností substrátu vlivem rostoucí teploty. Běžně dosahované hodnoty koeficientů frikce, jsou uvedeny v tab.

Tab. 6 Koeficienty tření pro ocel za sucha.³⁴

| Typ povlaku | Koeficient tření |
|-------------|------------------|
| TiN | 0,4 |
| TiCN | 0,4 |
| CrN | 0,5 |
| TiAlN | 0,4 |
| DLC | 0,1 |

Pro měření se používá laboratorní metoda zvaná pin-on-disk, resp. ball-on-disk. Tyto vlastnosti jsou měřeny na metalograficky upravených (vyleštěných) vzorcích a umístěných na otočný stolek. Principem je vlačování měřicího hrotu (kuličky) na rotující vzorek s testovaným povlakem. Měří se otěr kuličky, koeficient tření, otěruvzdornost vrstvy, atd. Při měření pin-on-diskem se používá zátěžné síly v řádu jednotek newtonů, zatímco při

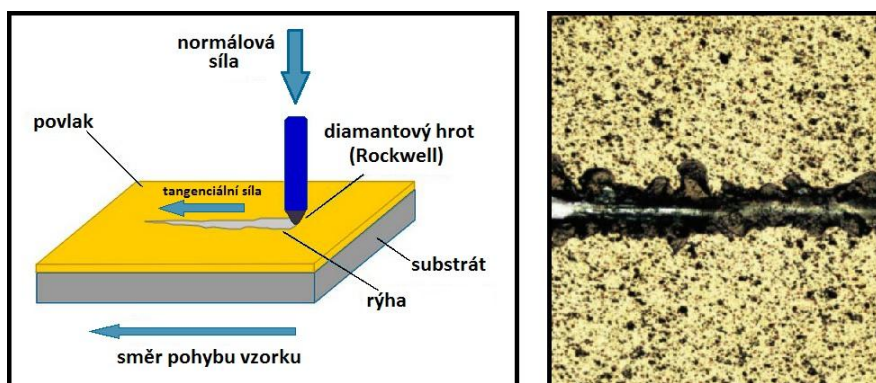
řezných zkouškách jsou řezné síly o dva řády vyšší. Metoda nezahrnuje vliv zvýšení teploty, ke které dochází během řezného procesu. Schéma měřící metody, je na Obr. 19.³⁴



Obr. 19 Princip pin-on-disk metody.⁴²

Adheze (přilnavost povlakované vrstvy k substrátu) – Jednou z vlastností k zajištění kvalitní adheze povlaku je smáčivost substrátu k podkladovému materiálu. Fyzikálně lze adhezi popsat jako přenášení tečných sil ve styku dvou povrchů, bez jejich vzájemného pohybu. Pro zajištění kvalitní adheze, je důležité zaměřit se především na úpravy povrchu před nanesením povlaku. Dále je adheze ovlivněna také celkovou tloušťkou povlaku a podkladového materiálu.

Standardní metodou pro vyhodnocování přilnavosti povlaků je tzv. Scratch-test (vrypová zkouška), jehož principem je postupné zatěžování diamantového Rockwellova hrotu (popř. hrotu z karbidu wolframu), při jeho současném posuvu po povlakované vrstvě. Velikost zatěžující síly se pohybuje v rozmezí 20 až 120 N. Detekovaným parametrem během měření je také akustická emise na hrotu, která se skokově zvýší dosažením kritické hodnoty zátěžné síly, při které dochází k odtržení povlakované vrstvy od podkladového materiálu. Schéma Scratch testu a stopa po provedení zkoušky je zobrazena na Obr. 20.



Obr. 20 Princip Scratch testu (vlevo) a rýha vzniklá po měření (vpravo).^{34, 39}

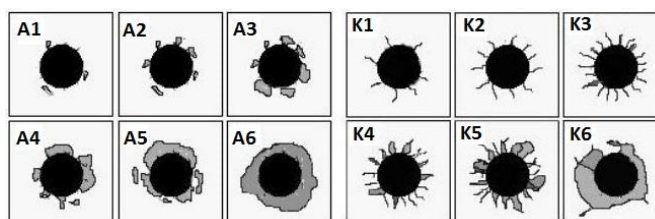
Rýha vytvořená hrotem, je na dále hodnocena pomocí optického mikroskopu, přičemž se odečítá místo, kde byla vrstva odtržena. Kritická hodnota zátěže je následně určena z lineární závislosti dráhy na zátěži. Pokud hodnota adheze převyšuje 60 N, je zajištěna přilnavost povrchu při použití v běžných aplikacích.^{34, 38}

Další značně využívanou zkouškou je indentační metoda, tzv. Mercedes test. Metoda je založena na vnikání Rockwellova indentoru do testovaného vzorku (silou 1500 N), čím je iniciováno napětí způsobující vznik trhliny na rozhraní povlaku a substrátu. Touto metodou lze pozorovat nejen rozměry nebo charakter vzniklých trhlin, ale také jejich rozvoj (dle závislosti na zatížení). Vzniklý vtisk (Obr. 21) ve zkoušeném vzorku, se

následně porovná s etalonem (Obr. 22). Následně je dle popraskání či odloupení vrstvy stanovena třída a adhezní číslo.



Obr. 21 Zobrazení vtisku po měření indentační zkouškou. ⁴¹



Obr. 22 Etalon pro hodnocení porušení okolí vtisku. ¹⁰

Odolnost proti oxidaci – Na opotřebení vrstvy má také vliv nevyhnutelný proces - oxidace. Existují dva hlavní druhy oxidace, povrchové a objemové (hloubkové). Povrchovou oxidací doprovází „proces“ pasivace (tj. tvorba ochranné vrstvy na povrchu materiálu, zamezující vzniku další oxidace). Při objemové oxidaci obvykle dochází k destrukci celé vrstvy povlaku, v souvislosti s poklesem tvrdosti vrstvy. Vlivem dlouhého působení tepla dochází k růstu již vzniklých oxidů (roste jejich objemu), které jsou vytlačovány na povrch substrátu. Aktivním činitelem tohoto procesu je vnitřní pnutí, které je tak vysoké, že způsobí rozšíření defektů, až dojde k oddělení povlakované vrstvy, tzv. delaminaci. Odolnost proti oxidaci určuje také maximální teplotu pracovního procesu pro daný PVD povlak. ⁴³

K měření odolnosti povlaku vůči oxidaci se používá gravimetrická metoda, kdy je hodnocena změna hmotnosti vrstvy v závislosti na teplotě účinkem vzdušného kyslíku. Podmínkou je celoplošně pokrytý vzorek. ³⁴

Chemická stabilita – vlastnost popisující chemickou rezistenci proti reakci s obráběným materiálem. K chemické reakci dochází především za vysokých teplot pracovního procesu. Chemická stabilita není pro všechny materiály identická, liší se jak z hlediska typu obráběných materiálů, tak i z hlediska různých parametrů procesů. Příkladem může být diamantový povlak, který je z hlediska chemické stability poměrně nevyhovující pro obrábění ocelí a naopak při obrábění neželezných materiálů zcela vyhovuje. ³⁴

Teplotní (tepelná) stabilita – je poměrně důležitá vlastnost povlaku, vzhledem k jejich termodynamické nestabilitě. V průběhu procesu obrábění dochází k růstu teploty, která má za následek změnu struktury materiálu nástroje a tím změnu mechanických vlastností. Strukturní analýza se dá určit pomocí TEM (transmisní elektronová mikroskopie), popř. XRD (rentgenová difrakční analýza). Nevýhodou těchto metod je například finanční náročnost, kvalitní příprava vzorků, potřeba komplikovaných přístrojů, nutnost specializovaných pracovišť, apod. Nejlepší tepelnou stabilitu vykazují aktuálně používané povlaky na bázi CrAlN a nanokrystalické nanokompozity. ³⁴

6 PROCES STŘÍHÁNÍ

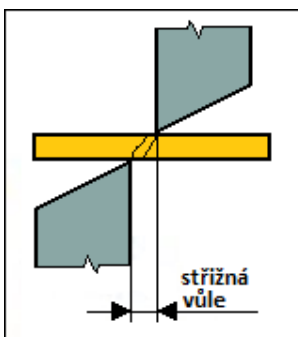
6.1 Úvod

Stříhání je nejrozšířenější operací tváření. Jedná se proces, při kterém dochází k dělení materiálu polotovarů, vystřihování součástek z plechu jako před operace další technologie (ohýbání, tažení, atd.) či jako dokončovací operace. Z technologického hlediska, lze stříhání rozdělit na objemové (stříhání tyčí a trubek) nebo plošné (stříhání plechových pásů). Dle teploty se dělí na stříhání za studena (vhodné zejména pro měkkčí oceli a plechy) a stříhání za tepla (aplikované pro materiály o větší tloušťce a tvrdosti), kdy dochází k předehřevu na teplotu cca 700°C.

6.2 Princip technologie

Proces stříhání je rozdělen na tři základní fáze. V první fázi dochází při dosednutí střižníku k pružnému vnikání do povrchu stříhaného materiálu. Dvojice sil, které vznikají mezi střižníkem a střižnicí (maticí) způsobí ohybový moment, díky kterému vznikají jednotlivá pásma při deformaci materiálu. První fáze je oblast elastických (pružných) deformací. Hloubka vniku nástroje se pohybuje v rozmezí 5 až 8% tloušťky stříhaného materiálu. Ve druhé fázi se zvyšuje napětí ve směru vniku nástroje. Toto napětí je větší než mez kluzu (R_e) a způsobuje trvalé plastické deformace. Hloubka vniku v této fázi se odvíjí od mechanických vlastností stříhaného materiálu a bývá 10 až 25% tloušťky plechu. Ve třetí fázi dosahuje napětí ve stříhu (τ_s) meze pevnosti (R_m). Nejprve dochází ke vzniku tzv. nástřihu, kdy dojde k vytvoření mikrotrhlinek, které se vlivem tahového normálového napětí šíří až dojde k oddělení materiálu. Rychlost šíření je ovlivněna nejen mechanickými vlastnostmi materiálu výlisku, ale a také velikostí střižné vůle.⁴⁷

Střižná vůle (zobrazena na Obr. 23), je rozdíl mezi střižnou hranou střižníku a střižnice. Nástroj musí být seřízen tak, aby vůle byla stejnoměrná ve všech vzdálenostech střižné hrany. V případě nerovnoměrného rozložení, dochází ke vzniku povrchových vad a znehodnocení střižné plochy. Velikost střižné vůle je dána tloušťkou stříhaného materiálu i jeho mechanickými vlastnostmi, přičemž optimální je při dosažení nejvyšší jakosti střižné plochy při nejmenší střižné síle.⁴⁷



Obr. 23 Schéma střižná vůle.⁴⁶

Při běžné hodnotě střižné vůle, je vytvořena plocha bez přítomnosti otřepů. U normální střižné vůle, jsou přítomna všechna pásma rovnoměrně. První je oblast pružného vnikání, následuje oblast plastických deformací, dále pásma lomu a otěru. Při malé střižné vůli dochází k přestřihnu, čímž se rozšiřuje pásmo otěru na větší část střižné plochy. Velká střižná vůle má za následek ohyb stříhaného materiálu.⁴⁷

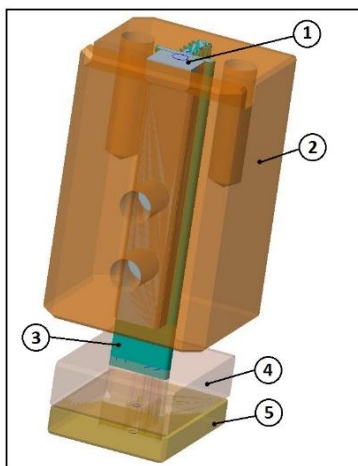
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Zkouška byla provedena ve spolupráci se společností SHM Šumperk, kde byly provedeny operace povlakování, měření i analýzy, rovněž i pořízené snímky z elektronového mikroskopu (SEM). Následná testovací fáze probíhala na oddělení Stamping ve firmě TE Connectivity Kuřim, pro kterou působím jako Product Engineer.

Obecně jsou povlaky charakterizovány fyzikálními i chemickými veličinami, jako je: otěruvzdornost, tepelná vodivost, koeficient frikce (tření), přilnavost (adheze), soudržnost (koherence), tvrdost povlaku, prvkové složení a další. U povlakovaných nástrojů se běžně provádějí analýzy tvrdosti (mikrotvrdosti) povlaku, metalografická analýza povlaku i substrátu, měření jakosti povrchu (Ra) a měření tloušťky vrstvy. Měření adheze povlaku k podkladu se provádí v případě, že se objeví tato problematika v průběhu procesu. Obecně je přilnavost povrchu k substrátu prakticky nejdůležitějším parametrem povlaku. Modifikace povrchu substrátu před povlakováním, může být z důvodů zajištění adheze, k mikro-úpravě břitů (rektifikace) nebo také k odstranění nečistot a zamezení zhoršení jakosti povrchu. Adhézní úpravy se provádějí dle aplikací, pro které budou nástroje použity (například proces hlubokého tažení). Úprava ostří, při které dochází k řízenému zaoblení hran, je prováděna v mycím zařízení s příměsí speciálního brusného média. Vhodné složení a velikost abraziva spolu s parametry tryskání zajišťují definované zaoblení ostrých hran jak u rezných, tak i úpravu povrchu tvářecích nástrojů.

7.1 Podmínky experimentu

Střížník i matrice byly vyrobeny ze slinutého karbidu označené CF-H40S (ISO kód K40) dodávaný firmou Ceratizit. Na Obr. 24 je zobrazena sestava stanice s testovaným střížníkem. Stanice jsou uloženy v tzv. střížných boxech, které jsou složeny ze tří částí: spodní kotevní deska, horní kotevní deska a stírací deska. Stanice se skládá z držáku, střížníku, stírací desky, střížnice a upínací kostky. Střížník je pomocí této kostky uchycen do držáku a zajištěn dvěma stavěcími šroubky, přičemž se kostka opírá o největší plochu střížníku. Držák je poté uchycen v kotevní desce a po obvodu je usazen v přesném otvoru. Horní plocha pojistné kostky je souběžná s horní plochou držáku. Při každém přebroušení je střížník shora vykládán podložkami o tloušťce, která byla odebrána broušením. Střížnice je uložena ve spodní kotevní desce v přesném otvoru a zajištěna shora vedením pro pásek.

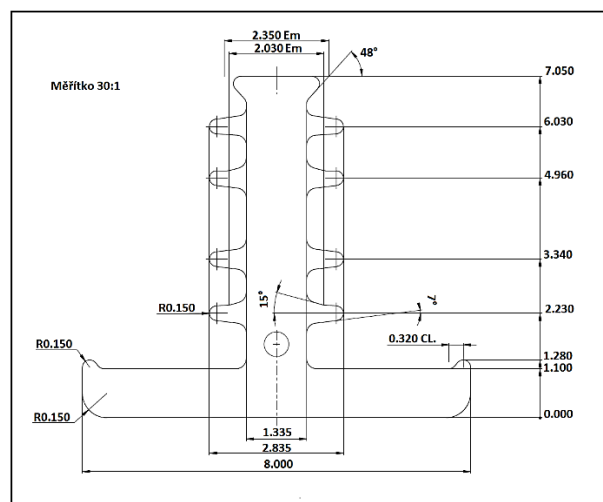
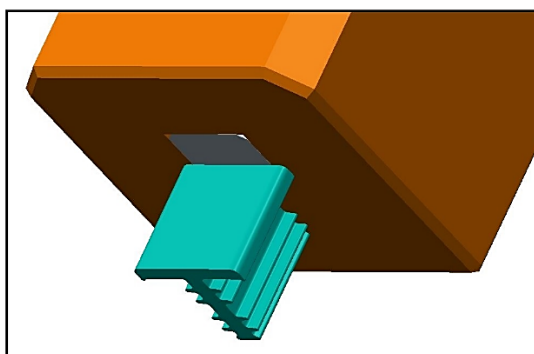


Obr. 24 Sestava stanice číslo 4 se střížníkem.

1 – zámek, 2 – držák, 3 – střížník, 4 – stírací deska, 5 – střížnice.

Na Obr. 24 je znázorněn detailní pohled a čelo střížné části zobrazeno v nárysu. Střížník je velmi malých rozměrů a poměrně tvarově náročný, což se projevuje zejména

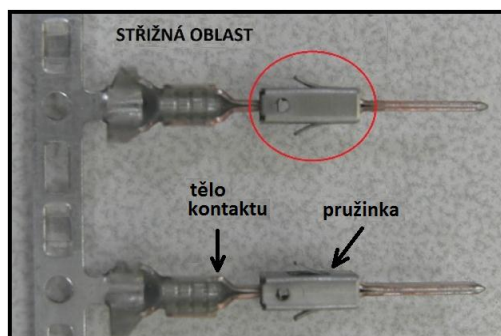
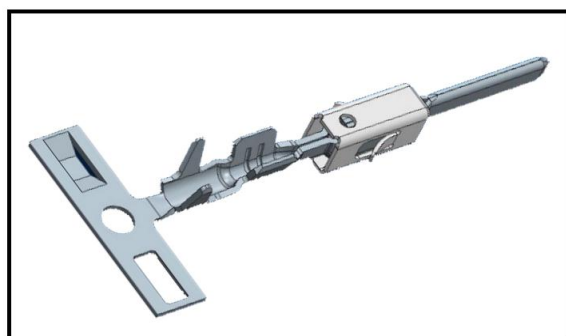
jeho dobroušováním bez výběhu pomocí optické tvarové brusky PeTeWe PFR 3d, využívá se zejména pro broušení velmi tenkých, tvarově náročných střížníků. Cílem je zjemnění povrchu po výrobě elektrojiskrového obrábění drátovou metodou. Střížné nástroje musí stříhat přesně a bez otřepů. Kvalita povrchu dosaženého pomocí této optické brusky, markantně zvyšuje životnost, těchto nástrojů a tím také produktivitu. Tato metoda je také poměrně nákladná, kdy cena dobroušení jednoho střížníku činí cca 5 500 Kč. Již v minulosti bylo u střížníků bez povlaku prokázáno, že tato závěrečná operace zmírňuje vylamování částic se střížné hrany.



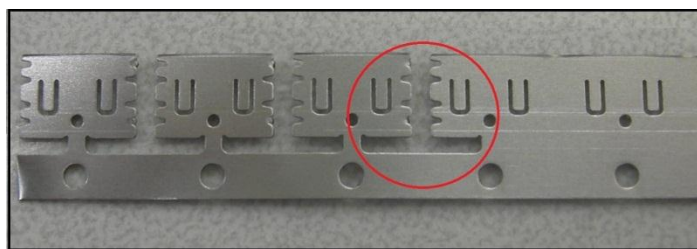
Obr. 25 Detailní zobrazení střížné části.

Stříhaným materiálem byla pásovina z mědi, označena CuSn4, ze které je vyráběn kontakt s označením 964265 TAB 1,6 x 0,6 Typ A. Měď má výbornou tepelnou a elektrickou vodivost a vynikající odolnost proti korozi. Další výhodou je také dobrý pevnost a odolnost vůči únavě. Měď je měkký a houževnatý materiál a patří mezi nejvyužívanější materiály pro produkci kontaktů vyráběných postupovými nástroji. Mez pevnosti dosahuje 1 500 MPa a smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) až 1 300 MPa.

Kontakt je složen ze dvou částí, z těla a pružinky, tzv. pérka a je znázorněn na Obr. 26 ve 3D i na nosném pásku. Na Obr. 27 je postupový pásek, červenou barvou je opět vyznačena oblast stříhu. Stříhaná oblast je označena červenou barvou a nachází se pod pružinkou. Chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v materiálovém listě v 0.

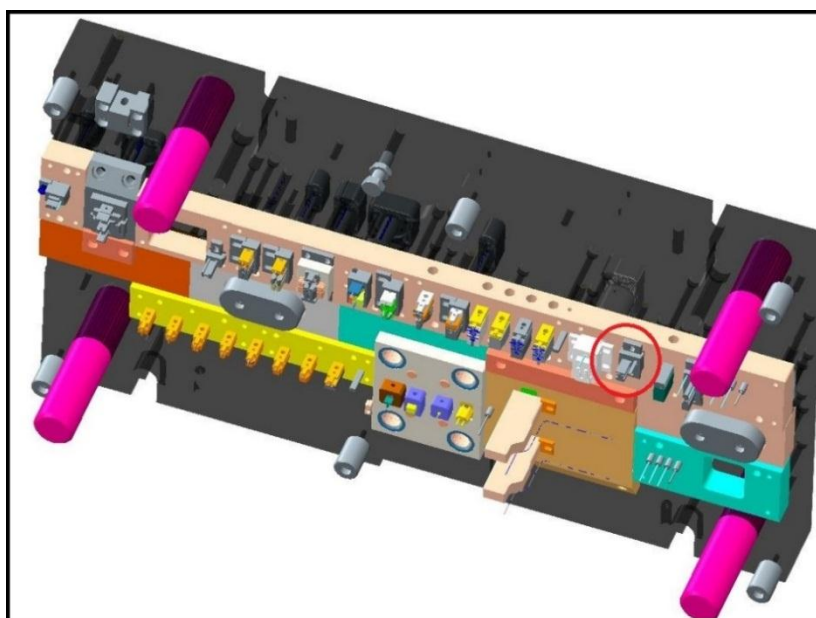


Obr. 26 Kontakt 964265 TAB 1,6 x 0,6 Typ A.

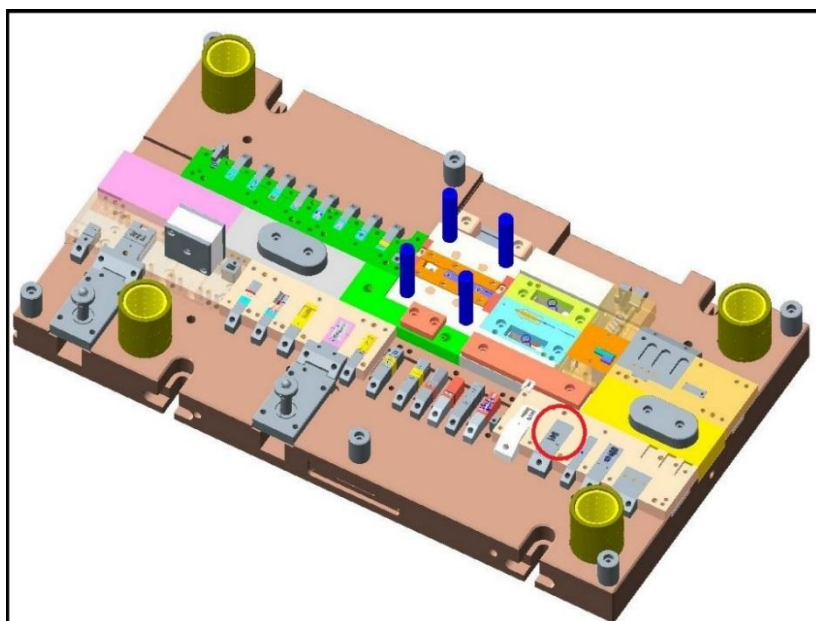


Obr. 27 TAB 1,6 x 0,6 Typ A – stříhaná oblast.

Celý postupový nástroj – tj. vrchní a spodní díl, je zobrazen na Obr. 28 a Obr. 29. Koncepce se skládá ze základních, opěrných a kotevních desek, ve kterých jsou umístěny držáky střížníků a razníku – ve vrchní části a matrice – v části spodní. Podstatnou částí jsou naváděcí kolíky, zajišťující přesný krok pásku.



Obr. 28 Postupový nástroj – vrchní část.



Obr. 29 Postupový nástroj – spodní část.

Použité zařízení – jako zařízení, využitě k testování životnosti střížného nástroje, byl zvolen lis od firmy Bruderer BSTA 500, jehož parametry jsou uvedeny v Tab. 7

Tab. 7 Základní parametry lisu Bruderer BSTA 50 (500kN).

| | |
|--------------------------------|-----------------|
| Maximální síla lisování | 50 tun |
| Rozsah rychlosti | 100 až 1200 SPM |
| Příkon | 28 kW |
| Zdvih | 16 až 51 mm |

Použité nastavení – Před upnutím nástroje se pod něj nainstalovat vodící kanály pro odpadový materiál. Pro výrobu těchto kontaktů je zdvih permanentně nastaven na 32 milimetrů. Počet zdvihů se pohybuje okolo 550 za minutu. Objem dávkovaného maziva je v rozsahu 500 až 1 500 nl. Na Obr. 30 je poté zobrazen lis.



Obr. 30 Lis Bruderer BSTA 500-95b.

7.2 Popis Experimentu

Experiment je zaměřen na testování povlakovaného nástroje ze slinutého karbidu do procesu stříhání v postupovém nástroji, na oddělení Stamping ve společnosti Tyco Electronics Czech v Kuřimi. Testování bylo rozděleno do dvou fází. V první fázi bylo nutné stanovit typ úpravy po nanesení povlaku, na zvoleném povlaku CrAlSiN (Alwin – obchodní označení SHM). Vhodná úprava byla poté aplikována na zvolené povlaky, jejichž vhodnost byla vyhodnocena ve druhé fázi pokusu. Zařízení použitá pro povlakování mají označení Orm a Platit Pi411.

Před povlakováním byla prováděna jediná úprava – omílání (Finnsonic), pro již zmíněné odstranění nečistot a zlepšení drsnosti povrchu.

Úpravy provedené po povlakování:

- ruční leštění diamantovou pastou (Ra 0,05 μm),
- aero Lap – obdoba pískování, SiC nebo diamant + pryž,
- mokré pískování (Ra 0,1 μm),
- bez úprav.

Zvolenými povlaky jsou Alwin (CrAlSiN) a TiCN Plus. Jejich volba byla provedena předchozích zkušeností pro aplikace tváření a zpětných vazeb zákazníku.

Odebíraná vrstva broušením střížníku bez povlaku bývá zpravidla 2 mm. Délka nového střížníku je 42,0 mm. Minimální délka střížníku 27,0 mm – zbytek do 42,0 mm je doplněn podložkami. Střížník je tedy prakticky možné přebrousit celkem až 15 krát. Běžně se počet vyrobených kusu nenapovlakovaným střížníkem pohybuje okolo 1,5 milionů kusů do prvního ostření nástroje. U střížníků opatřených povlakem, je možné odebírat mnohem menší vrstvu, podle jeho opotřebení. Dojde-li pouze k mírnému abrazivnímu opotřebení střížné hrany, je dostačující brousit cca o 0,2 – 0,3 mm. Podmínkou je dodržení střížné vůle $v = 0,015$ mm, která je testována při naváděcích kusech seřizovači. Střížná vůle je kontrolována bezkontaktní metodou, pomocí světla, kdy je střížník vycentrován a poté otestován „čistým“ stříhem na papír.

V první části, byla proměnným parametrem zvolená úprava po povlakování. Ve druhé části byl proměnlivým parametrem konkrétní typ povlaku. Ostatní parametry procesu, které je možné volit, byly neměnné s ohledem na požadavky výroby. Přehled těchto parametrů, je uveden v Tab. 8 . Chemické složení stříhaného materiálu je uvedené v Tab. 9 , ze které je vidět, že se jedná prakticky o čistou měď – 99% a zbytkovými prvky, jejichž hmotnost se pohybuje v řádech desetin procenta.

Tab. 8 Přehled parametrů Stamping.

| | |
|------------------------------|----------------------------|
| Typ lisu | Bruderer BSTA 500-95b |
| Typ kontaktu | 964265 TAB 1,6 x 0,6 Typ A |
| Materiál střížníku | CF-H40S |
| Materiál matrice | CF-H40S |
| Stříhaný materiál | CuSn4 |
| Střížná vůle | 0,015 mm |
| Druh použitého maziva | Raziol |

Tab. 9 Chemické složení CuSn4.

| Prvek | Hmotnost % |
|--------------|-------------------|
| Měď + Cín | $\geq 99,50$ |
| Zinek | $\leq 0,30$ |
| Olovo | $\leq 0,05$ |
| Železo | $\leq 0,10$ |
| Fosfor | 0,01 až 0,10 |
| Cín | 3,50 až 4,50 |

Vlastnosti zvolených povlaků jsou uvedeny v 0, kde je zmíněná charakteristika povlaku z hlediska chemického složení či struktury povlaku, vhodný podkladový materiál i oblast aplikace. Volba zmíněných typů povlaků byla provedena v závislosti na předešlých zkušenostech jednotlivých firem využívajících postupového stříhání. Aplikace nově vyvíjeného povlaku je v prakticky čistě empirickou záležitostí. Správná funkce povlaku, zejména pro operace stříhání, je klasifikována z hlediska jeho tvrdosti (např. díky nitridu chromu), adhezní vlastnosti (např. díky nitridu titanu) a afinita povlaku (ulpívání stříhaného materiálu na nástroji). Tepelná stabilita, není pro operaci stříhání podstatná. Vhodnost jednotlivých prvků obsažených ve struktuře povlaku se nedá jednoznačně určit – vše je tedy prováděno v praxi.

Tab. 10 Typy použitých povlaků společnosti SHM a jejich vlastnosti – část 1. ⁴⁵

| Typ povlaku | Podkladový materiál | Charakteristika povlaku | Oblast aplikace |
|-------------|---------------------|--|---|
| Alwin | HS, HSS | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Povlak na bázi CrAlSiN s vysokým obsahem chromu, ➤ Nanokompozitní struktura, ➤ Zamezuje „nalepování“ obráběného materiálu na nástroj | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Tlakové lití hliníku, ➤ Tváření, ➤ Stříhání, ➤ Frézování, ➤ Vrtání. |
| TiCN Plus | HS, HSS | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Gradientní povlak TiCN | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Tváření, ➤ Stříhání, ➤ Frézování, ➤ Závitování. |

Následně jsou v tabulce 0 uvedeny hodnoty mikrotvrdomosti, tloušťka běžně dosahované vrstvy, drsnost povrchu a teploty, při kterých je povlak stabilní.

Tab. 11 Typy použitých povlaků společnosti SHM a jejich vlastnosti – část 2. ⁴⁵

| Typ povlaku | Mikrotvrdomost [Gpa] | Tloušťka [μm] | Drsnost Ra [μm] | Tepelná stabilita [C°] |
|-------------|----------------------|---------------|-----------------|------------------------|
| Alwin | 35 | 2,0 až 4,5 | 0,15 až 0,20 | > 1000 |
| TiCN Plus | 34 | 1,0 až 4,0 | 0,20 až 0,25 | 400 |

7.3 Výsledky experimentu – první fáze

Množství vyrobených kusů i počet přebroušení je závislý na kvalitě střížné hrany. Dojde-li k destrukci střížné hrany vyštípnutím částic materiálu, je nutné odbrousit mnohem větší vrstvu. Výsledné hodnoty z první fáze testování v závislosti na druhu použité úpravy (AeroLap, Graf, ruční leštění, bez úprav) po povlakování, jsou shrnuty v tabulkách Tab. 12 až Tab. 15 kde jsou uvedeny zejména počty kusů, které byly vyrobeny mezi jednotlivými broušeními. Je zde také uvedena tloušťka odebírané vrstvy a důvod přebroušení.

Tab. 12 Přehled vyrobených kusů střížníku s povlakem Alwin a úpravou AeroLap.

| Počet ostření | Počet vyrobených kusů | Odebraná vrstva [mm] | Důvod přestření |
|---------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 0 | 966 000 | 0,30 | Abrazivní opotřebení |
| 1 | 521 000 | 1,50 | Makrolomy |
| 2 | 760 000 | 1,50 | Makrolomy |
| 3 | 1 300 000 | 0,30 | Abrazivní opotřebení |

Tab. 13 Přehled vyrobených kusů střížníku s povlakem Alwin a úpravou Graf.

| Počet ostření | Počet vyrobených kusů | Odebraná vrstva [mm] | Důvod přestření |
|---------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 0 | 1 966 000 | 0,10 | Abrazivní opotřebení |
| 1 | 2 820 000 | 1,50 | Makrolomy |
| 2 | 2 450 000 | 0,15 | Abrazivní opotřebení |
| 3 | 1 849 000 | 0,20 | Abrazivní opotřebení |

Tab. 14 Přehled vyrobených kusů střížníku s povlakem Alwin a úpravou ručního leštění.

| Počet ostření | Počet vyrobených kusů | Odebraná vrstva [mm] | Důvod přeastření |
|---------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 0 | 1 800 000 | 0,15 | Abrazivní opotřebení |
| 1 | 2 900 000 | 0,10 | Abrazivní opotřebení |
| 2 | 2 650 000 | 1,00 | Makrolomy |
| 3 | 1 980 000 | 0,15 | Abrazivní opotřebení |

Tab. 15 Přehled vyrobených kusů střížníku s povlakem Alwin, bez úprav.

| Počet ostření | Počet vyrobených kusů | Odebraná vrstva [mm] | Důvod přeastření |
|---------------|-----------------------|----------------------|------------------|
| 0 | 680 000 | 1,00 | Makrolomy |
| 1 | 990 000 | 2,00 | Makrolomy |
| 2 | 1 150 000 | 1,50 | Makrolomy |
| 3 | 800 000 | 1,00 | Makrolomy |

V Příloha 2 a Příloha 3 jsou přiloženy snímky povlakovaných střížníků, s následnými úpravami před uvedením do procesu. Snímky byly pořízeny elektronovým mikroskopem v laboratořích firmy SHM a byly pořízeny ve dvou režimech – BSE a SE, z čehož režim BSE je vhodnější z hlediska zvýrazněného materiálového kontrastu. Čím větší prvek je, tím je oblast světlejší. Například karbidické částice versus struktura povlaku. Částice povlaku jsou menší, a proto mají tmavší barvu a slinutý karbid je zobrazen barvou bílou.

7.4 Výsledky experimentu – druhá fáze

Výsledné hodnoty z druhé fáze testování v závislosti na typu použitého povlaku (Alwin a TiCN Plus) a zvolené optimální úpravy po povlaku – metodou Graf, jsou shrnuty v tabulkách Tab. 12 až Tab. 15. Opět jsou zde uvedeny počty vyrobených kontaktů, tloušťka odebírané vrstvy broušením i důvod přeastření.

Tab. 16 Přehled vyrobených kusů střížníku s povlakem Alwin a úpravou Graf.

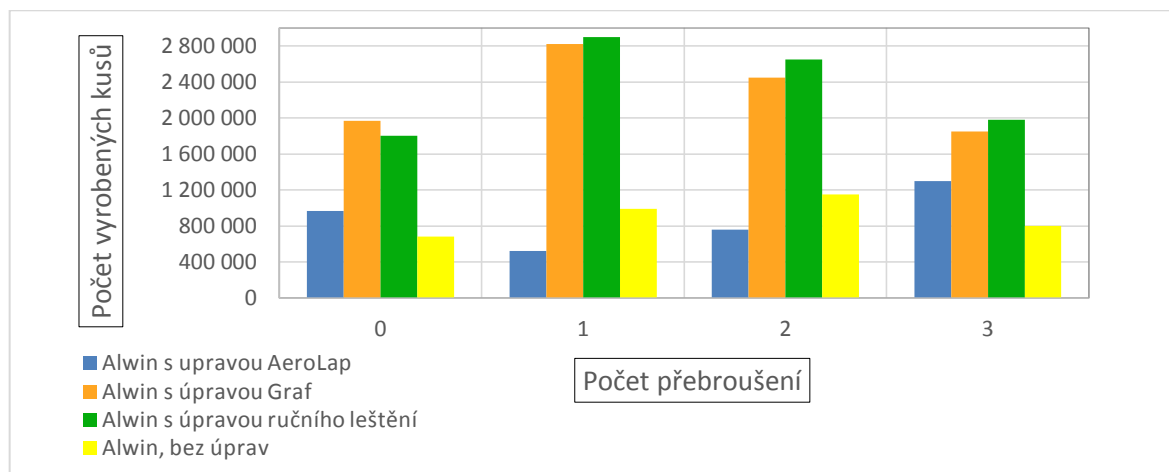
| Počet ostření | Počet vyrobených kusů | Odebraná vrstva [mm] | Důvod přeastření |
|---------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 0 | 2 966 000 | 0,10 | Mikrovylamování částic |
| 1 | 3 820 000 | 1,50 | Makrolomy |
| 2 | 4 000 000 | 0,15 | Mikrovylamování částic |
| 3 | 2 849 000 | 0,20 | Mikrovylamování částic |

Tab. 17 Přehled vyrobených kusů střížníku s povlakem TiCN Plus a úpravou Graf.

| Počet ostření | Počet vyrobených kusů | Odebraná vrstva [mm] | Důvod přeastření |
|---------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 0 | 2 600 000 | 0,20 | Mikrovylamování částic |
| 1 | 3 250 000 | 0,15 | Mikrovylamování částic |
| 2 | 3 800 000 | 1,00 | Makrolomy |
| 3 | 3 750 000 | 0,10 | Mikrovylamování částic |

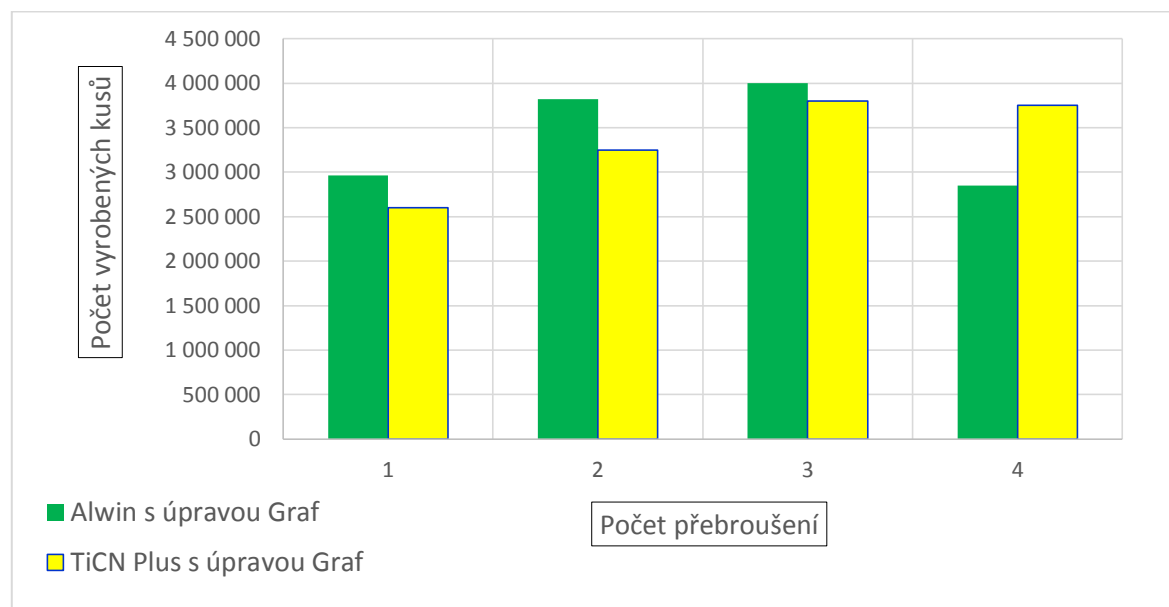
Dále v Příloha 4 až Příloha 6 jsou fotografie povlakovaných střížníků s úpravami po uvedení do procesu a podbroušeným čelem – podélný a příčný brus. Na snímcích je zobrazený celkový pohled shora na čelo střížníku, pohled z boku pro znázornění abrazivního opotřebení a jednotlivé části střížníku, pro posouzení možného opotřebení či porušení střížné hrany.

7.5 Grafický souhrn výsledků z jednotlivých fází testování



Obr. 31 Grafické znázornění počtu vyrobených kusů střížníky s jednotlivými úpravami.

Výsledky z předchozích tabulek jsou znázorněny graficky na Obr. 31, kde jsou porovnávány jednotlivě prováděné úpravy po povlakování (Aerolap, Graf, ruční leštění a bez úprav), v závislosti na počtu přebroušení a množství vyrobených kusů. Z grafu je jednoznačně vidět, že nejosvědčenějšími úpravami po povlaku jsou metoda Grafit a ruční leštění. Na Obr. 32 je dále zobrazen graf, pro jednotlivé druhy použitých povlaku opět v závislosti na množství vyrobených kusů a počtu brusných operací.



Obr. 32 Grafické znázornění počtu vyrobených kusů střížníky s různými typy povlaků.

8 TECHNICKO EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Pro zvolené druhy úprav po povlakování a vlastní typy povlaků byla sestavena cenová nabídka, uvedená v Tab. 18

Tab. 18 Cenová nabídka pro povlakování střížníku a jeho následnou úpravu.

| Typ povlaku | Cena |
|---------------------------|--------|
| Alwin + Graf | 190 Kč |
| Alwin + ruční leštění | 198 Kč |
| TiCN Plus + Graf | 190 Kč |
| TiCC Plus + ruční leštění | 198 Kč |

Ceny jsou uvedeny bez DPH a zahrnují veškeré úpravy a samotný proces povlakování. Celý proces (naložení) je opakován 2 krát, pro zajištění ideálního rozložení povlaku na nástroji. Obecně jsou k dispozici dvě metody naložení:

1. Umístění na magnet, kdy dochází ke stínění (ekonomická metoda),
2. Rotační naložení (homogenní metoda).

Oba typy naložení jsou v podstatě srovnatelné jak z hlediska času, množství povlakované vrstvy a tedy i koncové ceny. Výhodou rotačního naložení je rovnoměrné rozložení povlaku po povrchu. Cena nástroje bez povlaku, vyrobeného elektrojiskrovým obráběním (drátovou metodou) bez dokončovacích úprav, činí 900 Kč. Cena nástroje bez povlaku, vyrobeného elektrojiskrovým obráběním (drátovou metodou) s dobroušením PeTeWe, činí 5 500 Kč. V Tab. 19 jsou uvedeny ceny a množství vyrobených kusů pro střížník s povlakem i bez povlaku.

Tab. 19 Přehled cen a množství vyrobených kusů pro střížníky s a bez povlaku.

| | Počet vyrobených kusů | Cena |
|----------------------|-----------------------|--------------|
| Střížník bez povlaku | 1 500 000 | 5 500 Kč |
| Střížník s povlakem | 4 000 000 | Cca 5 700 Kč |

Broušení na PeTeWe je preferováno z důvodu výrazně lepší jakosti povrchu. Z dřívější provedené analýzy testování střížníku bez povlaků bylo prokázáno, že tato závěrečná operace snižuje náchylnost střížné hrany k vylamování částic materiálu, tedy k makrolomům. Nevýhodou této operace je vysoká cena, která se pohybuje okolo 1 100 Kč za hodinu broušení.

Stanice obsahující testovaný střížník jsou umístěny po čtyřech v tzv. boxu. Aby byl zajištěn prakticky neustálý chod stroje, jsou boxy duplikovány. To znamená, že pro každý box existuje jeden záložní, který v případě závady slouží jako náhrada. Porušený box poté vyžaduje opravu nástrojařem, což je časově velice náročné. Oprava jednoho střížného boxu trvá téměř 3 hodiny.

Jak je uvedeno v Tab. 19 střížník bez povlaku standardně vyrobí 1,5 milionů kusů. Po tomto množství bylo již z dřívějších analýz nastaveno přebroušování minimálně o 2 mm. Povlakovaný střížník vyrobil doposud maximální množství 4 miliony kusů, při odebírané vrstvě broušením průměrně 0,4 mm. Efektivita povlakovaného střížníku byla v závislosti na počtu vyrobených kusů zvýšena 2,6 krát. Z toho vyplývá navýšení životnosti nástroje, díky čemuž je střížný box schopen setrvat v procesu mnohem déle. Ušetřený čas může poté nástrojař využít pro jiné opravy.

9 DÍLČÍ POZNATKY

Pro objektivní posuzování životnosti střížného nástroje je nutné zmínit faktory, které mohou mít vliv na proces stříhání:

- **Různé stroje (lisy)** – na každém lisu se může proces mírně lišit. Vlivem jeho životnosti různorodě opotřebovaných částí.
- **Duplicitní nástroje** – mohou se vyskytovat odlišnosti vlivem nepřesnosti výroby pro jednotlivé kusy.
- **Procesní maziva** – negativní vliv může mít jak málo mazaný nástroj, tak i nástroj s větší vrstvou maziva. Nedostatečné mazání způsobí zvýšení tření a tím tvorbu ostřin. Naopak při „přemazaném“ nástroji dochází k přilnutí odpadních výstřížků ke střížníku. Mazivo je aplikováno díky podávacím válcům a jeho množství je regulováno obsluhou lisu, která jej nastavuje na základě zkušeností.
- **Stříhaný materiál** – záleží na jeho mechanických vlastnostech, především na houževnatosti. Materiál může vykazovat určitou nehomogenitu struktury, která však odpovídá toleranci stanovené pro výrobu.
- **Zastavení nástroje** – po obdržení impulzu z kamerového systému umístěného na výstupu z nástroje dojde k zastavení nástroje (v jiném místě než je testovaný díl). Avšak než k tomuto zastavení dojde, provede lis ještě jeden zdvih. Může tak dojít k zavadění o testovaný střížník a vyštípnutí částic ze střížné hrany.
- **Uvolněný odpadní materiál** – může dojít k výskytu odpadního materiálu z předchozích stříhů před testovaným dílem a při dvojitým prostříhu (tj. stav, kdy při zastavení stroje dojde k posuvu pásku přes sebe a střížník prostříhne zdvojený pásek, tedy dvojnásobnou tloušťku) dojde k vylomení dílu.
- **Příprava úseku obsahujícího stanici s testovaným střížníkem, tzv. boxu** – zde je činitelem lidský faktor. Během seřizování nástrojařem může dojít ke špatnému nastavení stříhu. (světelná kontrola + stříh na papír)
- **Vložení boxu do nástroje** – opět je činitelem lidský faktor, kdy může dojít k špatnému upnutí a následnému vyvrácení dílu. Nedostatečným očištěním oblastí boxu, může dojít kulpívání odpadu na upínacích stěnách. Následkem je četnější opotřebování střížníku nebo destrukci střížných hran.
- **Velikost střížné vůle** – na správné velikosti střížné mezery závisí kvalita stříhu i životnost nástroje. Vlivem nevhodného seřízení může dojít k jejímu zmenšení, což může mít pro střížník destruktivní následky.
- **Broušení čela** – před uvedením nástroje do procesu je nutné vytvořit na čele nástroje úhel 1° až 2° (viditelný na snímcích v Příloha 4 až Příloha 6), z důvodu snížení střížné síly a zabránění vytažení odpadů materiálu po odstřížení.
- **Směr broušení** – při podélném broušení (zobrazeno v Příloha 5) je riziko porušení střížné hrany a tím i narušení povlakované vrstvy. Může dojít k vytažení ostří, což má za následek odlamování částic ze střížné hrany. Vhodnější je tedy provádět broušení příčným směrem, do středu čela, aby došlo k „zahlazení“ hrany.

10 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na povlakování střížných nástrojů ze slinutých karbidů, s cílem navýšení jejich životnosti v postupových střížných nástrojích. Kritériem k hodnocení v první fázi analýzy byla volba nejvhodnější úpravy po povlakování, počet vyrobených kusů, chod střížníku matricí a také kvalita stříhu kontaktů. Vzhledem k nástroji byla hodnocena míra opotřebení střížné hrany, popřípadě chybějící částičky materiálu nástroje. Dochází-li k markantnímu oddělování částic z opotřebovaného povrchu, narůstá velikost střížné síly. Dalším důležitým parametrem je velikost střížné vůle, která má vliv na životnost střížného nástroje a kvalitu stříhu.

Počet vyrobených kusů při použití jednotlivých úprav, byl jednoznačně nejvyšší pro metodu Graf a ruční leštění. Produkce pro úpravu Grafem činila 2 820 000 kusů a pro ruční leštění 2 900 000 kusů. Střížníky s úpravou ručního leštění sice přispěly k větší produkci, nicméně vzhledem k počtu vyrobených kusů, dosažených metodou Graf, jsou rozdíly prakticky zanedbatelné. Ruční leštění je časově i fyzicky mnohem náročnější, zejména díky tvarové náročnosti nástroje. Úprava Grafem byla poté aplikována na dva zvolené povlaky Alwin a TiCN Plus, které byly opět hodnoceny podle kritérií, jako při volbě modifikace po nanesení povlaku.

Střížníky opatřené povlakem Alwin doposud vyrobily 4 miliony kusů a s povlakem TiCN Plus 3,8 milionů kusů. Na základě těchto výsledků je zřejmé, že pro operaci stříhání, aplikované pro oddělení Stamping, je možné použít oba dva typy povlaků s následnou úpravou Graf. Vzhledem k upřednostňování přídatné koncové operace broušením na optické tvarové brusce (PeTeWe), je hodnota nástroje s povlakem v kombinaci s úpravami v podstatě zanedbatelná. Pořizovací cena povlakovaného střížníku s následnou úpravou činí cca 5 700 Kč, nezávisle na volbě typu povlaku – Alwin či TiCN Plus.

V porovnání s produkcí kontaktů vyráběných střížníky bez povlaku, kdy se počet kusů pohybuje stabilně okolo 1,5 mil., byla navýšena trvanlivost střížného nástroje s povlakem až 2,6 krát (uvažováno pro maximální dosaženou produkci 4 milionů kusů). Dalším parametrem zvyšujícím životnost povlakovaného nástroje, je malý úběr materiálu přebroušením – průměrně 0,4 mm, oproti nástroji bez povlaku, kdy odebíraná vrstva činí minimálně 2 mm. Vzhledem k výše uvedenému nárůstu efektivity střížného nástroje, setrvá střížný box v procesu mnohem déle, což naspoří čas vyčinený na jeho případnou opravu a nástrojař pak tuto dobu může využít k jiným účelům.

Metodika testování (uvedená v kapitole 7), která byla sestavena pro tuto práci, bude dále využívána v průběhu dalšího prověřování nových typů povlaků. V budoucnu se bude oddělení Stamping zabývat analýzou povlaku TiCC od firmy SHM Šumperk, který je v současné době stále ve vývojové fázi.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMAR, Anton. Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění. 1. vydání. Brno: CCB spol. s.r.o 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4
2. Sandvik [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx
3. Nashira Hard Metals. In: [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: http://www.nashirahardmetals.com/nashira_tpmetal.html
4. HUMAR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, s.r.o 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2
5. BONACHE, V., et al. Synthesis and processing of nanocrystalline tungsten carbide: Towards cemented carbides with optimal mechanical properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2011, vol. 29, iss. 1, s. 78-84, ISSN 0263-4368.
6. ZY-CARBIDE Company: Grade Specification. In: <http://www.zy-carbide.com/> [online]. Buffalo, NY [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: http://www.zy-carbide.com/GradeTable_1_3_2010_D.pdf
7. OU, X. Q., et al. Fabrication and mechanical properties of ultrafine grained WC-10Co-0.45Cr3C2-0.25VC alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2011, vol. 29, iss. 2, s. 260-267, ISSN 0263-4368.
8. SCHUBERT, W. D., et al. Hardness to toughness relationship of fine-grained WC-Co hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard materials*, 1998, vol. 16, iss. 2, s. 133-142, ISSN 0263-4368.
9. MM Průmyslové centrum: Trendy v povlakování slinutých karbidů. Výroba Obrábění [online]. 2001, č. 7, s. 43 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
10. KŘÍŽ, A. Tenké vrstvy. In: <http://www.ateam.zcu.cz> [online]. Západočeská univerzita v Plzni, Ateam – materiálový výzkum [cit. 2015-04-06] výzkum. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
11. Plasma Technology: Plasma Processing. In: <http://www.plasma.inpe.br/> [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Site/Text/Plasma_Processing.htm

12. HUMAR, A. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, UST, Odbor technologie obrábění. 2006 [cit. 2015-04-10]. Dostupný z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf>.
13. MM Průmyslové centrum: Trendy v PVD a CVD povlakování. Monotématická příloha [online]. 2014, č. 11, s. 70 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-pvd-a-cvd-povlakovani.html>
14. PVD Coatings – Welcome to the future. In: <https://www.pvd-coatings.co.uk> [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <https://www.pvd-coatings.co.uk/theory/how-are-pvd-coatings-deposited/nucleation-and-growth/>
15. HOLUBÁŘ, Pavel. MM průmyslové centrum: 20 let vývoje průmyslových PVD technologií. [online]. č. 5, s. 94 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/20-let-vyvoje-prumyslovych-pvd-technologie.html>
16. *SHM – PVD povlaky pro výkonné nástroje* In: <http://www.shm-cz.cz> [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/vav-centrum/nanokrystalicke-kompozity/>
17. MM Průmyslové centrum: Nové otěruvzdorné PVD povlaky. Trendy / Povrchové úpravy [online]. č. 5, s. 34 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-oteruvzdorne-pvd-povlaky.html>
18. *Laboratorní návod pro práci s naprašovačkou Denton DESK V HP TSC* [online]. 2011. vyd. Praha: VŠCHT, 2011, s. 2,3, [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/NN.pdf>
19. LIBRA, Martin. Naprašování tenkých vrstev: ITO – tenké vrstvy pro elektrotechniku [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>
20. *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, Ateam – materiálový výzkum [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_1.pdf
21. DAĐOUREK, Karel. *Metody vytváření tenkých vrstev*, 2008. [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/13metody%20na%20vrstvy.pdf

22. *Využití plazmových metod ve strojírenství*. Metody depozice povlaků a tenkých vrstev. In: <http://fyzika.fs.cvut.cz> [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_6.pdf
23. *Příprava vzorků*, 2004. In: <http://phys-cs.mff.cuni.cz> [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://phys-cs.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/povrch/xps/aparatura1.html>
24. MM Průmyslové centrum: Nový způsob řízení magnetronové depozice otěruvzdorných povlaků. *Inovace / Obrábění* [online]. č. 10, s. 102 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novy-zpusob-rizeni-magnetronove-depozice-oteruvzdornych-povlaku.html>
25. *Základy nanotechnologie*. In: <http://old.vscht.cz> [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/ipl/zaklady_nano/Prednasky//Prezentace3.pdf
26. MM Průmyslové centrum: Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *Trendy / MSV* [online]. č. 9, s. 70 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-uprav-nastroju-pred-a-po-povlakovani.html>
27. RODRIGUEZ, Carlo Julio Cortes. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing [on-line]. Kassel, Germany: University Press Kassel, 2009. [cit. 2015-04-19]. ISBN online 978-3-89958-713-5. Dostupné z: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-712-8.volltext.frei.pdf>
28. MRKVICA, Ivan; Moravec Václav. MM průmyslové centrum: Úpravy břitů a povrchů řezných nástrojů. *Inovace / Obrábění* [online]. č. 6, s. 58 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/upravy-britu-a-povrchu-reznych-nastroju.html>
29. HOLUBÁŘ, Pavel. ŠÍMA, Michal. MAIXNER, Vladimír. MM průmyslové centrum: Aplikace nových modifikací třívrstevných PVD povlaků. *Povrchové úpravy / Technologie povrchových úprav* [online]. č. 4, s. 52 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/aplikace-novych-modifikaci-trivrstvych-pvd-povlaku.html>
30. TECH Magazín. Nejrychlejší spojení se světem průmyslové techniky. [online]. [cit. 2015-04-19]. 2012. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/540>
31. SHM Šumperk. [online]. [cit. 2015-04-19]. 2013. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz>

32. MM Průmyslové centrum: Trendy povlakování slinutých karbidů. Výroba / Obrábění [online]. č. 7, s. 43 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
33. VEPŘEK, Stanislav. MM Průmyslové centrum: Nanokompozitní supertvrdé povlaky. Technologie pro povrchové úpravy [online]. č. 11, s. 64 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nanokompozitni-supertvrde-povlaky.html>
34. ŠÍMA, Michal. ZINDULKA, Ondřej. MM Průmyslové centrum: Měření vlastností povlaku na nástrojích [online]. č. 6, s. 30-31 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.kom.tul.cz/to/sdilene/merenipovlaku.pdf>
35. ATEAM. Materiálový výzkum: Kalotest. In: <http://www.ateam.zcu.cz> [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/kalotest.html>
36. ATEAM. Materiálový výzkum: Měření mikrotvrdosti tenkých vrstev. In: <http://www.ateam.zcu.cz> [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/vrstvy-mikrotrvdost.html>
37. BUREŠ Jiří. Zkouška tvrdosti dle Vickerse. In: <http://www.converter.cz> [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>
38. DANZER, Jiří. *Elektrická trakce 7: Adheze* [online]. 2008 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/et/ET%20skripta%20Danzer/ETR700.pdf>
39. PVD Coatings – Welcome to the future. In: <https://www.pvd-coatings.co.uk> [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <https://www.pvd-coatings.co.uk/pvd-coating-technology/testing-equipment/scratch-tester/>
40. PVD Coatings – Welcome to the future. In: <https://www.pvd-coatings.co.uk> [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <https://www.pvd-coatings.co.uk/pvd-coating-technology/testing-equipment/coating-thickness-tester/>
41. SONDOR, Jozef. BÉGER, Miroslav. KŘENEK, Miroslav. MM Průmyslové centrum: PVD povlaky pro tváření hliníkových slitin za studena. Trendy / Tváření [online]. č. 4, s. 40 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pvd-povlaky-pro-tvareni-hlinikovych-slitin-za-studena.html>
42. WENYI, Yan, Noel O'DOWN a Esteban BUSSO. *Numerical study of sliding wear caused by a load pin on a rotating disc.: Journal of the Mechanical and Physics of Solids* [online]. 2002 [cit. 2015-05-03].

Dostupné z: <http://users.monash.edu.au/~wyan/papers-pdf/jmps.pdf>

43. BENEŠ, Petr a Antonín KŘÍŽ. TEPLOTNÍ DEGRADACE TENKÝCH OTĚRUVZDORNÝCH PVD VRSTEV. In: <http://www.ateam.zcu.cz/> [online]. Hradec nad Moravicí, 2006 [cit. 2015-05-03].
Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/benes_metal06.pdf
44. *Tribotechnika: Revoluční nanokompozitní povlak* [online]. TechPark [cit. 2015-05-10].
Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32009/revolucni-nanokompozitni-povlak.html>
45. *SHM: Alwin PVD povlaky* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/alwin/>
46. FINDA, Luděk a Roman HALTUF. MM Průmyslové spektrum: Akademie tváření: Stříhání. *Výroba / tváření* [online]. 2010, (6): 72 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html>
47. SUCHÁNEK, Jan. *Tribotechnika: Možnosti zvýšení životnosti nástrojů pro plošné tváření* [online]. Praha: ČVUT [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32012/moznosti-zvyseni-zivotnosti-nastroju-pro-plosne-tvareni.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

| Symbol | Jednotka | Vysvětlení |
|------------|-----------------------------------|--|
| Σl | mm | Součet délek trhlin |
| D | mm | Úhlopříčka vtisku |
| d_k | [μm] | Průměr kuličky |
| F | N | Síla vtláčování |
| H | $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ | Tvrдость |
| J | $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ | Proudová hustota iontů |
| K_{IC} | $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ | Kritický součinitel intenzity napětí |
| M_a | g | Atomová hmotnost |
| P | N | Zatížení |
| p | Pa | Tlak |
| R | $\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$ | Rychlost odprašování terče |
| R_a | μm | Střední aritmetická úchylka profilu |
| R_e | Mpa | Mez kluzu |
| $R_{p0,2}$ | Mpa | Smluvní mez kluzu |
| R_m | Mpa | Mez pevnosti |
| r | $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | Hustota terče |
| r_c | mm | Poloměr opsané kružnice zrna |
| R_{sm} | mm | Vzdálenost mezi vrcholy zrn |
| R_t | mm | Drsnost povrchu |
| ρ_v | $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ | Hustota výkonu |
| S | [atomy / ionty] | Výtěžek odprašování |
| T, t | μm | Tloušťka povlakované vrstvy |
| τ_s | Mpa | Napětí ve střihu |
| v | mm | Střížná vůle |
| x | μm | Vzdálenost mezi povrchovou vrstvou a substrátem |
| Y | μm | Vzdálenost mezi povrchovou vrstvou a průměrem vrchlíku vzniklého mezikruží |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| Zkratka | Jednotka | Vysvětlení |
|--------------------------------|----------|--|
| A | – | Konstanta |
| AFM | – | Atomic Force Microscopy |
| Al | – | Hliník |
| Al ₂ O ₃ | – | Oxid hlinitý (slnutý korund) |
| AlO | – | Oxid hlinečnatý |
| AlTiN | – | Nitrid-titan-hliník |
| Ar | – | Argon |
| C | – | Uhlík |
| CERC | – | Central Rotating Cathodes |
| Co | – | Kobalt |
| Cr ₃ C ₂ | – | Karbid chromu |
| CrAlSiN | – | Nitrid-křemík-hliník-chrom (obchodní označení Alwin) |
| CVD | – | Chemical Vapour Deposition |
| EB-PVD | – | Electron Beam Physical Vapour Deposition |
| GD | – | Glow Discharge (doutnavý výboj) |
| H ₂ | – | Vodík |
| HFCVD | – | Hot – Filament |
| HM | – | Hard Metal (z angličtiny = slnutý karbid) |
| HSS | – | Vysokorychlostní ocel |
| HV | – | Tvrdost dle Vickerse |
| HV | – | Tvrdost dle Vickerse |
| CH ₃ CN | – | Acetonitril |
| CH ₄ | – | Metan |
| ISO | – | International Standart Organization |
| LARC | – | Lateral Rotating Cathodes |
| LGD | – | Larc Glow Discharge |
| LICVD | – | Laser Inducted |
| MgO | – | Oxid hořečnatý |
| MIE | – | Metal Ion Etching |
| MIE | – | Metal Ion Etching (iontové čištění) |
| Mo | – | Molybden |
| Ms | – | Mili-Sekunda |
| MTCVD | – | Middle Temperature |
| MW | – | Mega-Watt |
| N, N ₂ | – | Dusík |
| NbC | – | Karbid niobu |
| NH ₄ | – | Amoniak |
| Ni | – | Nikl |
| nl | – | Nanolitr |
| Pa | – | Jednotka tlaku |
| PACVD | – | Plasma CVD |
| PKD | – | Polykrystalický diamant |
| PVD | – | Physical Vapour Deposition |

| Zkratka | Jednotka | Vysvětlení |
|--------------------------------|----------|--|
| Si ₃ N ₄ | – | Nitrid křemičitý – neoxidová keramika |
| SiC, | – | Karbid křemíku |
| SK | – | Slinutý karbid |
| SPM | – | Zdvih za minutu (Stroke per minute) |
| Ta | – | Tantal |
| TaC | – | Karbid tantalu |
| TEM | – | Transmisní elektronová mikroskopie |
| TiAlN | – | Nitrid hliníku titanu |
| TiAlSiN | – | Nitrid-křemík-hliník-titan (obchodní značení Marwin) |
| TiB ₂ | – | Di-borid titanu |
| TiC | – | Karbid titanu |
| TiCl ₄ | – | Tetrachlorid titanu |
| TiCN | – | Karbonitridu titanu |
| TiN | – | Nitrid titanu |
| VBD | – | Vyměnitelná břitová destička |
| VC | – | Karbid vanadu |
| W | – | Wolfram |
| WC | – | Karbid wolframu |
| XRD | – | Rentgenová difrakční analýza |
| Zr | – | Zirkon |
| 3D | – | Trojdimenzionální pohled |

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1. Materiálový list
- Příloha 2. Fotografie povlakovaných střížníků (povlak Alwin) s úpravami před zahájením procesu – Aerolap, Graf.
- Příloha 3. Fotografie povlakovaných střížníků (povlak Alwin) s úpravami před zahájením procesu – Bez úprav, ruční leštění.
- Příloha 4. Fotografie povlakovaných střížníků s úpravami po uvedení do procesu.
- Příloha 5. Fotografie povlakovaných střížníků s úpravami a podbroušeným čelem – podélný brus.
- Příloha 6. Fotografie povlakovaných střížníků s úpravami a podbroušeným čelem – příčný brus.
- Příloha 7. Etalon Mercedes testu využívaný ve společnosti SHM s.r.o.
- Příloha 8. Protokol k testování povlaku Alwin.
- Příloha 9. Protokol k testování povlaku TiCN Plus.

Vysvětlivky: písmeno A, značí adhezi povlaku k substrátu, písmeno K, značí vzájemnou adhezi mezi jednotlivými povlaky.

PŘÍLOHA 1.

áv



STANDARD GRADE SPECIFICATION

GRADE**CF-H40S**

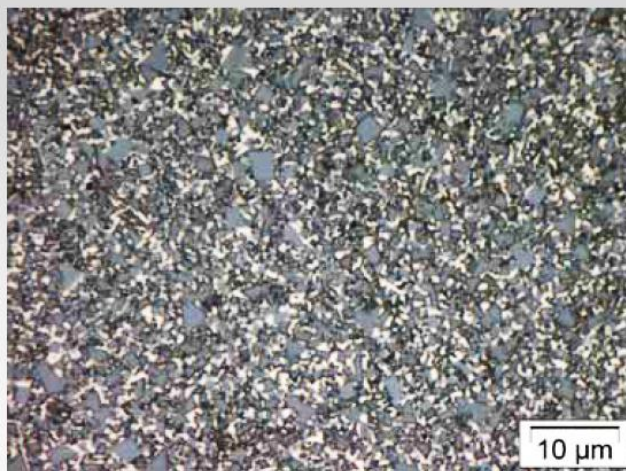
Date: 01/01/2013

| |
|------------------|
| ISO Code |
| K40 |
| US Industry Code |
| C11, C12 |

| Chemical composition | |
|----------------------|----------|
| Element | weight % |
| WC | balance |
| Co | 11.8 |
| Other | 1.2 |

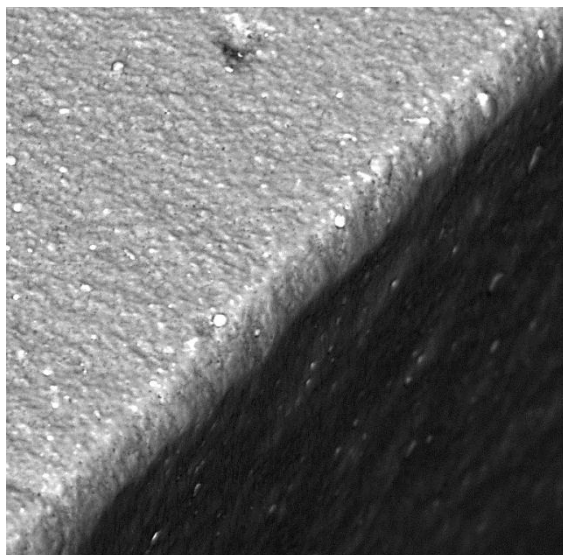
| PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES | | |
|--|--|-------|
| Average grainsize | | fine |
| Density (ISO 3369) | g/cm ³ | 14.15 |
| Hardness (ISO3878) | HV10 | 1400 |
| Hardness (ISO 3878) | HRA | 90.1 |
| Transverse rupture strength (ISO 3327) | MPa | 3000 |
| Compressive strength | MPa | 4900 |
| Young's modulus | GPa | 551 |
| Fracture toughness | MPam ^{-1/2} | 12.0 |
| Thermal conductivity | Wm ⁻¹ K ⁻¹ | n.a. |
| Thermal expansion coefficient | 10 ⁻⁶ K ⁻¹ (20-400°C) | 5.4 |

Typical microstructure

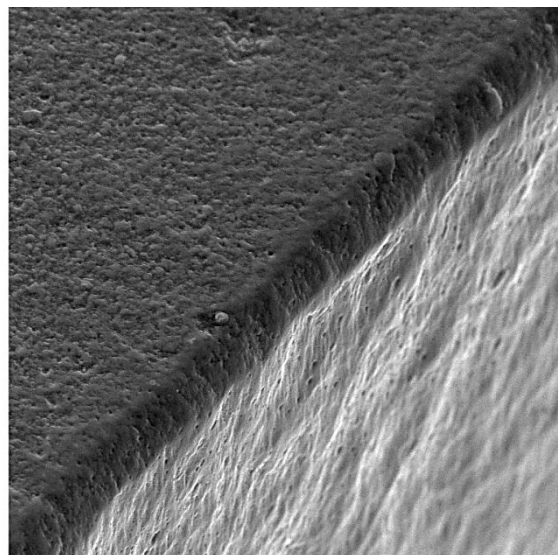


CERATIZIT Deutschland GmbH Robert-Bosch-Str. 23 D - 72186 EMPFINGEN

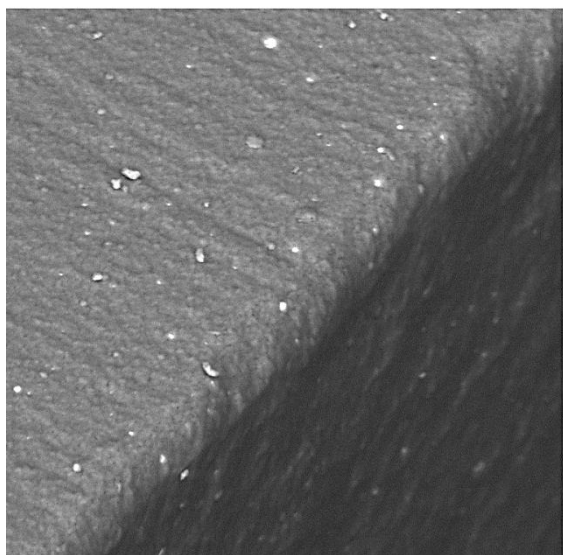
Tel. +49-7485-99802-0 Fax. +49-7485-99802-274 www.ceratizit.com

PŘÍLOHA 2.

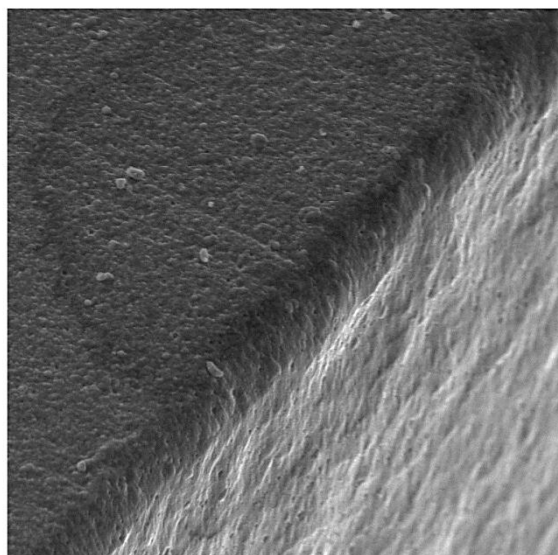
SEM MAG: 2.00 kx Det: BSE Detector VEGA\\ TESCAN
SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 03/23/15 20 µm
Vac: HiVac Device: VEGA II LMH

AEROLAP

SEM MAG: 2.00 kx Det: SE Detector VEGA\\ TESCAN
SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 03/23/15 20 µm
Vac: HiVac Device: VEGA II LMH

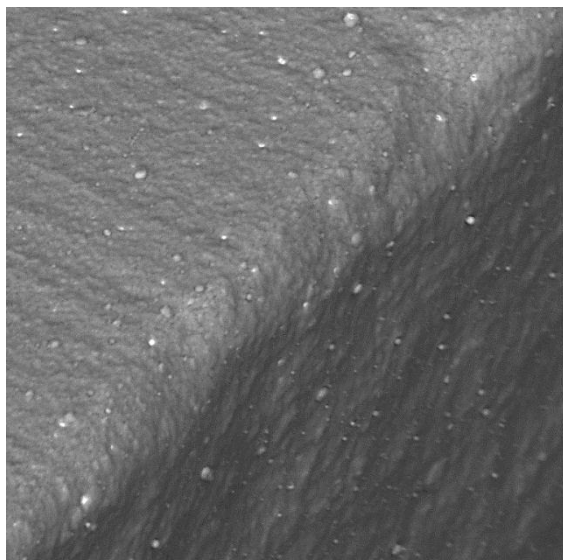
AEROLAP

SEM MAG: 2.00 kx Det: BSE Detector VEGA\\ TESCAN
SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 03/23/15 20 µm
Vac: HiVac Device: VEGA II LMH

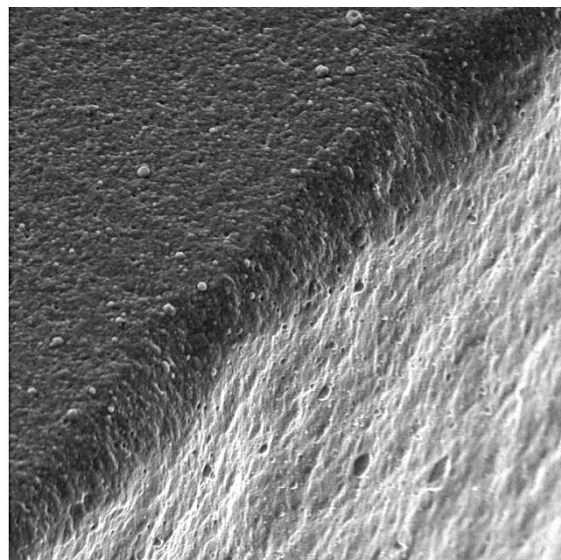
GRAF

SEM MAG: 2.00 kx Det: SE Detector VEGA\\ TESCAN
SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 03/23/15 20 µm
Vac: HiVac Device: VEGA II LMH

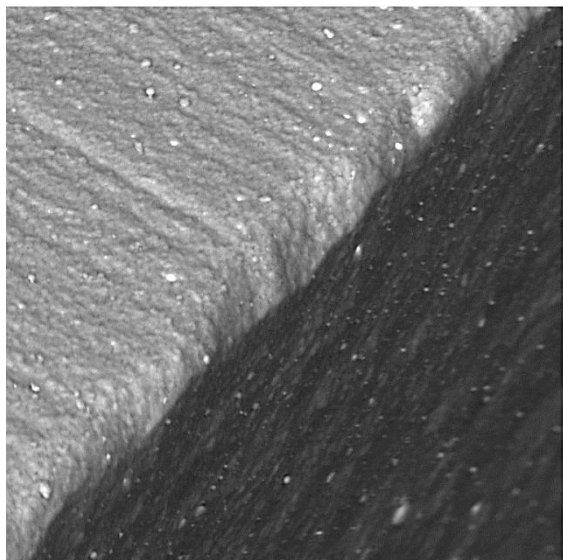
GRAF

PŘÍLOHA 3.

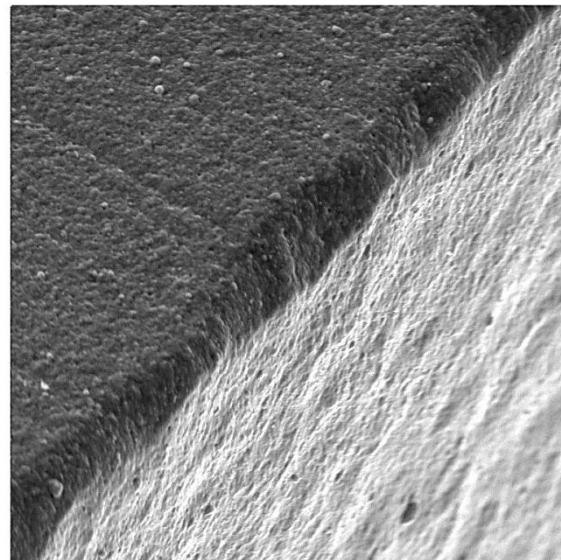
SEM MAG: 2.00 kx Det: BSE Detector
SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 03/12/15 20 µm VEGA\\ TESCAN
Vac: HiVac Device: VEGA II LMH

BEZ ÚPRAV

SEM MAG: 2.00 kx Det: SE Detector
SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 03/12/15 20 µm VEGA\\ TESCAN
Vac: HiVac Device: VEGA II LMH

BEZ ÚPRAV

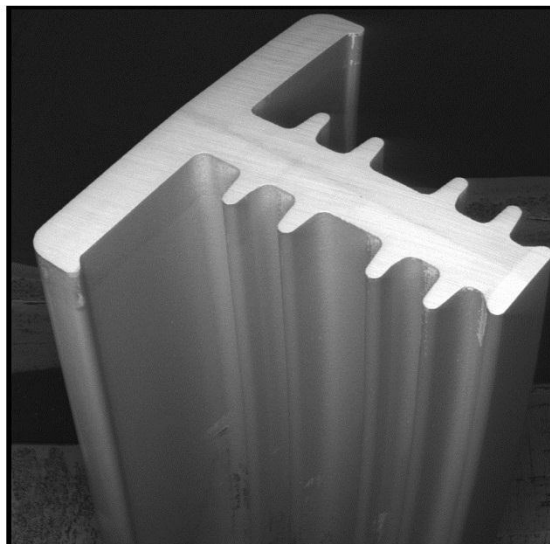
SEM MAG: 2.00 kx Det: BSE Detector
SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 03/12/15 20 µm VEGA\\ TESCAN
Vac: HiVac Device: VEGA II LMH

RUČNÍ LEŠTĚNÍ

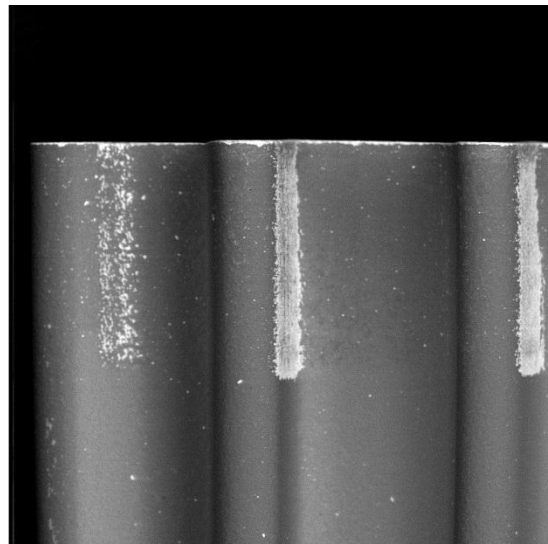
SEM MAG: 2.00 kx Det: SE Detector
SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 03/12/15 20 µm VEGA\\ TESCAN
Vac: HiVac Device: VEGA II LMH

RUČNÍ LEŠTĚNÍ

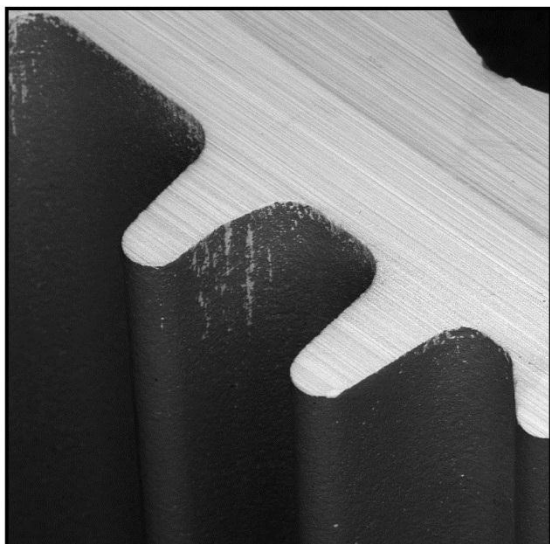
PŘÍLOHA 4.



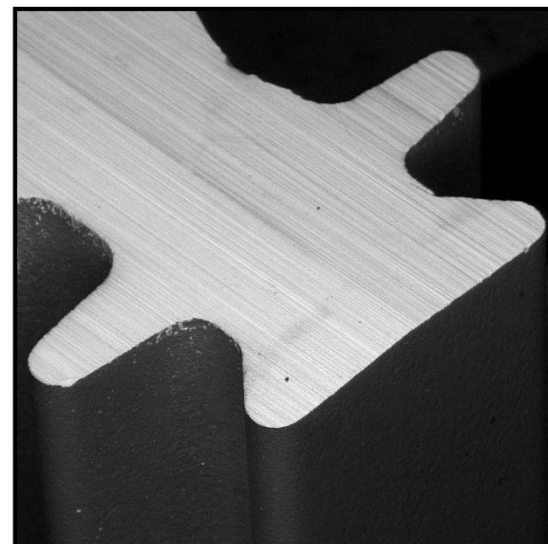
SEM MAG: ---
SEM HV: 20.00 kV
SEM MAG: ---
Det: BSE Detector
Date(m/d/y): 05/25/15
Date(m/d/y): 05/25/15



SEM MAG: ---
SEM HV: 20.00 kV
SEM MAG: ---
Det: BSE Detector
Date(m/d/y): 05/26/15
Date(m/d/y): 05/26/15

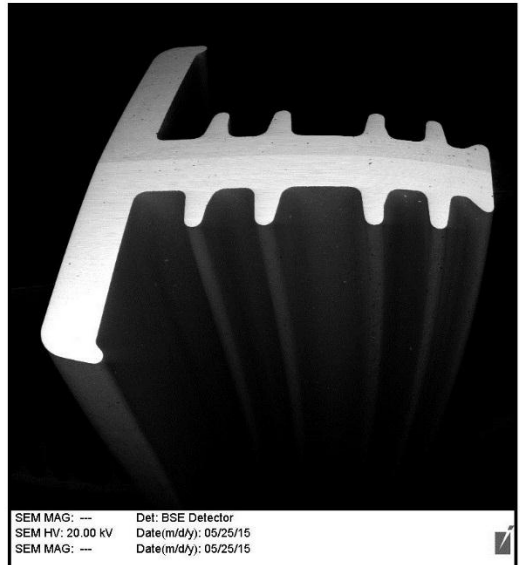
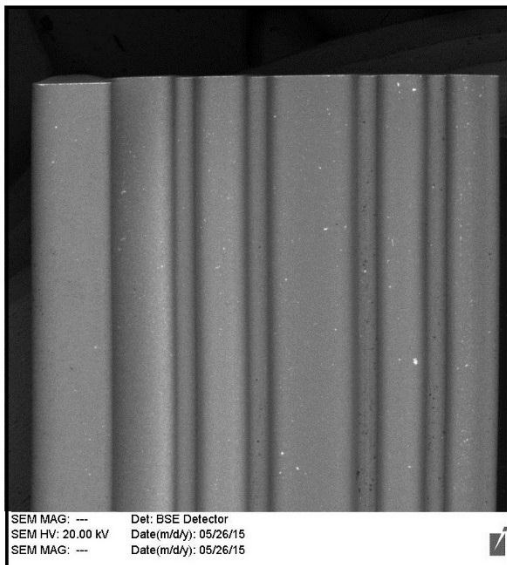
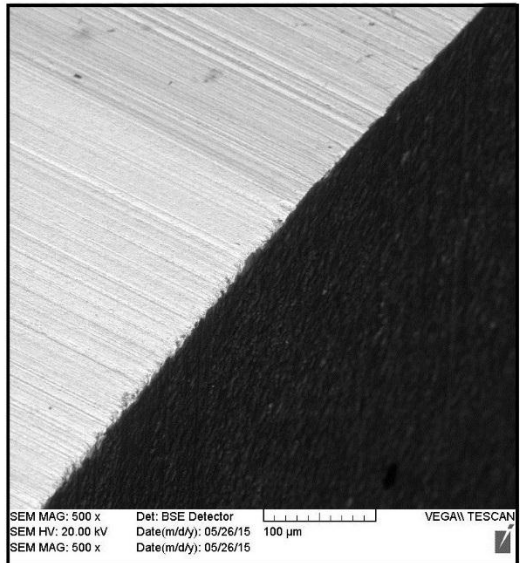
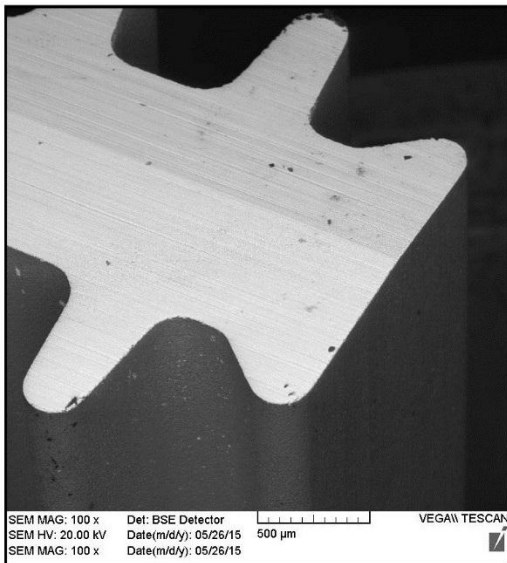
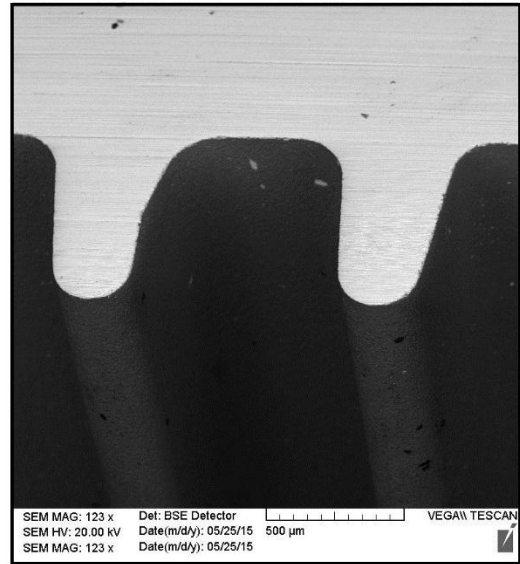
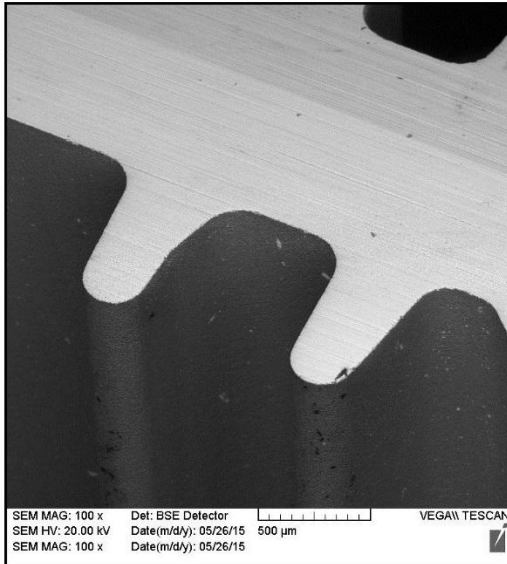


SEM MAG: ---
SEM HV: 20.00 kV
SEM MAG: ---
Det: BSE Detector
Date(m/d/y): 05/25/15
Date(m/d/y): 05/25/15

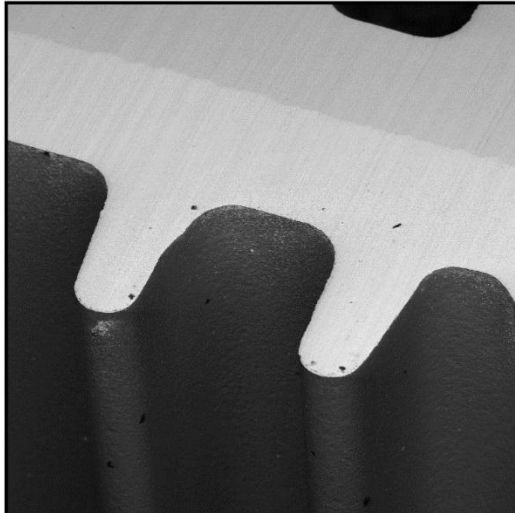


SEM MAG: ---
SEM HV: 20.00 kV
SEM MAG: ---
Det: BSE Detector
Date(m/d/y): 05/25/15
Date(m/d/y): 05/25/15

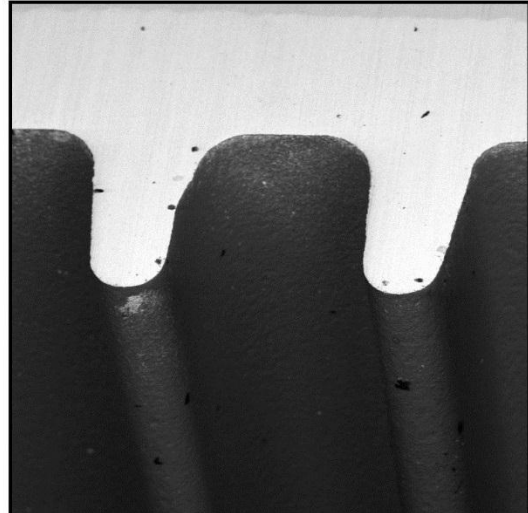
PŘÍLOHA 5.



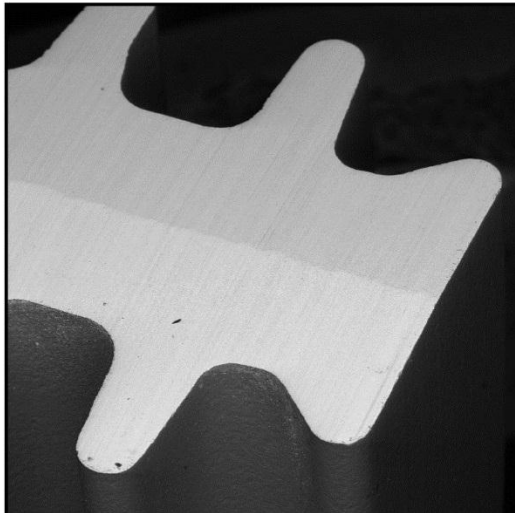
PŘÍLOHA 6.



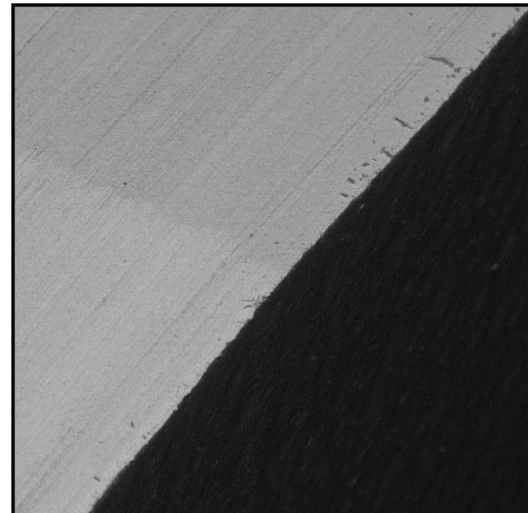
SEM MAG: 100 x Det: BSE Detector
 SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 05/26/15 500 µm VEGA\\ TESCAN
 SEM MAG: 100 x Date(m/d/y): 05/26/15



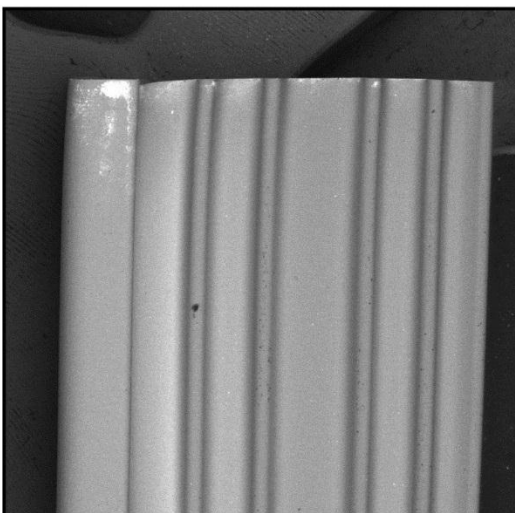
SEM MAG: 120 x Det: BSE Detector
 SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 05/25/15 500 µm VEGA\\ TESCAN
 SEM MAG: 120 x Date(m/d/y): 05/25/15



SEM MAG: 100 x Det: BSE Detector
 SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 05/26/15 500 µm VEGA\\ TESCAN
 SEM MAG: 100 x Date(m/d/y): 05/26/15



SEM MAG: 500 x Det: BSE Detector
 SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 05/26/15 100 µm VEGA\\ TESCAN
 SEM MAG: 500 x Date(m/d/y): 05/26/15



SEM MAG: --- Det: BSE Detector
 SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 05/26/15
 SEM MAG: --- Date(m/d/y): 05/26/15

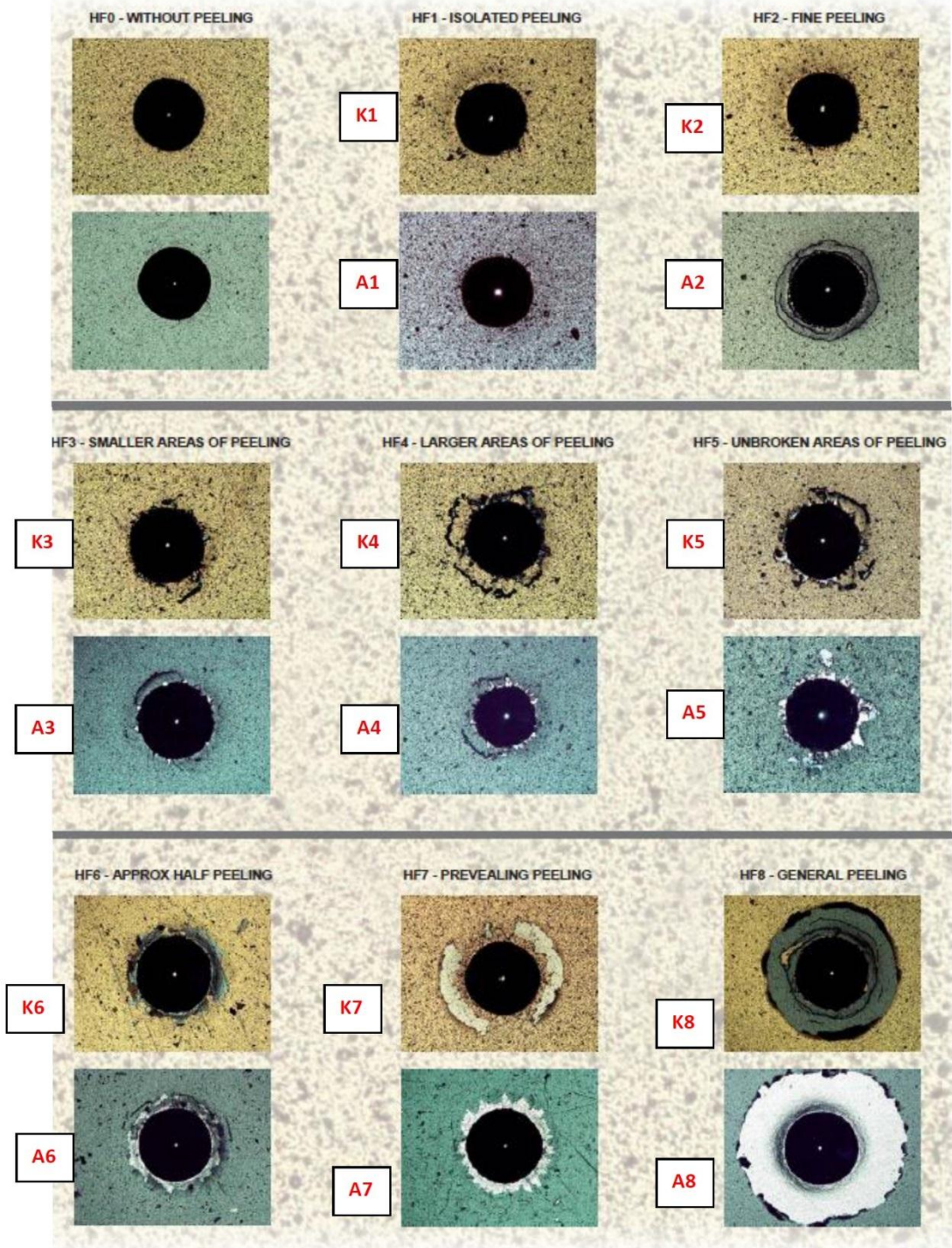


SEM MAG: --- Det: BSE Detector
 SEM HV: 20.00 kV Date(m/d/y): 05/25/15
 SEM MAG: --- Date(m/d/y): 05/25/15

PŘÍLOHA 7.



ADHESION EVALUATION



PŘÍLOHA 8.

SHM, s.r.o., Průmyslová 3, 787 01 Šumperk, Tel: 583 241176, 241438, Fax: 583 241304, e-mail: shm@shm-cz.cz

Protokol k povlaku: Alwin

Zákazník: Tyco Electronics

Objednávka: vzorky

Typ dílu: střížník PM5x

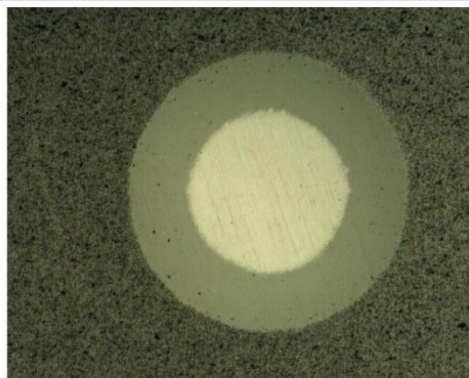
Proces č.: 1522-0167

Zařízení: Pi411-003

Tloušťka:

měřicí zařízení: Kalotester Platit CT50; Lucia Net

TI. = 2,63 μ m

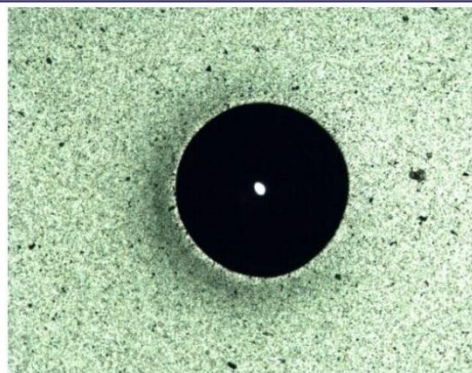


Rockwell:

měřicí zařízení: tvrdoměr Rockwell Rapid RR-IV

Zátěžná síla 150kg, doba zatížení 10s

HF1+O0



PŘÍLOHA 9.

SHM, s.r.o., Průmyslová 3, 787 01 Šumperk, Tel: 583 241176, 241438, Fax: 583 241304, e-mail: shm@shm-cz.cz

Protokol k povlaku: TiCN Plus

Zákazník: Tyco Electronics

Objednávka: vzorky

Typ dílu: střížník PM5x

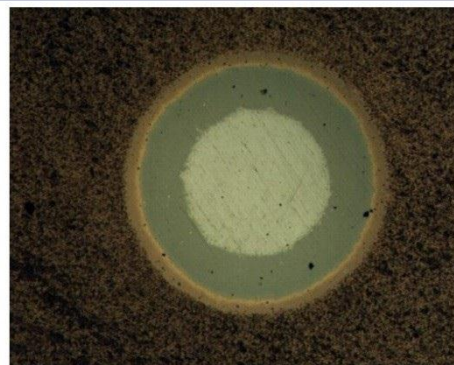
Proces č.: 1522-0172

Zařízení: Pi411-003

Tloušťka:

měřicí zařízení: Kalotester Platit CT50; Lucia Net

TI. = 2,62 μ m



Rockwell:

měřicí zařízení: tvrdoměr Rockwell Rapid RR-IV

Zátěžná síla 150kg, doba zatížení 10s

HF1+O0

