



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

VLASTNOSTI POVLAKŮ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ ZE SLINUTÉHO KARBIDU

COATING PROPERTIES OF CUTTING TOOLS CARBIDE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETRA DOLEŽALOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA PhD.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petra Doležalová

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:

Vlastnosti povlaků řezných nástrojů ze slinutého karbidu

v anglickém jazyce:

Coating properties of cutting tools carbide

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

PVD povlaky v oblasti řezných nástrojů ze slinutého karbidu a charakterizace jejich vlastností.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Rozbor současných používaných PVD povlaků.

Rozbor metody PVD povlakování.

Základní charakteristiky PVD povlaků.

Tvrдость PVD povlaků.

Adheze PVD povlaků.

Tloušťka PVD povlaků.

Abráze PVD povlaků.

Kluzné vlastnosti PVD povlaků.

Odolnost vůči oxidaci u PVD povlaků.

Diskuze.

Závěr

Seznam odborné literatury:

HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MMPublishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

ČSN ISO 3207. Statistická interpretace údajů. Stanovení statistického tolerančního intervalu. Praha: Český normalizační institut, 1993, 30 s.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 22.11.2012




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


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

ABSTRAKT

Diplomová práce na téma Vlastnosti povlaků řezných nástrojů ze slinutého karbidu je rozdělena do dvou částí. První část se zabývá teoretickým popisem metod nanášení povlaků, rozbořem současných používaných povlaků, jejich vlastnostmi a popisem metod, kterými se jednotlivé vlastnosti analyzují. Druhá část je praktická, zaměřena na zkoušení povlaků a analýzu hodnot získaných z experimentů. Cílem diplomové práce je poté porovnat vlastnosti jednotlivých zkoušených povlaků.

Klíčová slova

Fyzikální napařování, PVD povlaky, tloušťka, abraze, adheze, tvrdost, kluzné vlastnosti, oxidace

ABSTRACT

Diploma thesis is divided into two parts. The first part is focused on theoretical description of coating methods, on currently used coatings, their properties and it is also focused on description of methods, which are used for analyzing each property. The second part focuses on testing of coatings and analyzing of the values obtained from experiments. The aim of this thesis is then to compare the properties of the tested coatings.

Keywords

Physical vapour deposition, PVD coatings, thickness, abrasion, adhesion, hardness, sliding properties, oxidation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLEŽALOVÁ, Petra. *Vlastnosti povlaků řezných nástrojů ze slinutého karbidu*. Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 52 s. příloh 3. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vlastnosti povlaků řezných nástrojů ze slinutého karbidu** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Petra Doležalová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Karlu Osičkovi PhD. z VUT Brno a paní Mgr. Evě Vítámvásové z firmy Pramet tools s.r.o. za trpělivost, ochotu a za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. V neposlední řadě také děkuji své rodině za podporu během mého studia.

OBSAH

ABSTRAKT	1
PROHLÁŠENÍ	2
PODĚKOVÁNÍ	3
OBSAH	4
ÚVOD	6
1 ROZBOR METODY PVD POVLAKOVÁNÍ	7
1.1 Princip PVD povlakování	7
1.2 Typy PVD povlakování	8
1.2.1 Vakuové napařování	8
1.2.2 Naprašování	9
1.2.3 Obloukové odpařování	10
1.2.4 Iontové plátování	11
2 ROZBOR SOUČASNÝCH POUŽÍVANÝCH PVD POVLAKŮ	13
2.1 Charakteristika vybraných PVD povlaků	13
2.2 Přídavné prvky a jejich vliv na vlastnosti PVD povlaků	17
3 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY PVD POVLAKŮ	19
3.1 Tvrdost	19
3.2 Adheze	20
3.3 Tloušťka	21
3.4 Abraze	22
3.5 Kluzné vlastnosti	23
3.6 Odolnost vůči oxidaci	23
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
4 TVRDOST PVD POVLAKŮ	27
5 TLOUŠŤKA PVD POVLAKŮ	29
6 KLUZNÉ VLASTNOSTI PVD POVLAKŮ	32
7 ADHEZE PVD POVLAKŮ	34
8 ABRAZE PVD POVLAKŮ	36
9 ODOLNOST VŮČI OXIDACI U PVD POVLAKŮ	39
10 DISKUZE	44
ZÁVĚR	46

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	51
SEZNAM PŘÍLOH	52

ÚVOD

V dnešní době, v důsledku zvyšujících se nároků na kvalitu produktů a na rychlost vývoje nových technologií si i obráběcí proces žádá dalších zlepšení. Jednu z hlavních rolí v procesu zlepšování budou hrát řezné materiály, které již dokáží do značné míry řezný proces zefektivnit. V úvahu se však musí brát jak materiál nástroje, geometrie nástroje, tak i řezné podmínky. Mezi řezné materiály se řadí např. rychlořezná ocel, cermety, řezná keramika, super tvrdé řezné materiály nebo slinutý karbid, který je součástí praktické části této práce. Slinutý karbid ve formě vyměnitelných břitových destiček (VBD) je mechanicky upnut do nožového držáku, frézy či vrtáku a jeho výroba vychází z práškové metalurgie. V současnosti je slinutý karbid využíván až z 80 % procent pro výrobu veškerých VBD. Nicméně, samotné řezné materiály by bez nanesení povlaků nestačily většině aplikací.

Povlakované slinuté karbidy kombinují dobré vlastnosti substrátu a povlaku, jehož účelem je zlepšit řezné vlastnosti VBD a chránit ji před opotřebením. V době, kdy je nabídka povlaků na trhu bohatá, je důležité správně zvolit a aplikovat takový povlak, který bude optimální pro požadovanou funkci nástroje, od soustružení, frézování, vrtání, až po nanášení na tvářecí nástroje. Povlaky mohou být nanесeny buď chemickým nebo fyzikálním napařováním. Cílem této diplomové práce bude charakterizovat základní vlastnosti čtyř různých povlaků nanесených na vzorky metodou fyzikálního napařování. Pomocí příslušných metod určit tloušťku, tvrdost, kluznost, adhezi jednotlivých povlaků a také jejich odolnost vůči oxidaci a abrazi. Získané výsledky pak kriticky zhodnotit.

1 ROZBOR METODY PVD POVLAKOVÁNÍ

Jedním z nejdůležitějších kroků při vývoji slinutých karbidů byl vznik povlakovacího systému. Metoda PVD (physical vapour deposition) se datuje na začátek 80. let 20. století, je ekologická, nepracuje s žádným toxickým nebo nebezpečným prvkem. Povlakované nástroje (obráz. 1) mají vyšší výkon a poskytují větší životnost než nástroje nepovlakované.¹



Obr. 1 Ukázka povlakovaných břitových destiček.²

1.1 Princip PVD povlakování

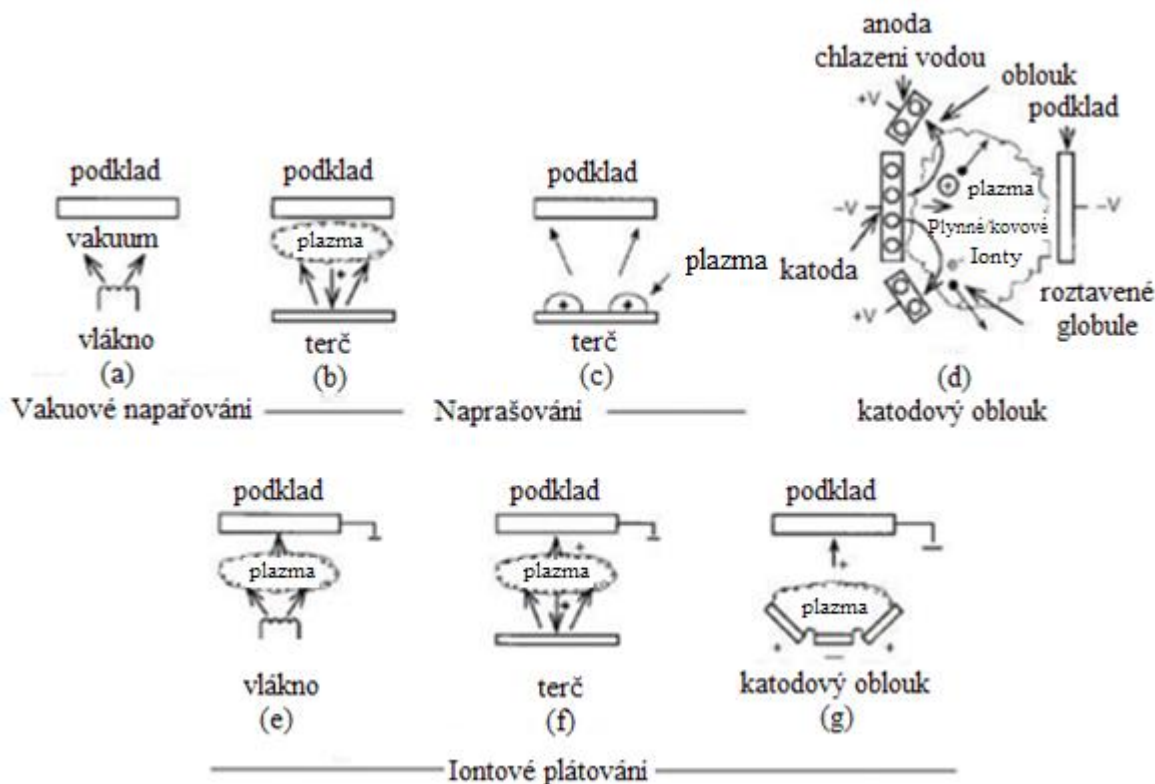
Metoda PVD je proces nanášení povlaku, ve kterém je materiál odpařován z pevného nebo tekutého zdroje ve formě atomů nebo molekul. Odpařený materiál je poté přenesen ve formě par přes vakuum nebo nízkotlaké plynné (popř. plazmové) prostředí na podklad, kde kondenzuje. V nanášecím procesu se sloučenina formuje díky reakci nanášeného materiálu s okolním plynným prostředím, např. s argonem nebo dusíkem. Povlaky vznikají při tlaku 0,1 – 10 Pa ve vakuové komoře, do níž je vpouštěn pracovní plyn. Existuje také tzv. kvazi – reaktivní nanášení, což je nanášení vrstev sloučenin, kde nedostatek těkavějších nebo reaktivních prvků během přenosu a kondenzačního procesu je kompenzován parciálním tlakem reaktivního plynu v nanášecím prostředí.¹

Běžně jsou PVD procesy používány k nanášení tlouštěk v rozmezí jednotek až tisíců nanometrů a lze tyto procesy použít i pro nanášení několikavrstvých povlaků. PVD metoda umožňuje povlakovat jak ploché tvary, tak i složitější geometrie. Rychlost povlakování se pohybuje okolo 1 – 10 nm za sekundu.¹

Před nanášením samotného povlaku se musí povrch očistit a odmastit. Dále musí vzorky před nanášením projít vakuovou komorou a následně se zahřejí na požadovanou teplotu.^{1,3}

1.2 Typy PVD povlakování

Mezi hlavní metody PVD povlakování patří vakuové napařování, naprašování, obloukové odpařování a iontové plátování. Schematická zobrazení principů metod jsou zobrazena na obr. 2.¹



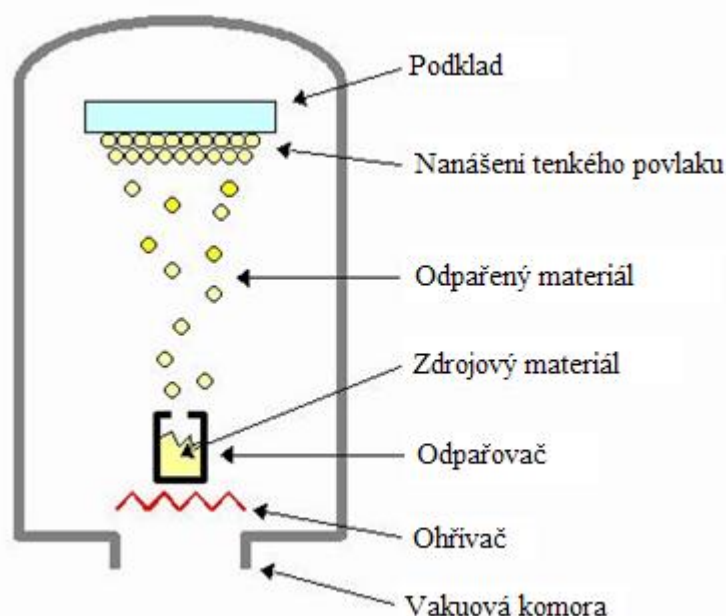
Obr. 2 Metody PVD: Vakuové napařování (a), naprašování (b) a (c), naprašování ve vakuu (d), Iontové plátování s tepelným zdrojem odpařování (e), Iontové plátování s naprašovacím zdrojem (f), Iontové plátování se zdrojem obloukového odpařování (g).¹

1.2.1 Vakuové napařování

Vakuové napařování je metoda, která slouží k odpařování materiálu z tepelného odpařovacího zdroje a k nanesení tohoto materiálu na povlakovaný podklad. V prostoru mezi tepelným zdrojem a podkladem dochází k malým nebo vůbec žádným srážkám odpařeného materiálu s molekulami plynu. Vakuové prostředí je schopné redukovat plynné znečištění v nanášecím systému na nízkou úroveň. Tlaky při vakuovém napařování obvykle dosahují $10^{-4} - 10^{-6}$ Pa, v závislosti na přípustném stupni plynného znečištění.¹

Vakuové napařování se obecně provádí pomocí zdroje tepelného záření, jako např. wolframové cívký nebo vysoce energetického elektronového laseru. Podklad je připevněn ve značné vzdálenosti od zdroje napařování, aby se zmírnilo působení tepla na podklad. Schéma metody je zobrazeno na obr. 3.¹

Vakuové napařování se používá pro tvorbu zrcadlových, dekorativních, elektricky vodivých, korozně odolných povlaků a povlaků, které jsou odolné proti opotřebení.¹



Obr. 3 Schéma vakuového napařování.⁴

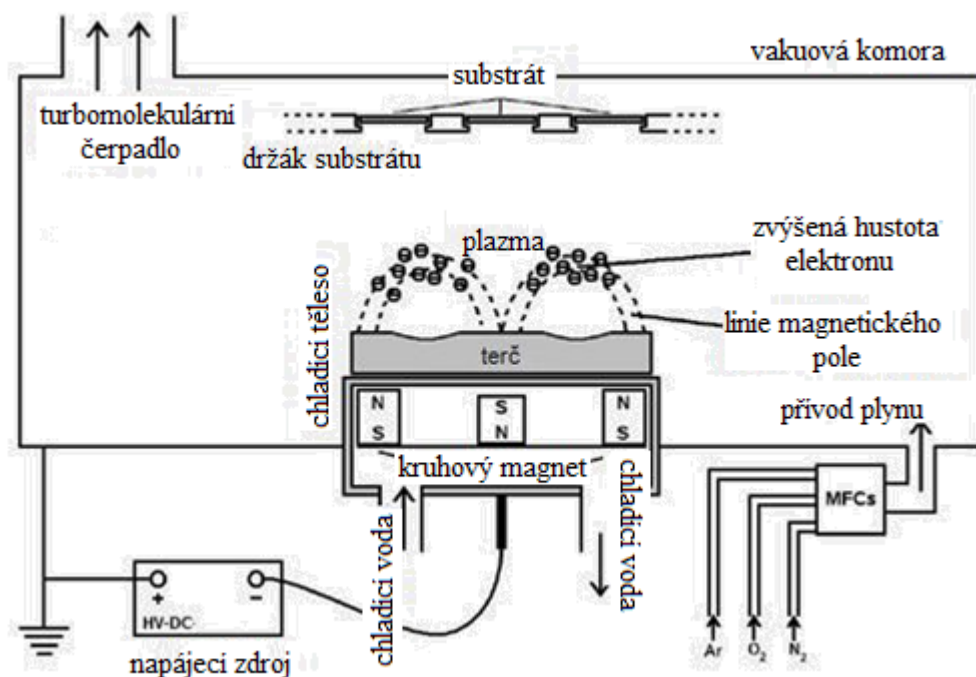
1.2.2 Naprašování

Naprašování je proces nanášení částic odpařených z povrchu nanášeného materiálu (terče) na podklad, pomocí fyzikálního naprašovacího procesu. Naprašování je neteplotní proces odpařování. Povrchové atomy nanášeného materiálu jsou vypuzeny z pevného povrchu pomocí kinetické energie částice, kterou je obvykle plynný iont urychlený plazmatem.¹

Naprašovací zdroje mohou být částice, směsi nebo sloučeniny. Materiál je z terče odpařován ve velkém množství. Naprašovací terče jsou zdrojem odpařování s velkou životností, které mohou být upevněny tak, aby odpařovaly v jakémkoli směru. Obecně je vzdálenost zdroje od podkladu kratší než u vakuového napařování.¹

Naprašování může být prováděno energetickým iontovým nastřelováním z pevného povrchu ve vakuu, za použití iontového děla nebo nízkotlakého plazmatu, kde naprašované částice čelí malé nebo žádné plynné kolizi v prostoru mezi terčem a podkladem. Naprašování se provádí také za vysokého tlaku plazmatu, kde energetické částice naprašované nebo odražené od naprašovacího terče jsou nahřaty kolizemi s plynnou fází předtím, než dosáhnou povrchu podkladu. Schéma metody je zobrazeno na obr. 4.¹

Naprašování je široce používáno na nanášení tenkých povlaků např. velmi tvrdých povlaků na nástroje a strojní součásti, dekorativních povlaků, magnetických povlaků, a dalších.¹



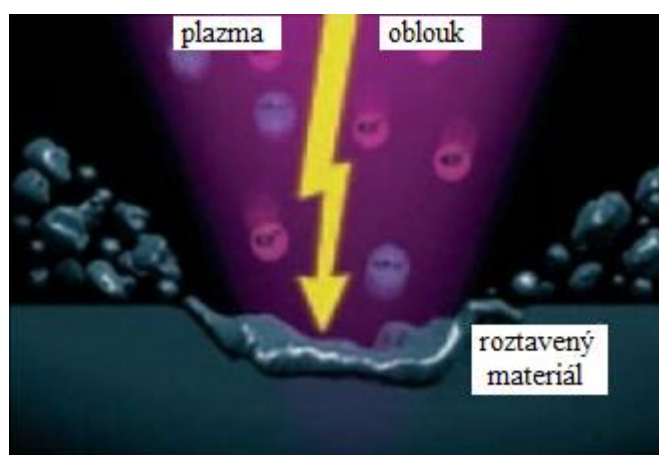
Obr. 4 Schéma naprašování.⁵

1.2.3 Obloukové odpařování

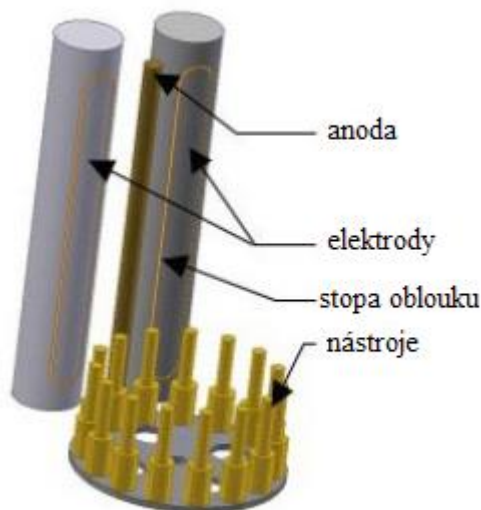
U této metody se využívá nízkonapěťového silnoproudého oblouku, hořícího mezi anodou a katodou. Vakuová komora o tlaku 0,5 – 3 Pa představuje anodu a terč představuje katodu. Na terči je hoření pouze bodové, takže se katoda taví jen v místě hoření oblouku nazývaném jako katodová skvrna (obr. 5), ta dosahuje teplot až 15000 °C. Při takovýchto teplotách lze odpařovat téměř každý materiál, který je elektricky vodivý. Velikost katodové skvrny se pohybuje okolo 10 μm a je ovlivněna mírou elektrického proudu (50 – 450 A). Katodová skvrna je regulována pomocí magnetického pole, to umožňuje kvalitnější výrobu povlaků a efektivnější využití terče. Teplota podkladu se pohybuje v rozmezí 400 – 550 °C.⁶

Výhoda bodového hoření spočívá ve vysoké lokální rychlosti odpařování. Ionizace odpařených částic, ke které dochází, má kladný vliv na přilnavost povlaku k podkladu.⁶ K negativním jevům této metody však patří tvorba tzv. mikročástic. Ty jsou tvořené mi-

kroskopickými částicemi odpařovaného materiálu. Důsledkem je zhoršení drsnosti povrchu povlaku materiálu, odolnosti vůči korozi a součinitele tření. Moderní povlakovací zařízení, sloužící k obloukovému odpařování využívají rotačních katod, však umí tyto negativní jevy minimalizovat. Tvorbě mikročástic lze předcházet také vyřazením elektromagnetického filtru, který je součástí zařízení, z procesu povlakování. Touto modifikací se ale výrazně zpomaluje proces povlakování. Doporučuje se používat pouze u speciálních aplikací.⁶ Doba povlakování za pomoci obloukového odpařování se pohybuje v řádech hodin a patří mezi nejpoužívanější metody současnosti. Schéma zařízení je zachyceno na obr. 6.⁶



Obr. 5 Schéma katodové skvrny.⁷



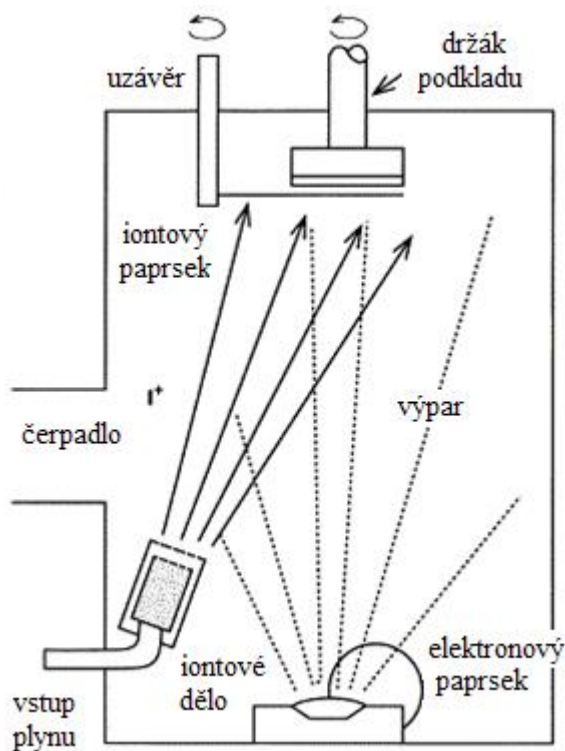
Obr. 6 Schéma zařízení.⁷

1.2.4 Iontové plátování

Během iontového plátování se povlak na daném podkladu vytváří bombardováním nanášeného materiálu pomocí energetických částic o velikosti atomu. Touto metodou se dají měnit a kontrolovat vlastnosti nanášeného povlaku. Při iontovém plátování hrají velkou roli proměnné, jako jsou tok a hmotnost bombardovaných částic a poměr mezi bombardovanými částicemi a částicemi nanesenými. Nanášený materiál může být odpařován odprašo-

váním, obloukovou erozí nebo rozkladem pomocí chemických par. Energetické částice, používané pro bombardování, jsou obvykle ionty inertního nebo reaktivního plynu. Příklad uspořádání experimentálního zařízení při vakuovém iontovém plátování je uveden na obr. 7.¹

Iontové plátování zaručuje hustý povlak za relativně vysokých tlaků, kde rozptýl plynů dokáže zvýšit pokrytí povrchu. Iontovým plátováním se nanáší velmi tvrdé povlaky a povlaky vhodné i na složité povrchy.¹



Obr. 7 Schéma vakuového iontového plátování.⁸

2 ROZBOR SOUČASNÝCH POUŽÍVANÝCH PVD POVLAKŮ

Řezné materiály s PVD povlaky jsou specifické svojí houževnatostí, ale také ostrostí břitů. Doporučují se pro obrábění materiálů, které mají tendenci ulpívat na břitu nebo pro dokončovací aplikace. Konkrétně se aplikují např. na monolitní karbidové frézy, vrtáky a velkou část materiálů pro zapichování, frézování, řezání závitů a středové břitové destičky pro vrtání.⁹

2.1 Charakteristika vybraných PVD povlaků

- **Povlak TiN**

TiN povlaky zlaté barvy se vzhledem ke svým vyváženým vlastnostem řadí mezi běžně používané povlaky. K výhodám patří např. nízká reakce s kovovými materiály, vysoká tvrdost, dobrá adheze, zvýšení houževnatosti nástroje, dobrá chemická stabilita. Tvrdost povlaku se pohybuje kolem 2300 HV a max. pracovní teplota okolo 500 °C.¹⁰

Aplikační oblastí tohoto povlaku je např. povlakování nástrojů sloužících k obrábění materiálů na bázi železa či povlakování odvalovacích fréz a další. Vzhledem ke své barvě je vhodný i pro dekorativní účely. Příklad použití povlaku TiN je na obr. 8.¹⁰



Obr. 8 Ukázka použití povlaku TiN: Povlak na odvalovací fréze (nahore), povlak na vrtáku z rychlořezné oceli (dole).^{10,11}

- **Povlak ZrN**

Jasný, zlatý povlak ZrN je oproti povlaku TiN zhruba o 30 % tvrdší, má větší kluznost a za vyšších teplot lepší chemickou a tepelnou stabilitu. Nástroje povlakované ZrN vydrží o 200 – 1000 % déle než nepovlakované nástroje. Tvrdost povlaku se pohybuje okolo 2600 HV a max. pracovní teplota je 600 °C. Zajímavostí je, že povlak ZrN je biokompatibilní a díky této vlastnosti je vhodný jednak k povlakování externího a interního medicínského nářadí, tak i kloubních náhrad, což je výhodou pro pacienty, kteří trpí alergií na kovový materiál (zhruba 13% populace). Další uplatnění je ve tváření. Příklad použití povlaku ZrN je na obr. 9.^{12,13,14}



Obr. 9 Příklad použití povlaku ZrN naneseném na nástrojích z rychlořezné oceli.¹³

- **Povlak TiCN**

Povlaky TiCN modrošedé barvy se vyznačují nízkým koeficientem tření, vysokou houževnatostí a odolností vůči opotřebení i přes svoji vysokou tvrdost. Tvrdost povlaku se pohybuje kolem 3500 HV a max. pracovní teplota okolo 400 °C. Pro své vlastnosti je ceněný např. při přerušovaném řezu, kdy vznikají nízké teploty na řezné hraně. Obvyklá aplikační oblast je frézování, řezání, vrtání a soustružení. Ukázka použití povlaku TiCN je na obr. 10.¹⁵



Obr. 10 Ukázka použití povlaku TiCN: v barvě modro šivé (vlevo), v antracitové barvě (vpravo). Povlak nanesený na nástrojích z rychlořezné oceli. Odstíny barev jsou závislé na poměru prvků v povlaku.¹⁵

- **Povlak TiAlSiN**

Povlaky antracitové barvy jsou ceněné pro svou extrémní oxidační odolnost, odolnost proti opotřebení a vysokou tepelnou tvrdost. Povlak TiAlSiN dosahuje tvrdosti kolem 3400 HV a max. pracovní teploty až kolem 900 °C a představuje nový směr pro suché, tvrdé, vysokorychlostní obrábění a obrábění velmi abrazivních materiálů. Příklad použití povlaku TiAlSiN je zachycen na obr. 11.¹⁶



Obr. 11 Nástroje povlakované TiAlSiN.¹⁶

- **Povlak CrN**

Barva povlaku CrN je stříbrně – sivá. Mezi výhody povlaku CrN patří nízké pnutí, vysoká stabilita na vzduchu a především je vyhledávaný pro svoji dobrou adhezi, dobrou korozní odolnost a oxidační vlastnosti. Možnost nanášet i hrubší vrstvy je dána vysokou tvrdostí povlaku a také jeho velmi nízkou křehkostí. Tvrdost povlaku se pohybuje okolo 2000 HV a max. pracovní teplota okolo 600 °C. Povlaky CrN se uplatní při obrábění slitin na bázi titanu a mědi. Ukázka aplikace povlaku CrN je zobrazena na obr. 12.¹⁷



Obr. 12 Ukázka aplikace povlaku CrN naneseného na konstrukční a rychlořezné oceli.¹⁸

• Povlak TiAlN

Fialový povlak TiAlN (obr. 13) je jedním z nejpoužívanějších povlaků v moderním, vysoce výkonném obrábění. Povlaky TiAlN jsou odolné vůči oxidaci a umožňují vykonávat práci zhruba o 20 – 35 % rychleji než s povlakem TiN. Obsah hliníku v těchto povlacích je zhruba 50 procent. Tvrdost je asi 3000 HV a max. pracovní teplota 800 °C. Aplikační oblast povlaku TiAlN je v obrábění abrazivních materiálů, např. litiny a je vhodný pro obrábění za sucha díky vysoké tepelné odolnosti. Nicméně, s obsahem hliníku v rozmezí 65 – 70 % ztrácí povlaky tvrdost a odolnost proti opotřebení.^{12,19,20}

Rozdíl mezi povlakem TiAlN a povlakem AlTiN je v procentním obsahu prvku v povlaku. Prvek na prvním místě je obsažen ve větší míře než prvky ostatní.^{12,19,20}



Obr. 13 Povlak TiAlN nanesený na korunkový vrták z rychlořezné oceli.²¹

• Povlak TiCrN

Povlaky TiCrN tmavě šedé barvy mají vysokou tvrdost, vysoký stupeň plasticity, dobrou odolnost proti korozi a oxidaci. Tvrdost povlaku se pohybuje kolem 3200 HV a max. pracovní teplota je 650 – 700 °C. Nástroje povlakované TiCrN jsou doporučeny pro dokončovací operace a pro frézování za použití procesní kapaliny.²²

• Shrnutí vlastností PVD povlaků

Pro rychlou orientaci mezi povlaky slouží shrnutí v tab. 2.1 a tab. 2.2.

Tab. 2.1 Vlastnosti povlaků (MP – víceúčelový povlak).²³

Povlak	Barva	Tvrdost HV	Tloušťka [μm]	Max tepl. použití [°C]	Hlavní použití pro:
TiN	zlatá	2400	1 – 7	600	univerzální jakost
TiAlN	černo-fialová	3300	1 – 4	800	univ. jakost, pro stabilní řezy
TiCN (MP)	bronzově hnědá	3400	1 – 4	400	frézov., závitov., přeruš. řezy
AlTiN	černá	3600	1 – 4	900	výkonná jakost, pro tvrdé obr.
TiCN (MP)	šedomodrá	3300	1 – 4	400	pro frézování a závitování
CrN	kovově stříbrná	1900	1 – 7	700	obrábění lehkých kovů a Al slit.
ZrN	bílo – zlatá	2300	1 – 4	550	obrábění Mg a Ti

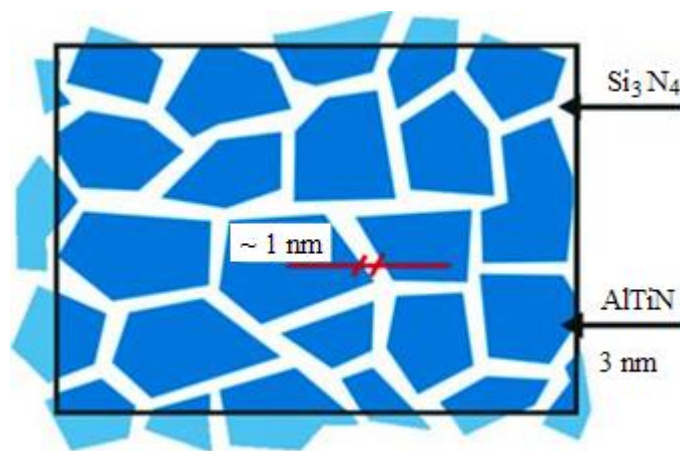
Tab. 2.2 Volba povlaku vzhledem k obráběnému materiálu.²³

Obráběný materiál	Vrtání	Soustružení	Frézování	Řezání závitů	Pilování	Vystružování protahováním
ocel do 800 Mpa	TiAlN	AlTiN	TiAlN	TiN	TiN	TiCN
Al slit., Si nad 12 %	TiCN	TiCN	TiCN (MP)	CrN	CrN	CrN
Al slit., Si do 12 %	CrN	CrN	CrN	TiCN (MP)	TiCN (MP)	TiCN (MP)
měď	CrN	CrN	CrN	CrN	CrN	CrN
bronz, mosaz	TiCN	TiCN	TiCN	TiCN	TiCN	TiCN

2.2 Přídavné prvky a jejich vliv na vlastnosti PVD povlaků

• Křemík

Povlaky s obsahem křemíku jsou známy pro svoje dokonalé izolační vlastnosti, vysokou tepelnou odolnost a díky tomu jsou vhodné právě pro vysokorychlostní obrábění. Přídavkem křemíku v povlacích a za použití správné technologie může vzniknout tzv. nanokompozitní povlak, který je špičkou mezi otěruvzdornými povlaky. Zrna nanokrystalického povlaku (TiAlN-, AlCrN-) se utváří v amorfni matrici, která je tvořena nitridem křemíku (obr. 14). Takto je uchována vysoká tvrdost, přesahující i 5000 HV.¹⁹



Obr. 14 Nanokrystalická zrna TiAlN-, AlCrN- nebo AlTiCrN- umístěná v amorfni matrici tvořené nitridem křemíku.¹⁹

• Chrom

Povlaky, obohacené o chrom, vynikají vysokou odolností proti abrazivnímu otěru a vysokou houževnatostí. Pro zvýšení tepelné odolnosti je tento prvek také vhodný, nicméně je jeho účinnost pro některé aplikace nedostatečná. Chrom je však ze zdravotního a ekologického hlediska závadný. Při likvidaci povlaků z vyřazených nástrojů může totiž vzniknout Cr^{VI} , který způsobuje rakovinu kůže.¹⁹

- **Yttrium**

Zvyšuje odolnost vůči oxidaci a korozní odolnost. Přídavek 3 % chromu a 2 % yttria výrazně zlepšuje oxidační chování u konvenčních povlaků, jako jsou TiN a TiAlN. Yttrium také podporuje zdokonalení tvaru zrna, což vede k nižšímu zbytkovému pnutí v povlaku.²⁴

- **Vanad**

Zahrnutí vanadu do mřížky TiN zvyšuje tvrdost povlaku. Bohužel však při vyšším obsahu vanadu klesá tažnost povlaků. Optimalizace výše přídavku vanadu je důležitá kvůli odolnosti proti opotřebení.²⁴

- **Bor**

Přídavek boru vede ke zlepšení abrazivního opotřebení povlaků na bázi titanu a hliníku. Bor v mřížce těchto povlaků zlepšuje řezný výkon o dva řády. Přídavek boru a uhlíku snižuje třecí součinitel povlaku. Není vždy nezbytné mít tvrdý povlak s vysokým modulem pružnosti. Povlak s nižší tvrdostí i nižším modulem pružnosti může působit jako vynikající mezivrstva mezi měkkým podkladem a ultra tvrdým povlakem s vysokým modulem pružnosti.²⁴

- **Hafnium**

Nitridy a karbidy s přídavkem hafnia mají vyšší tavící teploty i vyšší entalpie formování, díky tomu jsou odolné vůči kráterového opotřebení.²⁴

Vlastnosti povlaků jsou ovlivňovány nejen přidáním a změnou poměru chemických prvků, ale také zvolenou PVD technologií, přičemž každá je založená na jiném fyzikálním principu. Povlakovací zařízení se liší i ve své konstrukci a nastavených parametrech povlakování. To vše ovlivňuje výsledné vlastnosti povlaků.

3 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY PVD POVLAKŮ

Povlaky nanesené pomocí fyzikálního napařování (PVD) jsou tenké a jejich vlastnosti jsou tedy těžko definovatelné. Obecně je využití povlakových kompozitů závislé na kombinaci vlastností povlaku a podkladu.²⁵

V současné době je vztah mezi mechanickými vlastnostmi, třením a povrchovým opotřebením příliš složitý na to, aby byl popsán pouze obecnými fyzikálními nebo matematickými teoriemi. Detailní znalost základních vlastností však přispívá k hlubšímu a kvalitnějšímu porozumění chování povlakových kompozitů a pomáhá při vývoji nových povlaků.²⁵

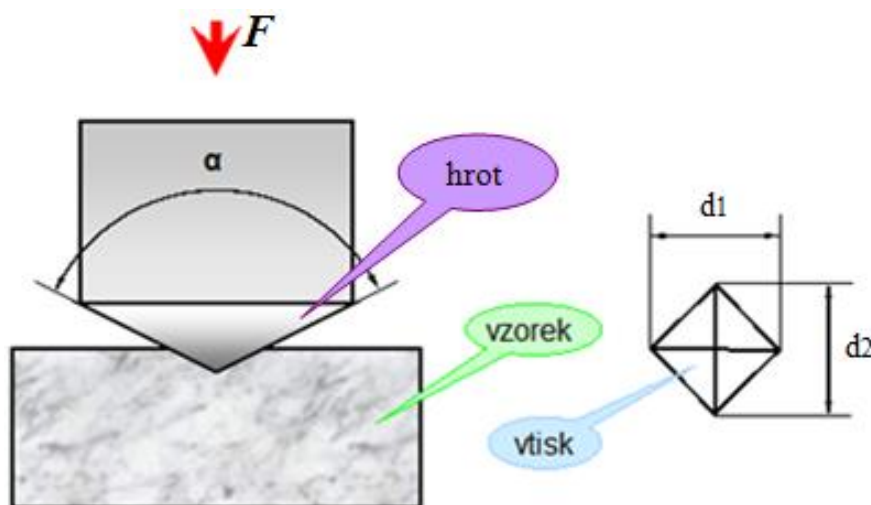
3.1 Tvrdost

Tvrdost je vysvětlována jako odolnost materiálu vůči vnikání cizího tělesa. Měření tvrdosti se používá k posouzení kvality povlaku, a také slouží k předpovědi výkonu povlaku v rozmanitých aplikacích. Skutečná hodnota tvrdosti by však neměla být přeceňována. Na opotřebením má větší vliv než tvrdost např. tažnost, chemická stabilita, odolnost proti únavě a další. Je také důležité zmínit, že tvrdost není materiálová konstanta. Každé měření závisí na tloušťce povlaku, tvrdosti substrátu, geometrii indentoru a několika dalších parametrech.^{25,26}

Jednou ze zkoušek sloužících ke zjištění tvrdosti povlaku je zkouška podle Vickerse (obr. 15), kde do zkoumané vrstvy kolmo k povrchu proniká diamantový čtyřboký jehlan, zatěžovaný silou F po stanovenou dobu 10 – 15 sekund. Následně se změří střední hodnota úhlopříček vtisku a pomocí vzorce (3.1) se převede na hodnotu tvrdosti.²⁶

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \quad (3.1)$$

kde: HV - tvrdost podle Vickerse
F [N] - síla vtlačování
d [mm] - průměr délky úhlopříček vtisku
 α [°] - vrcholový úhel vnikajícího tělesa

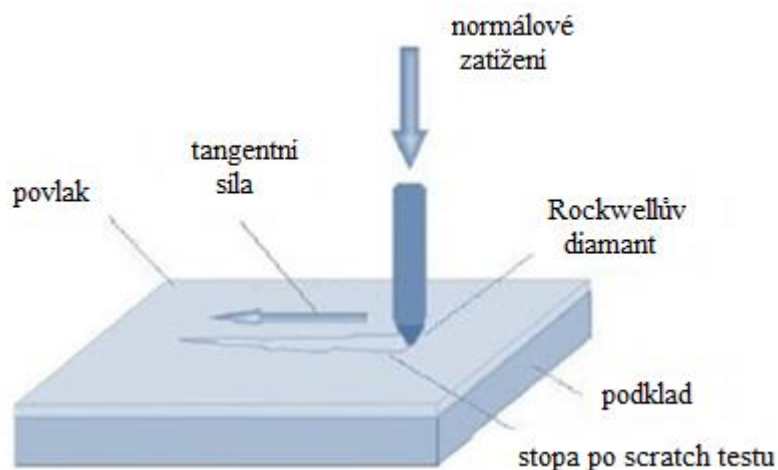
Obr. 15 Schéma zkoušky dle Vickerse.²⁶

3.2 Adheze

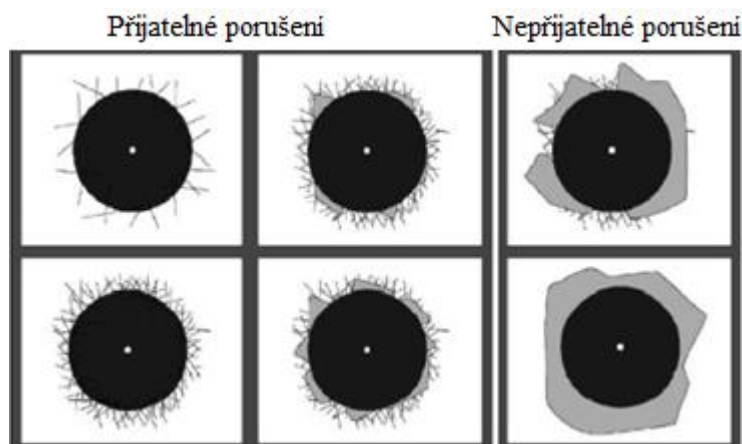
Adheze, jinak také přilnavost, je schopnost materiálu přilnout k sobě. Z fyzikálního hlediska se jedná o přenos tečných sil při styku dvou povrchů bez zjevného pohybu.²⁷

Pro dosažení maximálního výkonu povlakovaných nástrojů je nutné, aby povlak perfektně přilnul k podkladu. Klade se proto důraz na přípravu podkladu před nanesením samotného povlaku. Adheze je nejdůležitější vlastností povlaků a je tedy kritickým parametrem. Měří se pomocí metody “Scratch test” (obr. 16).²⁸

Tato technika spočívá v řízeném zatěžování diamantového hrotu (nebo hrotu z karbidu wolframu), který se zároveň pohybuje po testované ploše. Zátěžová síla je v rozmezí 20 – 120 N. Kritická zátěž, tedy síla, při které dojde k odtržení povlaku, je indikována buď akustickým senzorem připojeným k paži testeru, nebo vestavěným optickým mikroskopem. Hodnota adheze větší než 60 N zajišťuje, že při běžných aplikacích nedojde ke stržení či odloupení vrstvy.²⁸

Obr. 16 Scratch test.²⁹

Další metodou, jak měřit adhezi povlaku je zkouška pomocí Rockwellova kuželového diamantu tzv. „Mercedes test“. Diamantový kužel proniká do povrchu povlakovaného materiálu a způsobuje tak masivní plastické deformace na rozhraní povlak – substrát a tím dochází k odlupování povlaku. Typ a rozsah porušení povlaku vypovídají o jeho přilnavosti (obr. 17).³⁰



Obr. 17 Porucha povlaku.³¹

3.3 Tloušťka

Tloušťka povlaků může výrazně ovlivnit výkon řezného nástroje, řezné síly i trvanlivost nástroje. Pohybuje se v rozmezí 2 – 10 μm . Tloušťka povlaku musí být volena optimálně, vzhledem k použití nástroje, např. pro závitníky se nanáší vrstva okolo 2 μm , u odvalovacích fréz dosahuje tloušťka až 8 μm . Růst tloušťky povlaku zhoršuje mechanickou pevnost naneseného povlaku, může však zvýšit efektivitu poloměru zaoblení na řezné hraně, čímž na ní snižuje napětí. Navíc je substrát lépe chráněn vůči abrazivnímu opotřebení a tepelnému zatížení. S rostoucí tloušťkou PVD povlaku sice roste i jeho výkon, ale také ceny za PVD povlakování.^{32,33}

Vliv kladu jednotlivých vrstev PVD povlaků na vlastnosti řezných nástrojů

Vícevrstvé povlaky vykazují lepší vlastnosti než povlaky s jednou vrstvou. Speciálně nanovrstvy na rozdíl od monovrstev poskytují následující výhody:²⁴

- 1) Větší odolnost vůči odštěpení mikročástic.
- 2) Redukují adhesivní opotřebení díky nanokrystalické struktuře na rozdíl od struktury s kuželovitými zrny, která je typická pro jednovrstvý tlustý povlak.
- 3) Jednotlivá kuželovitá zrna v běžných PVD povlacích se plasticky deformují vlivem mechanického zatížení, což ústí v širokosáhlé oddělování vrstev povlaků, a také ve vznik a šíření trhlin v kolmém směru k podkladu. Na rozdíl od vícevrstevných povlaků, kde se vrstvy odlupují velice jemně bez známek plastické deformace a kolmého šíření trhlin vůči podkladu.

- 4) Zvyšují tvrdost, tepelnou stabilitu a umožňují nanášet vrstvy ve větších tloušťkách, než u monovrstev.

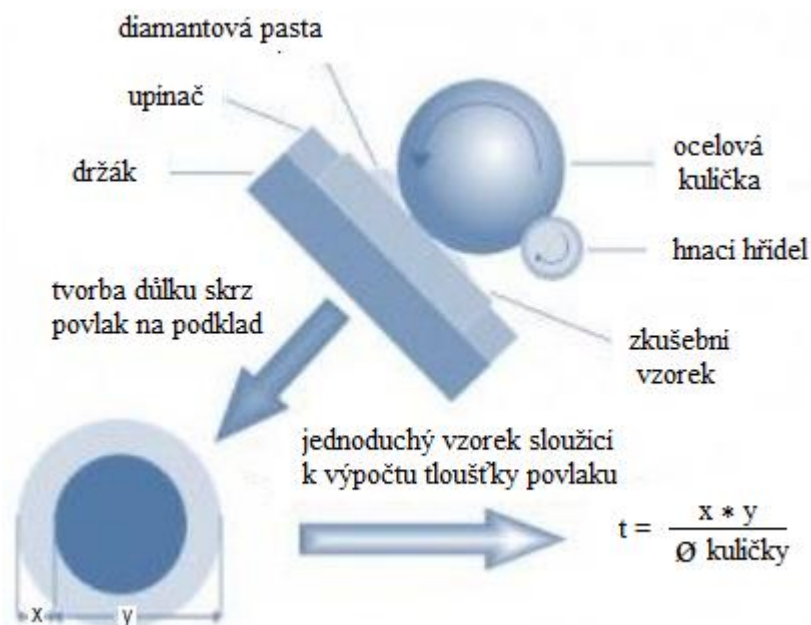
Kladení vícevrstvého povlaku probíhá vzhledem k vlastnostem jednotlivých povlaků tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu. Ty mají nižší odolnost proti opotřebení. Jako poslední jsou nanášeny vrstvy, od kterých je požadována zejména vysoká odolnost proti opotřebení a oxidaci za zvýšených teplot. Nedochozí tak k rychlému odlupování povlaku, zvyšuje se životnost a řezné vlastnosti nástroje a je umožněn vysoký úběr materiálu.³⁴

Tloušťka vrstev se dá pozorovat jak na skenovacím elektronovém mikroskopu, tak na optickém světelném mikroskopu.

3.4 Abrazce

Abrazce, nebo – li ořez, je druh opotřebení, ke kterému dochází vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i vlivem mikročástic z nástroje.³⁵

Tzv. kalotester (obr. 18) je rychlý a snadno použitelný nástroj původně vyvinut ke zjištění tloušťky povlaku. Tato zkouška lze použít také ke zjištění ořezuvzdornosti povlaků. Měřicí krok se provádí za pomoci kalené ocelové kuličky s přesně daným průměrem. Kulička se valí a tlačí do povrchu po dobu několika sekund. Tímto tlakem vznikne ve zkoumané vrstvě povrchový důlek. Pokud by se touto metodou měla změřit i tloušťka, postupovalo by se podle vzorce uvedeného na obrázku.³⁰

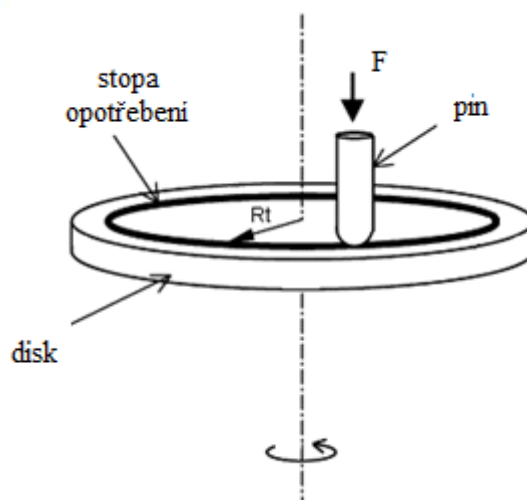


Obr. 18 Princip kalotestu.²⁹

3.5 Kluzné vlastnosti

Kluzné vlastnosti povlaku ovlivňují tepelné zatížení nástroje, jehož negativním projevem je zhoršení fyzikálních i chemických vlastností podkladu. Se snižujícím se třením povlaku toto zatížení klesá.²⁹

Ke stanovení kluzných vlastností se využívá metody pin – on – disk a ball – on – disk. Schéma metody pin – on – disk je zobrazen na obr. 19.



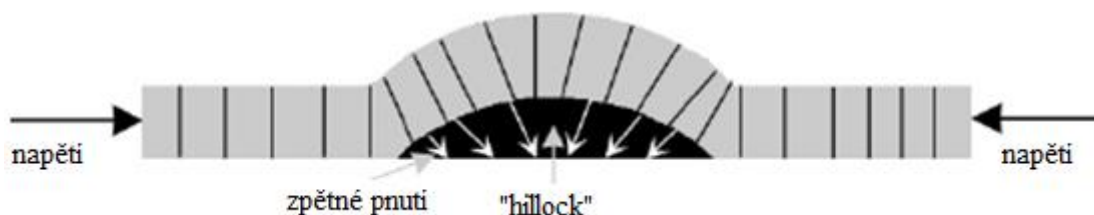
Obr. 19 Princip metody pin-on-disk.³⁶

Popis metody je následující: na zkušební vzorek je nanesen testovaný povlak. Zkušební vzorek se otáčí kolem osy, zatím co pin ve zkoumané vrstvě vytváří stopu po svém průjezdu. Z testu pin – on – disk se následně vyhodnocuje koeficient tření, otěr vrstvy, profil otěru atd. Metody slouží k získání představy o kluzných vlastnostech různých typů vrstev, nezahrnuje však vyšší zatížení ani teploty, které vznikají během rezného procesu.²⁸

Kromě zmíněné zkoušky pin – on – disk se dají kluzné vlastnosti do jisté míry posoudit i podle drsnosti jednotlivých povlaků. K jejímu zjištění se používají drsnoměry. Ty pracují tak, že po dané délce povrchu se pohybuje měřící hrot a snímá profil povrchu.³⁷ Pracovat se dá buď s dílenskými drsnoměry, které jsou přenosné, měří obvykle bez stativu a to tak, že se přiloží k měřené ploše. Nebo pomocí laboratorního drsnoměru, kterým se dá dostat i na špatně přístupné plochy. Snímací hrot u laboratorního drsnoměru má na rozdíl od dílenského menší vrcholový úhel hrotu a také menší poloměr zaoblení. Hrot je citlivější a snímá s větší přesností.³⁷

3.6 Odolnost vůči oxidaci

Oxidace vrstvy se dělí na povrchovou, objemovou a povrchově – objemovou. U povrchové oxidace může dojít k pasivaci, k tzv. tvorbě ochranné vrstvy na povrchu kovu, čímž se zabraňuje další oxidaci, tvorbě vyvýšenin, „hillocků“ na povrchu vrstvy (obr. 20) i ke zvýšení drsnosti.³⁸



Obr. 20 Schéma pravděpodobného mechanismu růstu „hillocku“.³⁸

Objemová oxidace může vést k porušení celé vrstvy a má za následek snížení tvrdosti a odolnosti vrstvy. Dále vede k fázovým změnám, růstu zrna vrstvy a k segregaci prvků a fází. Oxidické produkty (obr. 21) začnou s délkou působení tepla zvětšovat svůj objem, a tím dochází k vytlačování oxidujícího substrátu na povrch vlivem vnitřního pnutí v substrátu. Tato pnutí jsou tak vysoká, že dojde k rozšíření defektu vrstvy a k její delaminaci.³⁸



Obr. 21 Oxidická makročástice u vrstvy TiAlN deponované na substrátu K20.³⁸

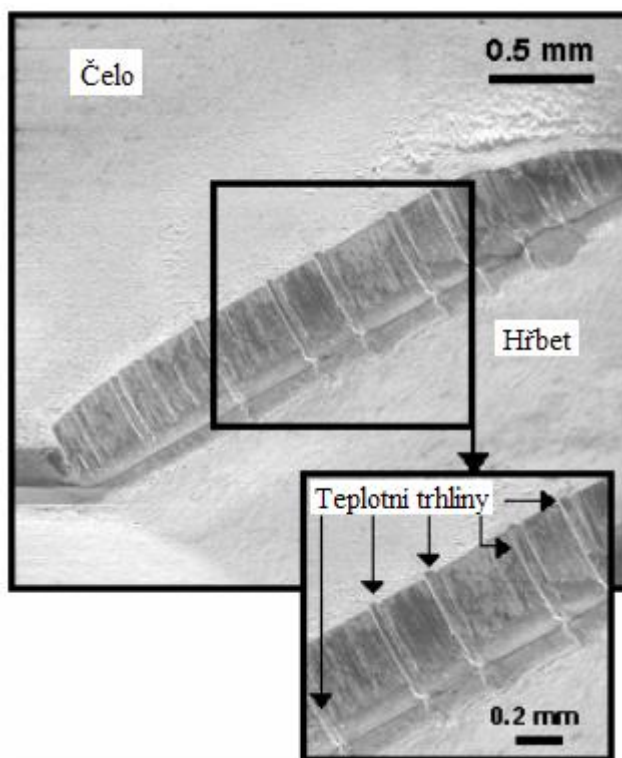
Změny povrchově – objemové se projeví tvorbou prázdných míst nebo trhlin v důsledku cyklického pnutí.³⁸

Vlastnosti každé PVD vrstvy jsou limitované jejich maximální teplotou použití, která závisí právě na odolnosti proti oxidaci. Metodou používanou ke stanovení odolnosti vůči oxidaci je tzv. gravimetrická metoda. Princip spočívá v měření změny hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě kyslíku. Podmínkou těchto zkoušek je, že zkoušená vrstva musí být nanášena celoplošně na testovaný vzorek.³⁸

Ke stanovení struktury vzorků po oxidaci bylo pro tuto práci použito rentgenové difrakce, která spočívá v průchodu monochromatického rentgenového záření látkou. Během průchodu jsou ohýbány paprsky záření. Rozložení atomů zkoumaného materiálu lze určit výpočtem z polohy a intenzity interferenčních obrazců na stínítku.³⁹

Odolnost proti teplotním trhlinám

Odolnost vůči oxidaci má přímou spojitost s odolností vzorků vůči teplotním trhlinám. Čím bude materiál náchylnější na vznik teplotních trhlin, tím bude více oxidovat a naopak. Tepelná únava ve slinutých karbidech se projevuje opakovaně při přerušovaném obrábění, jako je např. frézování a je evidována vývojem trhlin, které vedou podél hřbetu nože svisle až k ostří (obr. 22).⁴⁰



Obr. 22 Teplotní trhliny v nástroji ze slinutého karbidu.⁴⁰

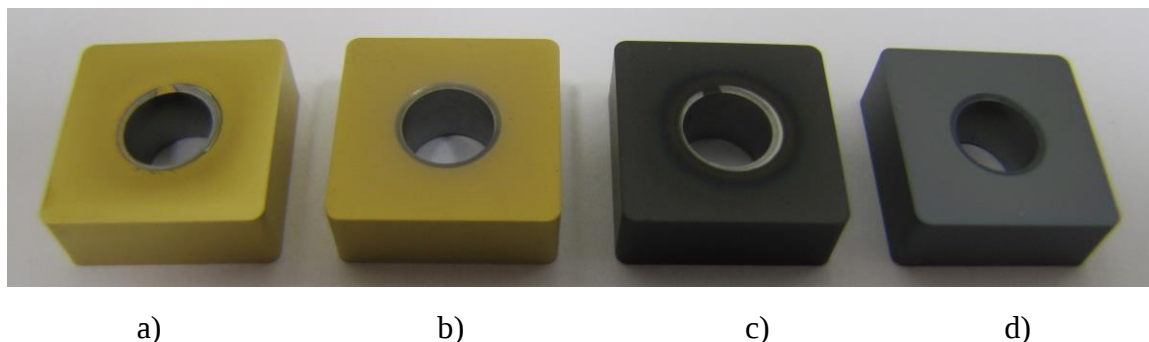
Tyto trhliny jsou způsobeny střídavým rozpínáním a stažením povrchových vrstev řezného nástroje během opakovaného zahřívání a chlazení v průběhu řezného procesu.⁴⁰

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V praktické části jsou charakterizovány vlastnosti různých PVD povlaků. K charakterizaci byly vybrány čtyři typy PVD povlaků nanesených na vzorky metodou odpařování nízkonapětovým obloukem. U jednotlivých povlaků je analyzována jejich tvrdost, adheze, tloušťka, odolnost vůči abrazi, oxidaci a tepelným trhlinám. Všechna měření jsou provedena třikrát.

Vzorková základna

Vybrané povlaky byly nanесeny na VBD, jejichž substrát je tvořen ze středo – jemnozrného karbidu wolframu s malým obsahem kubických karbidů obsahujících tantal a niob (1,5 %) a s relativně vysokým obsahem kobaltové pojící fáze (10,2 %). Pro všechny testy byly zvoleny vyměnitelné břitové destičky se specifikací SNMA 120408 (obr. 23), kromě testu na odolnost vůči oxidaci, kde byly vybrány destičky se specifikací SPKN 1203EDER.



Obr. 23 Povlakované destičky: vzorek č. 1 a), vzorek č. 2 b), vzorek č. 3 c), vzorek č. 4 d).

Povlak vzorku č. 1 je tvořen třikrát opakující se vrstvou TiN s nanovrstvou TiAlSiN. Poslední vrstva TiAlSiN je zakončena vrstvou TiN. U povlaku na vzorku č. 2 (obr. 23 b)) je jako podkladová vrstva použit TiN, na ní pak nanovrstva TiAlN a jako povrchová je nanесena vrstva TiN. Povlak na vzorku č. 3 (obr. 23 c)) má opět podkladovou vrstvu TiN, mezivrstva TiAlSiN jako nanovrstva a jako povrchová vrstva je použit kluzný povlak TiAlCO. Na obr. 23 d) je destička s podkladovou vrstvou TiN a na to je nanесený monovrstvý povlak TiAlN. Poslední vrstva je zakončena monovrstvým povlakem AlTiN.

4 TVRDOST PVD POVLAKŮ

Tvrdość byla měřena na tvrdoměru firmy Frank (obr. 24). Při zatížení 294 N bylo do zkoušeného materiálu vtlačováno diamantové těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° . Délka jednoho vtisku trvala 10 s. Snímek vtisku, získaný pomocí elektronového mikroskopu je na obr. 25.



Obr. 24 Tvrdoměr firmy Frank

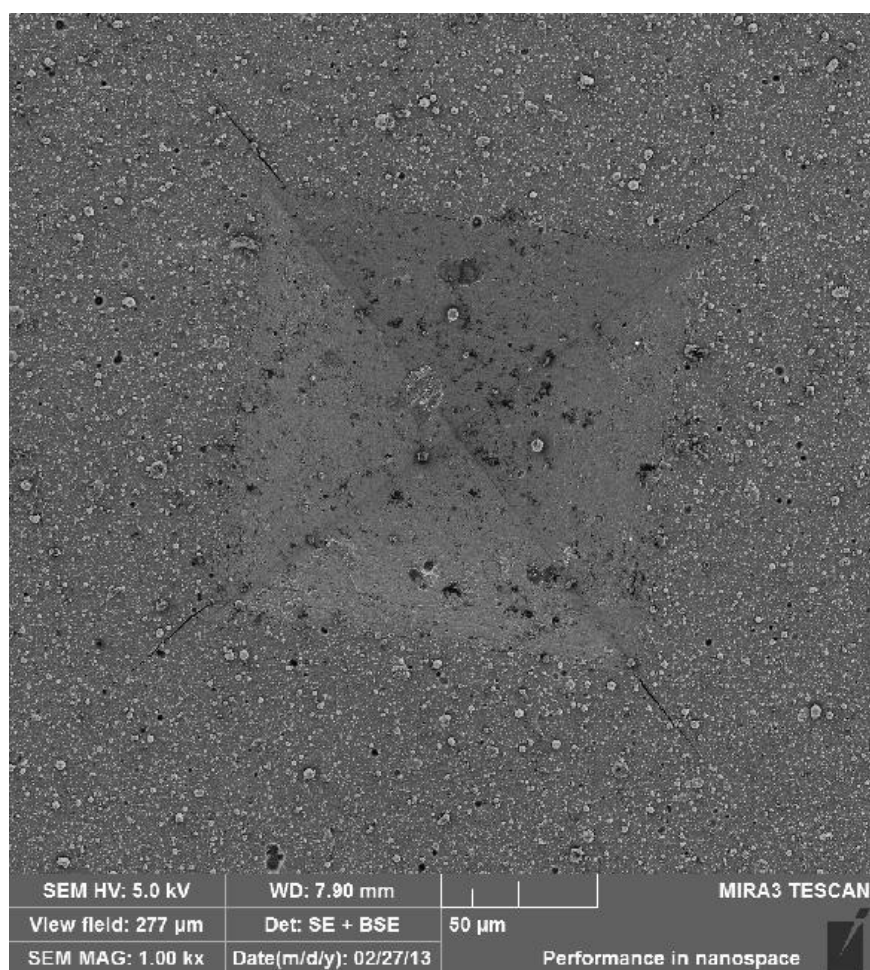
Tab. 4.1 Naměřené průměry délky úhlopříček vtisku.

Naměřené úhlopříčky	1. měření [μm]	2. měření [μm]	3. měření [μm]
Vzorek č. 1	137	138	138
Vzorek č. 2	134	132	133
Vzorek č. 3	133	136	134
Vzorek č. 4	138	139	138

Tab. 4.2 Převedení na tvrdost Vickerse.

Tvrdost HV	1. měření	2. měření	3. měření	ϕ
Vzorek č. 1	2975	2937	2928	2947
Vzorek č. 2	3096	3182	3144	3141
Vzorek č. 3	3167	3020	3106	3098
Vzorek č. 4	2920	2886	2941	2916

Při stanovení tvrdosti se vycházelo z naměřených úhlopříček zapsaných v tab. 4.1. Z těchto hodnot pak byly dopočítány tvrdosti pro každý vzorek (tab. 4.2). Mezi naměřenými hodnotami byly minimální rozdíly. To je dáno tím, že výsledná tvrdost je ovlivněna tvrdostí samotného substrátu. K těmto hodnotám se tedy nebudou vztahovat další závislosti.



Obr. 25 Snímek vtisku diamantového jehlanu.

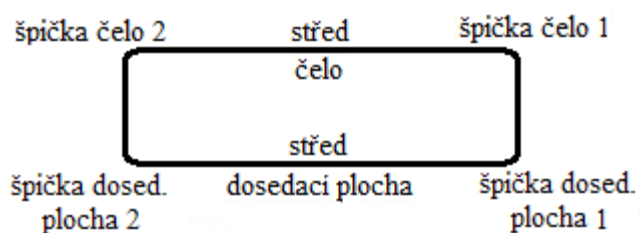
5 TLOUŠŤKA PVD POVLAKŮ

Pro měření tloušťky PVD povlaků bylo potřeba upravit povrch následovně: nejprve se vyměnitelné břitové destičky vyleštily do zrcadlového lesku na leštičce PHOENIX 4000. Následně byly vzorky broušeny na diamantovém kotouči o zrnitosti $250\text{ }\mu\text{m}$ při otáčkách 200 min^{-1} s přitlakem 7 MPa po dobu 3 min. Poté byly broušeny na litinovém kotouči s diamantovým práškem o zrnitosti $15\text{ }\mu\text{m}$ a s petrolejem při otáčkách 400 min^{-1} s přitlakem 7 MPa po dobu 10 min. Následně byly vzorky leštěny na kotouči TexMet s diamantovým práškem o zrnitosti $7\text{ }\mu\text{m}$ při otáčkách 400 min^{-1} s přitlakem 7 MPa po dobu 10 min. Nakonec se vzorky doleštily na kotouči TexMet s diamantovým práškem o zrnitosti $1\text{ }\mu\text{m}$ při otáčkách 400 min^{-1} s přitlakem 7 MPa po dobu 10 min. Při všech krocích byly vzorky čištěny kartáčem a chlazeny vodou. Po posledním kroku se očistily benzinem.

Pro stanovení tloušťky materiálu byl použit optický mikroskop Neophot 30 (obr. 26), měřeno bylo při zvětšení 1000 x. Snímky tloušťek zkoumaných vzorků jsou na obr. 28.



Obr. 26 Optický mikroskop.

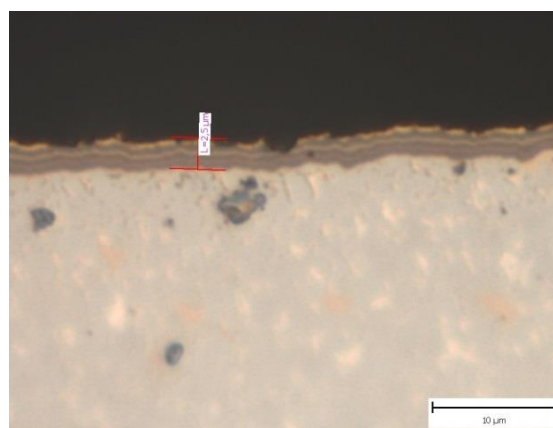
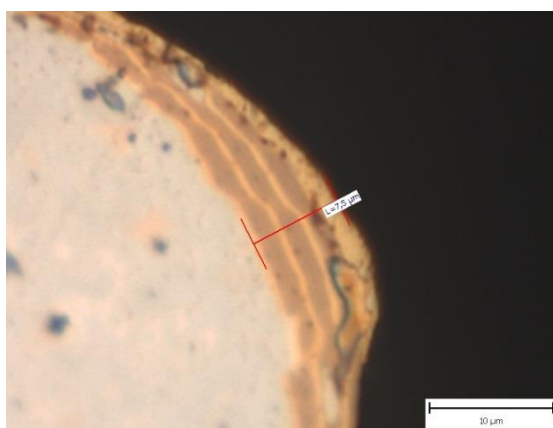


Obr. 27 Poloha míst, kde byla na VBD měřena tloušťka.

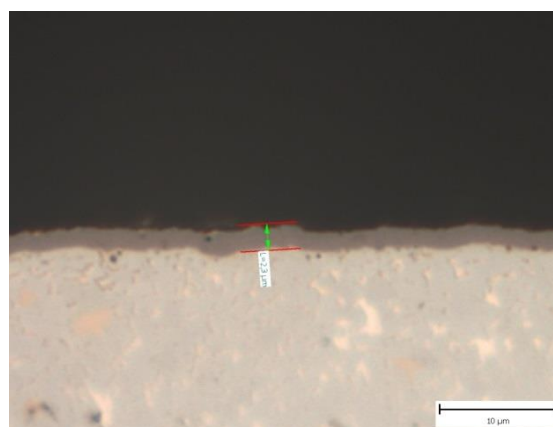
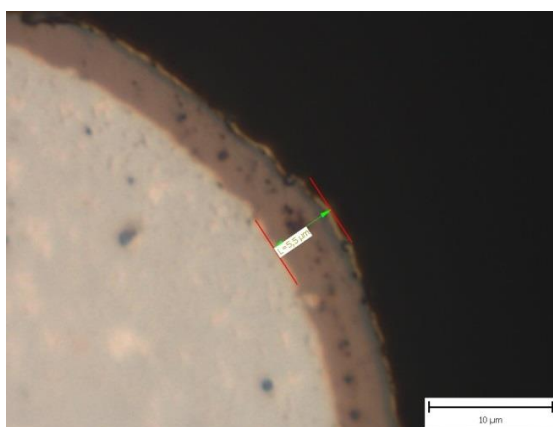
Tab. 5.1 Naměřené hodnoty tloušťky.

Vzorek	špička čelo 1 [μm]	střed čelo [μm]	špička čelo 2 [μm]	špička dosed. plocha 1 [μm]	střed dosed. plocha [μm]	špička dosed. plocha 2 [μm]
č. 1	7,5	2,5	6,5	7,1	2,7	7,1
č. 2	5,5	2,2	5,5	5,1	2,1	4,4
č. 3	3,3	1,4	3,2	2,8	1,4	2,4
č. 4	5,3	2,1	5,4	5,4	2,2	5,3

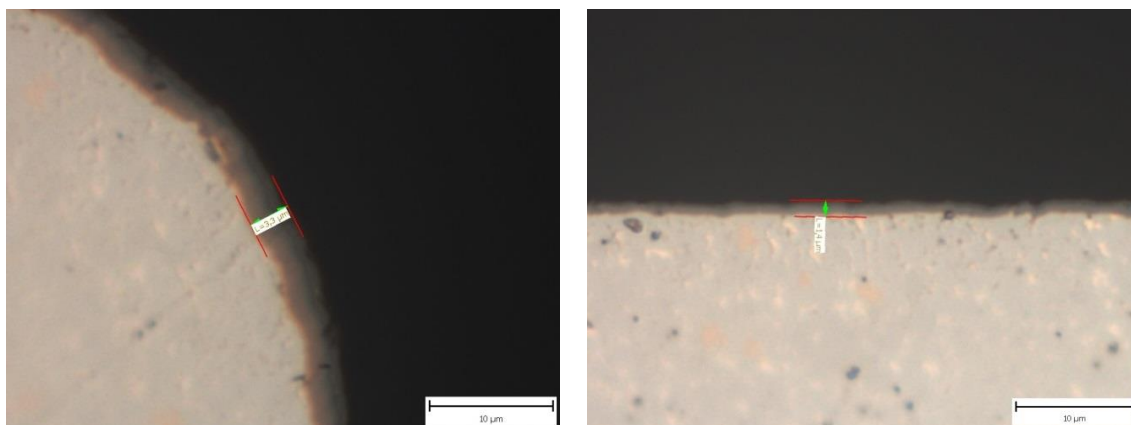
Tloušťka byla měřena na různých místech destičky (obr. 27) a je patrné, že naměřené hodnoty se liší (tab. 5.1). Na špičce destiček je větší tloušťka než ve středové části. To může být způsobeno mimo jiné např. horním stíněním v povlakovací komoře. Tzv. „anténový efekt“ lze vhodnou modifikací stínícího zařízení redukovat.



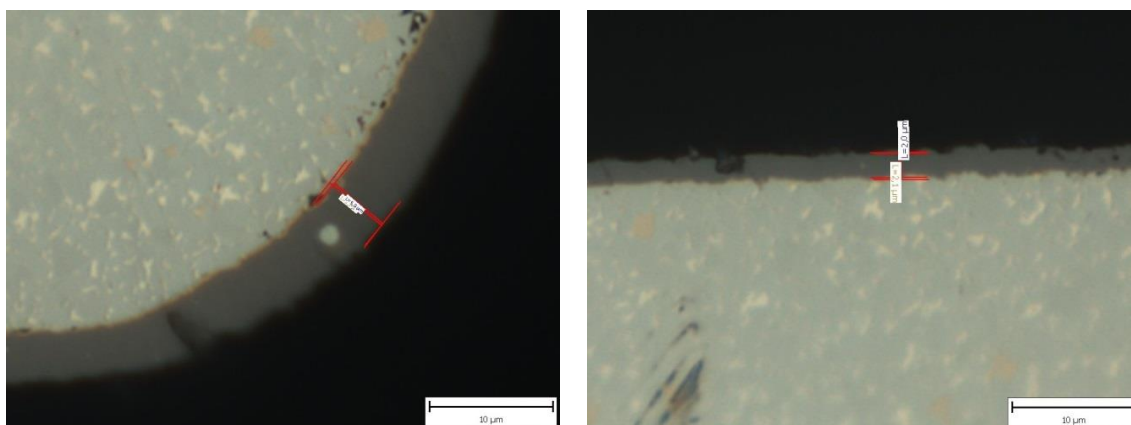
a)



b)



c)



d)

Obr. 28 U vzorku č. 1, 2 a 3 a), b), c) jsou tloušťky měřené na místech střed čelo a špička čelo, u vzorku č. 4 d) pak na špička dosed. plocha a na střed dosedací plocha.

6 KLUZNÉ VLASTNOSTI PVD POVLAKŮ

Kluzné vlastnosti jsou spolu s adhezí nejdůležitějšími vlastnostmi povlaku. Správně by se měly přímo měřit pomocí zkoušky pin – on – disk nebo ball – on – disk. Nicméně, z důvodu absence měřícího zařízení nebyla tato zkouška dostupná. Míra tření se však dá posoudit i podle hodnot R_a a R_z samotných povlaků. Čím menší budou tyto hodnoty, tím menší bude koeficient tření mezi obráběným materiálem a povlakem.



Obr. 29 Drsnoměr HOMMEL – ETAMIC firmy CS s.r.o.

Tab. 6.1 Naměřené hodnoty R_a a R_z povlakovaných destiček.

vzorek	směr		1. měření [μm]	2. měření [μm]	3. měření [μm]	ϕ [μm]	SD [μm]
č. 1	ve směru rýh	R_a	0,266	0,299	0,275	0,280	0,017
		R_z	2,414	2,840	3,856	3,037	0,741
	napříč rýhám	R_a	0,374	0,360	0,351	0,362	0,012
		R_z	3,046	2,889	2,828	2,921	0,112
č. 2	ve směru rýh	R_a	0,264	0,220	0,233	0,239	0,023
		R_z	2,103	1,781	3,572	2,485	0,955
	napříč rýhám	R_a	0,409	0,305	0,282	0,332	0,068
		R_z	3,108	2,622	2,571	2,767	0,296
č. 3	ve směru rýh	R_a	0,265	0,190	0,287	0,247	0,051
		R_z	2,374	1,293	3,434	2,367	1,071
	napříč rýhám	R_a	0,575	0,364	0,331	0,348	0,132
		R_z	8,600	2,920	2,528	2,724	0,277
č. 4	ve směru rýh	R_a	0,180	0,210	0,220	0,203	0,021
		R_z	1,600	1,810	2,200	1,870	0,304
	napříč rýhám	R_a	0,250	0,220	0,240	0,237	0,015
		R_z	2,560	2,240	2,490	2,430	0,168

Seřazení hodnot Ra a Rz jednotlivých povlaků, zleva s nejmenší hodnotou Ra a Rz, je uvedeno v tab. 6.2. Povlak na vzorku č. 4 je pravděpodobně povlak s nejnižším koeficientem tření, u povlaku č. 3 a č. 2 jsou mezi hodnotami pouze minimální rozdíly.

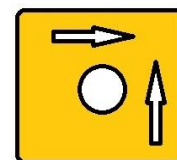
Tab. 6.2 Seřazení hodnota Ra a Rz jednotlivých povlaků.

ve směru rýh	Ra	4	2	3	1
	Rz	4	3	2	1
napříč rýhám	Ra	4	2	3	1
	Rz	4	3	2	1

Tab. 6.3 Hodnoty Ra a Rz pro nepovlakovanou destičku.

Nepovlakovaná destička		1. měření [μm]	2. měření [μm]	3. měření [μm]	φ [μm]
ve směru rýh	Ra	0,185	0,173	0,160	0,173
	Rz	1,201	1,081	1,104	1,129
napříč rýhám	Ra	0,231	0,232	0,229	0,231
	Rz	1,728	1,756	1,695	1,726

Pomocí drsnoměru HOMMEL – ETAMIC firmy CS s.r.o. (obr. 29) byla měřena průměrná aritmetická úchylka profilu Ra a největší výška profilu Rz. Hodnoty byly snímány na délce 4,8 mm a to ve dvou směrech – ve směru rýh po broušení a kolmo na tyto rýhy. Povlaky byly naneseny na destičky, které prošly před nanesením stejnou úpravou.



Z průměrných hodnot (tab. 6.1) lze vysledovat určitou závislost Ra a Rz na typu povlaku, ale směrodatné odchylky jsou příliš vysoké. Na naměřené hodnoty Ra a Rz má pravděpodobně větší vliv příprava povrchu vzorku před nanesením povlaku, v tomto případě stopa po broušení. Z toho důvodu nebyl měřený profil přenášen do počítače k vyhodnocení. Stopa po broušení bude tedy zřejmě vyšší než jakákoli nehomogenita způsobená daným povlakem. Je – li drsnost měřena pomocí tohoto zařízení, drsnoměru HOMMEL – ETAMIC, na vzorcích vyleštěných, drsnost je zřejmě tak malá, že ji změřit nelze.

Hodnoty Ra a Rz pro nepovlakovanou destičku jsou uvedeny v tab. 6.3 a slouží k posouzení, jak moc jednotlivé povlaky po nanesení ovlivní hodnoty Ra a Rz.

7 ADHEZE PVD POVLAKŮ

Scratch test byl proveden na scratch testeru firmy MEZ Náchod (obr. 30) při zátěžné síle 10 – 80 N. Získané vrypy (obr. 31) byly po částech nafocené na skenovacím elektronovém mikroskopu MIRA3 LMH firmy Tescan. Tyto snímky (obr. 32 a), b), c) a d)) pak byly složeny do jednoho snímku pomocí programu GIMP Portable.



Obr. 30 Scratch tester firmy MEZ Náchod.

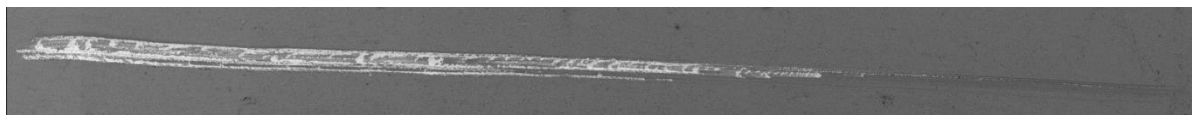


Obr. 31 Ukázka destičky po scratch testu, v horní části je patrný vryp.

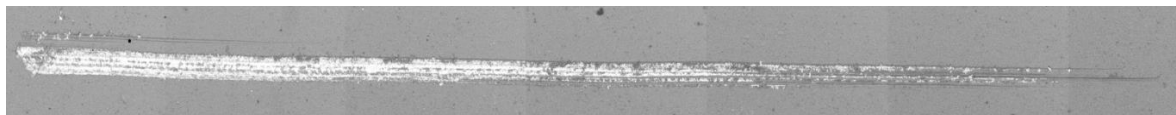
Vzorek č. 1 a č. 3 vykazují velmi dobrou přilnavost. Jednou z příčin je kladení nanovrstev na sebe. U povlaku č. 1 působí také titan pozitivně na míru adheze a je obsažen zhruba 60 – ti %. Vyrovnává tak negativní vlastnosti Al nebo Al – Si, které mají na adhezi spíše negativní vliv. Tyto teoretické předpoklady vychází z článku Structures and Properties of (TiAlSi)N Films.⁴¹

U vzorku č. 3 by mělo použití kluzných vrstev všeobecně snižovat přilnavost povlaku. Nicméně v porovnání se vzorkem č. 2, který má jako povrchovou vrstvu TiN zvyšující adhezi, vykazuje i tak lepší přilnavost.

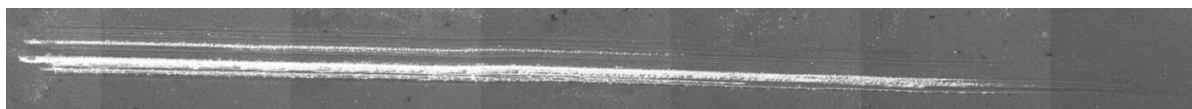
Vzorek č. 4 se začíná odlupovat ve větší míře jako první. Lze ho tedy v porovnání s ostatními povlaky charakterizovat jako povlak s nejhorší přilnavostí. Je patrné, že s rostoucí silou zatěžování dochází k čím dál většímu odlupování vrstev na krajích stopy. Vzhledem ke složení povlaku a jeho kladu – TiN + monovrstevný povlak TiAlN + monovrstevný povlak AlTiN se dá usoudit, že tato kombinace vykazuje špatnou vzájemnou přilnavost díky monovrstvám. Monovrstvy, jejichž struktura je složená z kuželovitých zrn, se vlivem zatížení plasticky deformují a to následně vyústí v oddělování vrstev povlaku.



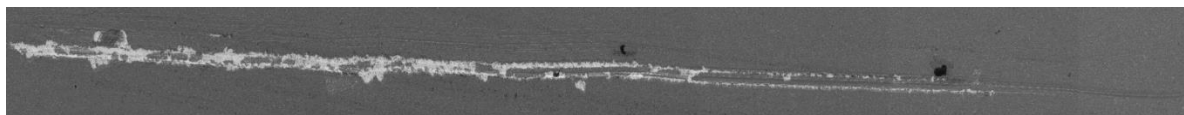
a) Stopa po scratch testu na vzorku č. 1.



b) Stopa po scratch testu na vzorku č. 2.



c) Stopa po scratch testu na vzorku č. 3.



d) Stopa po scratch testu na vzorku č. 4.

Obr. 32 Stopy po scratch testu na obrázcích a), b), c) a d).

8 ABRAZE PVD POVLAKŮ

Odolnost vzorků vůči abrazi byla charakterizována pomocí kalotestu. Kalotest byl proveden na kalotesteru firmy Platit CT50 (obr. 33). Vzorky byly otírány kuličkou o průměru 17,45 mm rychlostí 800 min^{-1} a to po dobu 30s, 60s a 90s. Po každých 30s byla na kuličku nanесena kapka vody. Průměr kulového vrchlíku probroušeného do vzorků byl měřen na optickém mikroskopu Neophot 30, měřeno bylo při zvětšení 64 x, snímky byly nafoceny pomocí programu QuickPhoto.

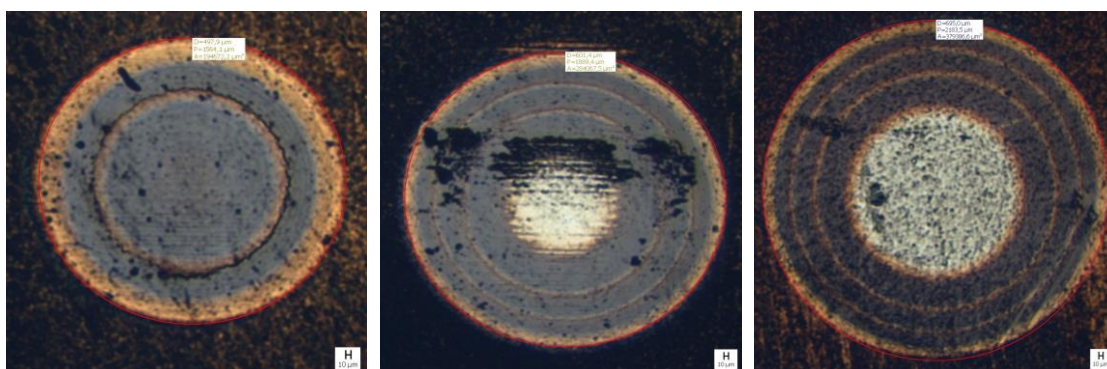


Obr. 33 Kalotestr firmy Platit CT50

Tab. 8.1 Naměřené hodnoty průměrů kulového vrchlíku, získaných pomocí kalotestu.

Vzorek	čas [s]	ϕ [μm]
č. 1	30	498
	60	601
	90	695
Vzorek	čas [s]	ϕ [μm]
č. 2	30	420
	60	522
	90	572

Vzorek	čas [s]	ϕ [μm]
č. 3	30	478
	60	538
	90	555
Vzorek	čas [s]	ϕ [μm]
č. 4	30	352
	60	451
	90	470

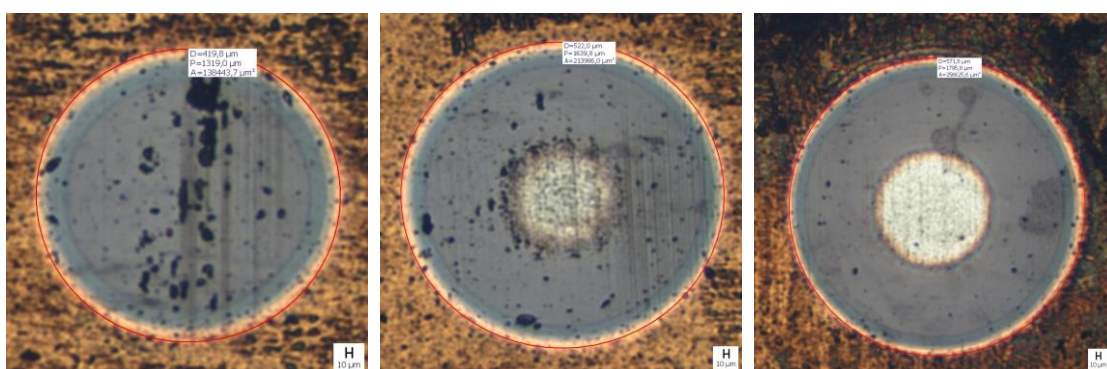


a)

b)

c)

Obr. 34 Vzorek č. 1 po 30s a), po 60s b) a po 90s c).

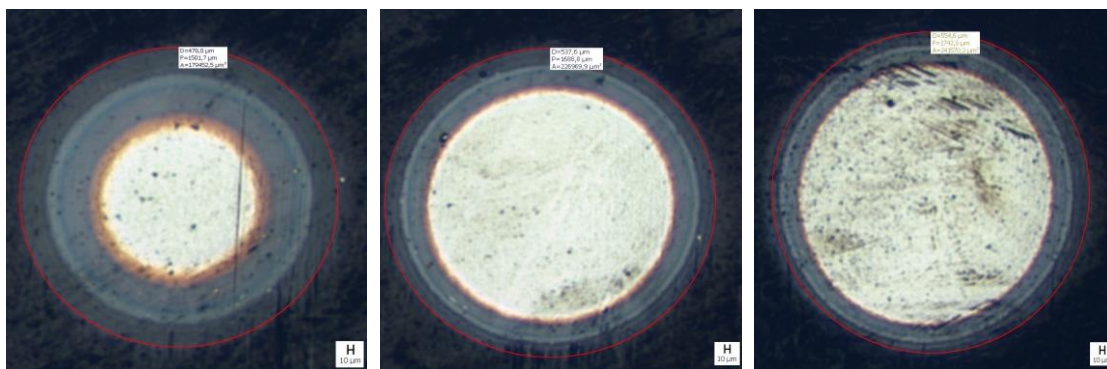


a)

b)

c)

Obr. 35 Vzorek č. 2 po 30s a), po 60s b) a po 90s c).

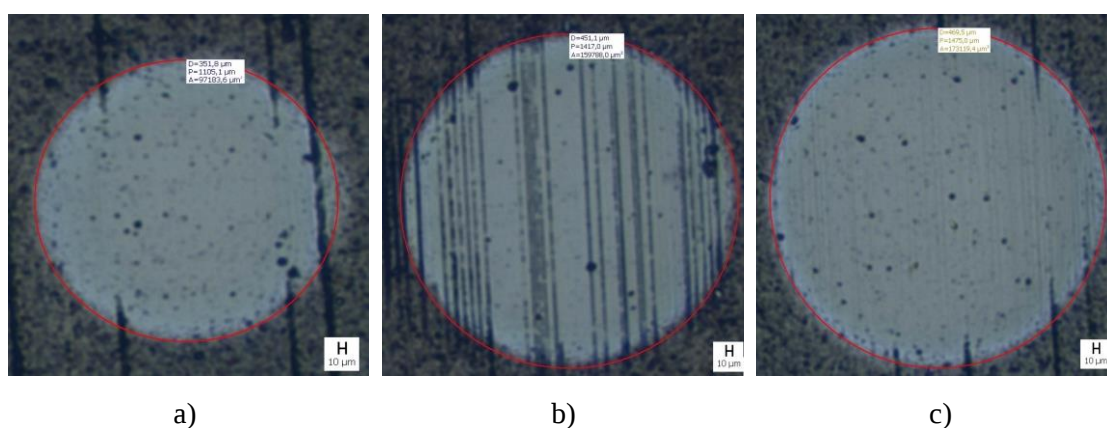


a)

b)

c)

Obr. 36 Vzorek č. 3 po 30s a), po 60s b) a po 90s c).

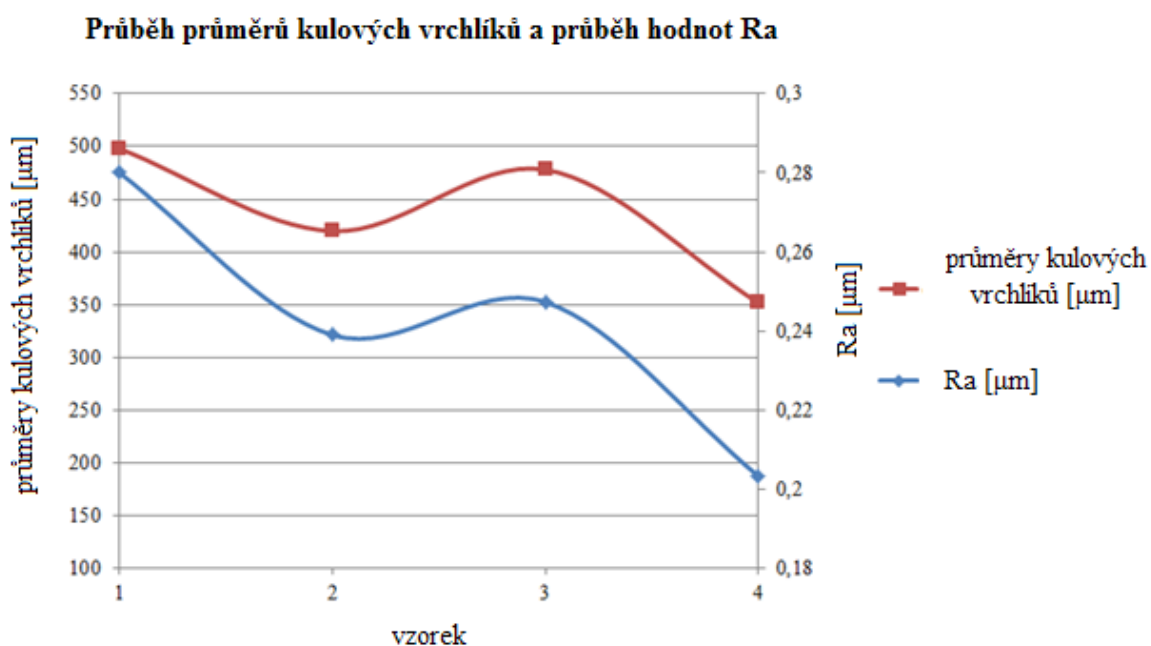


Obr. 37 Vzorek č. 4 po 30s. a), po 60s. b) a po 90s. c).

Na uvedených snímcích (obr. 34, 35, 36 a 37) je patrné postupné odkrývání jednotlivých vrstev povlaku, v závislosti na čase otírání kuličky. Bílý kruh uprostřed pak znázorňuje samotný podkladový materiál. Otěruvzdornost je spojena s úbytkem materiálu. Čím bude tento úbytek nižší, tím je povlak kvalitnější, bude mít nižší koeficient tření a naopak. Podle naměřených průměrů lze pak porovnat otěruvzdornost jednotlivých povlaků. Měřítka použité na snímcích je 10 µm.

Povlak na vzorku č. 4 v porovnání s ostatními má nejlepší otěruvzdornost. Z předchozí kapitoly Kluzné vlastnosti je také známo, že po jeho nanesení na VBD nejméně ovlivňuje hodnoty Ra a Rz. Obě dvě informace tedy korespondují se zmínkou v literatuře.⁴²

Porovnáním hodnot u zbývajících povlaků se tato teorie jen potvrdila. Pro přehlednost jsou hodnoty Ra a hodnoty průměrů kulových vrchlíků po 30s zaneseny do grafu.

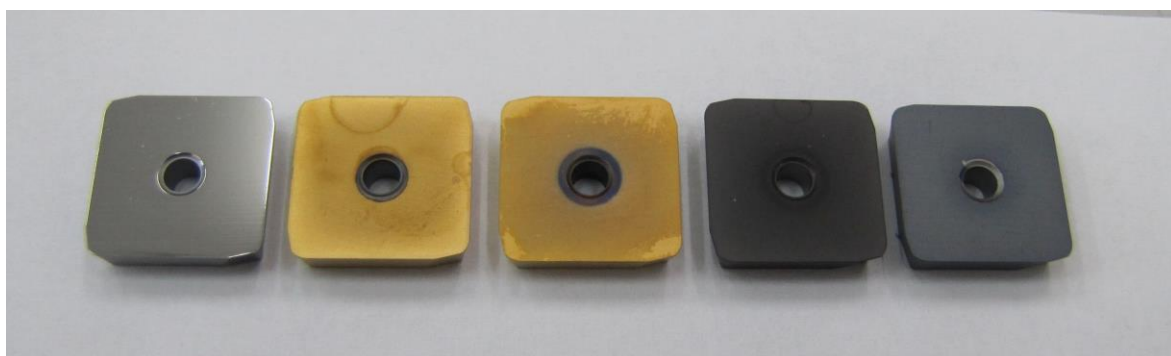


Obr. 38 Průběh průměrů kulových vrchlíků a průběh hodnot Ra.

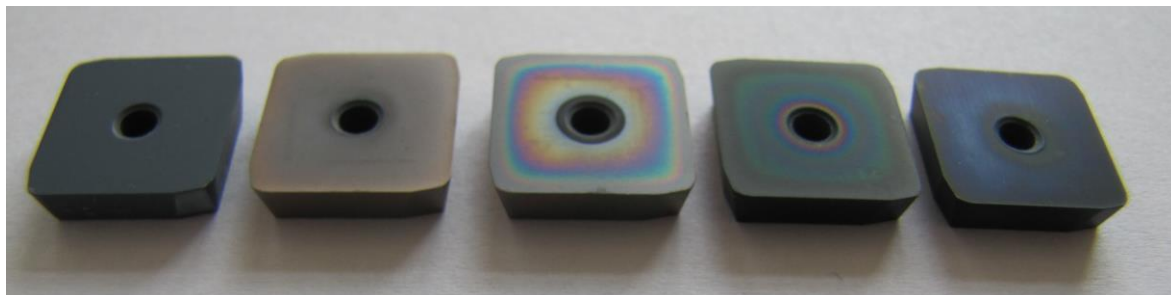
9 ODOLNOST VŮČI OXIDACI U PVD POVLAKŮ

Vzorky byly zahřívány v pícce firmy Clasic s regulátorem CLARE 4.0 a byly zahřívány na zvolenou maximální teplotu 700 °C s přírůstkem 40 °C/min. a s výdrží na maximální teplotě po dobu 30 minut. Vzorky byly před procesem zahřívání, stejně tak i po něm, zváženy na analytických vahách. Vzorky referenční i vzorky podrobené zahřívání byly analyzovány na RTG difraktometru D4 Endeavor firmy Bruker. Spektra byla vyhodnocena pomocí programu Eva, jednotlivá difrakční maxima byla analyzována pomocí programu ICDD View 2010.

Vlevo na obrázcích jsou vzorky referenční, nepovlakované. Ostatní vzorky na obou snímcích jsou povlakované před zahřátím (obr. 39) a povlakované po zahřátí (obr. 40).



Obr. 39 Úplně vlevo vzorek nepovlakovaný, ostatní vzorky povlakované, nepodrobené zahřívání.

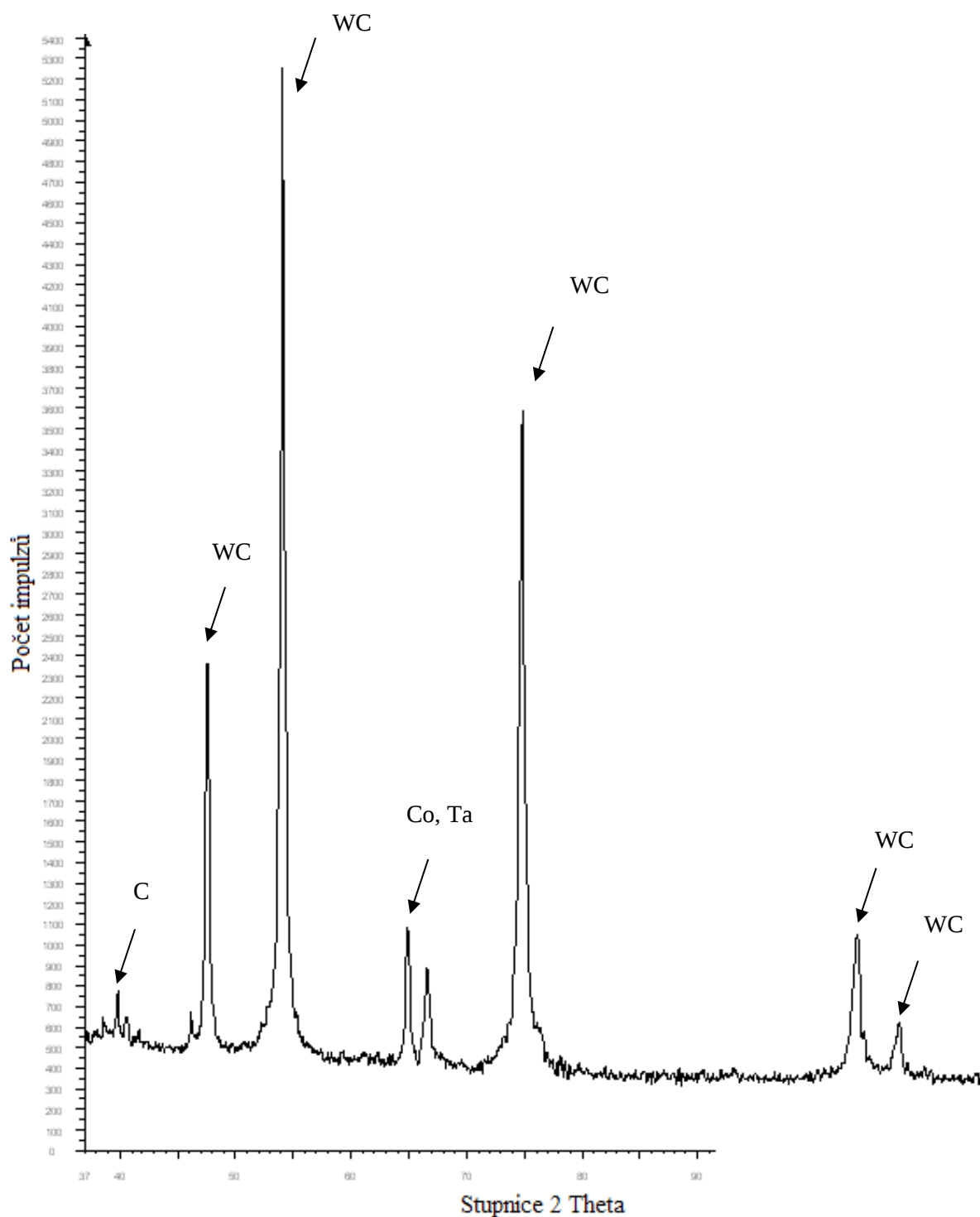


Obr. 40 Úplně vlevo vzorek nepovlakovaný, ostatní vzorky povlakované. Všechny vzorky podrobené zahřívání.

Tab. 9.1 Změna hmotnosti po zahřátí vzorků.

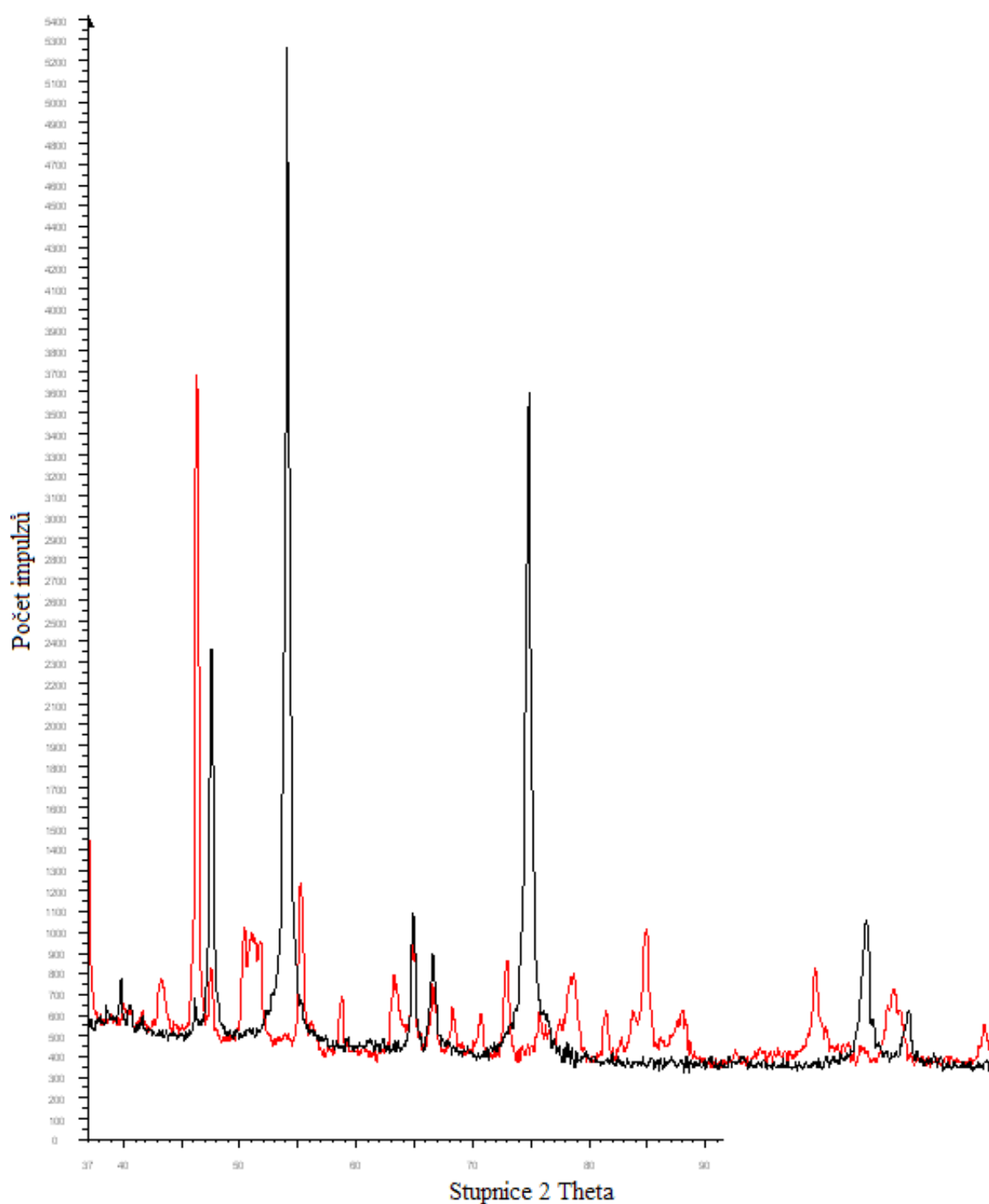
Vzorek	před [g]	po [g]	rozdíl [g]
č. 1	6,3270	6,3285	0,0015
č. 2	6,3202	6,3216	0,0014
č. 3	6,3211	6,3222	0,0011
č. 4	6,3237	6,3251	0,0014
nepovlakovaná destička	6,3019	6,31113	0,0092

Výchozí difraktogram pro nepovlakovaný vzorek.



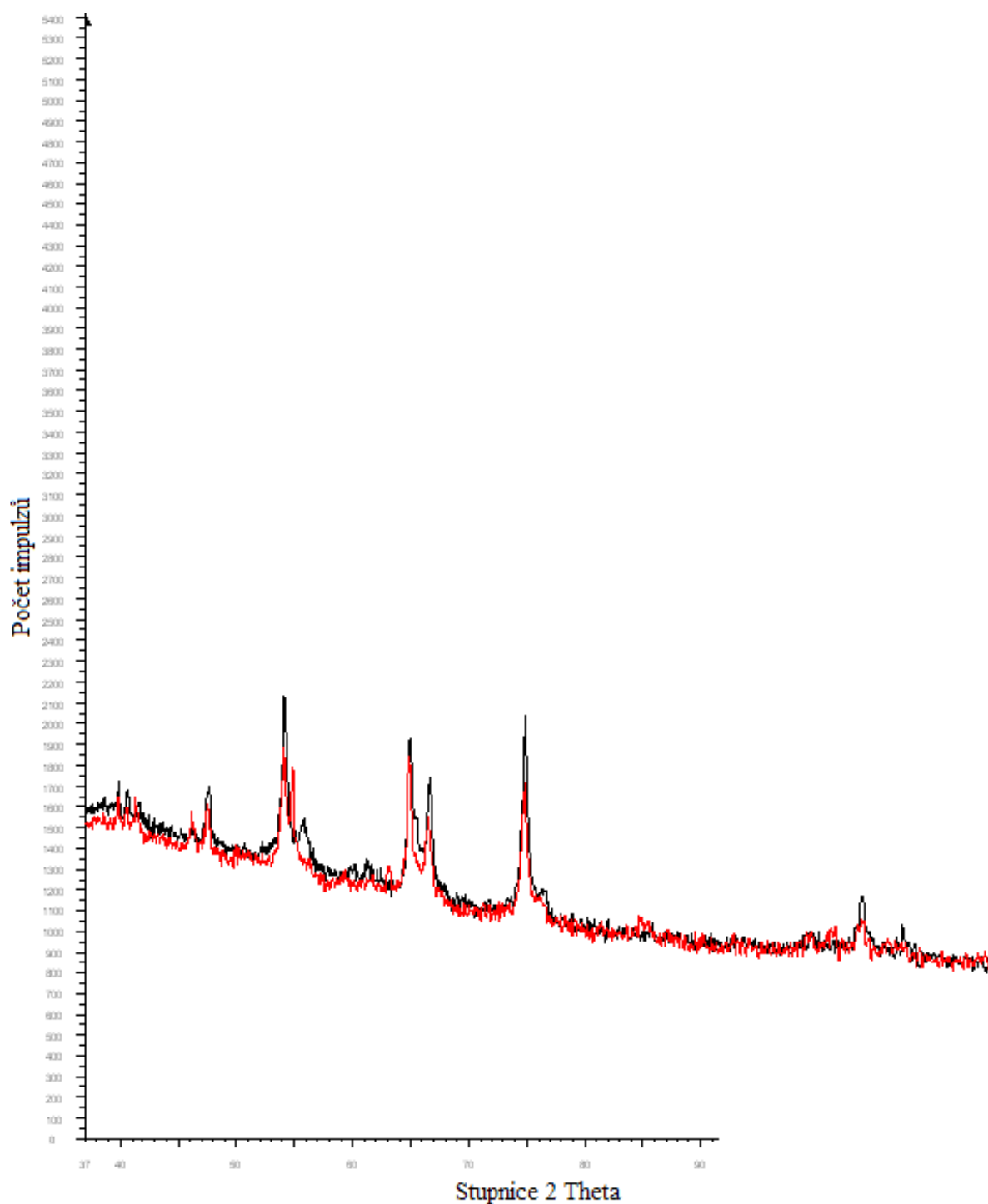
Obr. 41 Vzorek nepovlakovaný referenční.

Na obr. 41 je uveden difraktogram pro vzorek nepovlakovaný. Jsou na něm patrná difrakční maxima příslušející zrnům karbidu wolframu, stejně jako příslušející kubickým karbidům a kobaltové pojící fázi.



Obr. 42 Vzorek nepovlakovaný podrobený zahřívání.

Na obr. 42 jsou dva průběhy difraktogramů. Pro vzorek nepovlakovaný podrobený zahřívání (červená křivka) a pro vzorek nepovlakovaný referenční, nepodrobený zahřívání (černá křivka). Je patrné, že u nepovlakované destičky dochází k její oxidaci, kdy vzniká CoWO_4 .

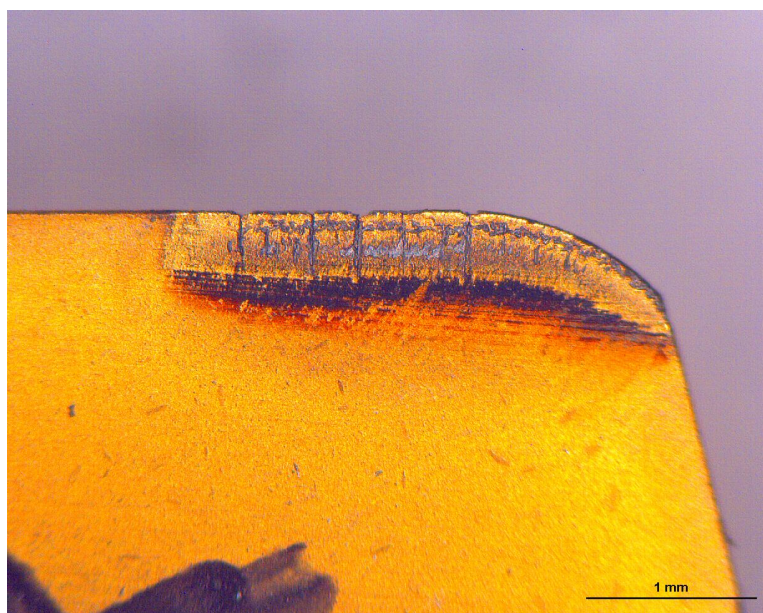


Obr. 43 Difraktogram pro vzorek č. 1, černá křivka – povlakovaný, nezahříváný vzorek, červená křivka – povlakovaný, zahříváný vzorek.

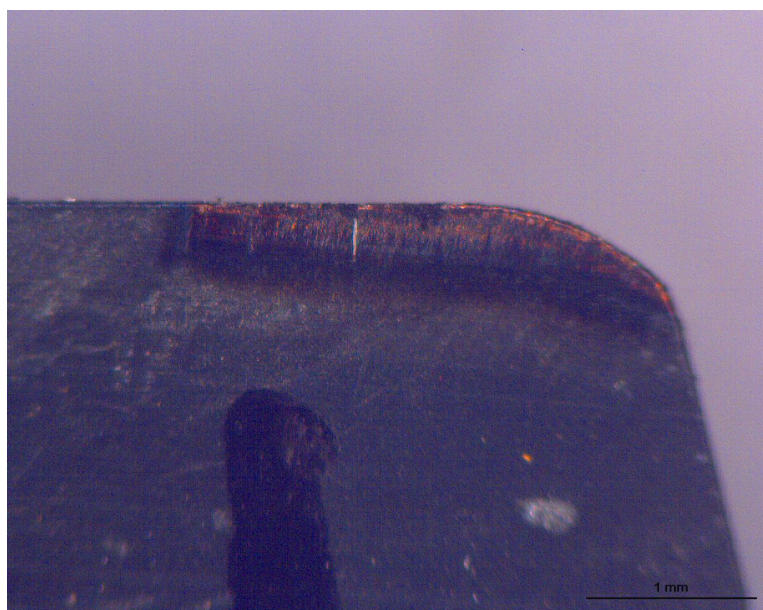
Difraktogram vzorku povlakovaného, podrobeného zahřívání, má téměř stejný průběh, jako difraktogram vzorku zahřívání nepodrobeného. Povlakovaný vzorek tedy podléhá oxidaci pouze minimálně, čemuž odpovídá také prakticky totožná hmotnost vzorku před a po zahřívání. Tak je tomu u všech čtyř povlaků. Na obr. 43 je ukázka difraktogramu pro vzorek č. 1. Difraktogramy pro ostatní vzorky jsou v příloze 2. Při srovnání vzorků

povlakovaných a nepovlakovaných je očividný velký význam povlaku v ochraně vzorků před oxidací. Nárůst hmotnosti je uveden v tab. 9.1.

S oxidací má souvislost jednak snížení tvrdosti povlaku a také tvorba teplotních trhlin. Snížená odolnost vůči teplotním trhlinám bude znamenat vyšší nárůst karbidů během oxidace. Hustota teplotních trhlin u každého vzorku je zachycena na snímcích v příloze 3. Při srovnání tabulky s nárůstem hmotností vzorků po oxidaci a snímky v příloze, je ze všech čtyř vzorků jako nejméně odolný vzorek č. 1 (obr. 43), čemuž odpovídá i největší výskyt teplotních trhlin na VBD. Nejlépe pak před oxidací chrání vzorek č. 3 (obr. 44).



Obr. 43 Hustota teplotních trhlin na vzorku č. 1 po druhém průjezdu.



Obr. 44 Hustota teplotních trhlin na vzorku č. 3 po druhém průjezdu.

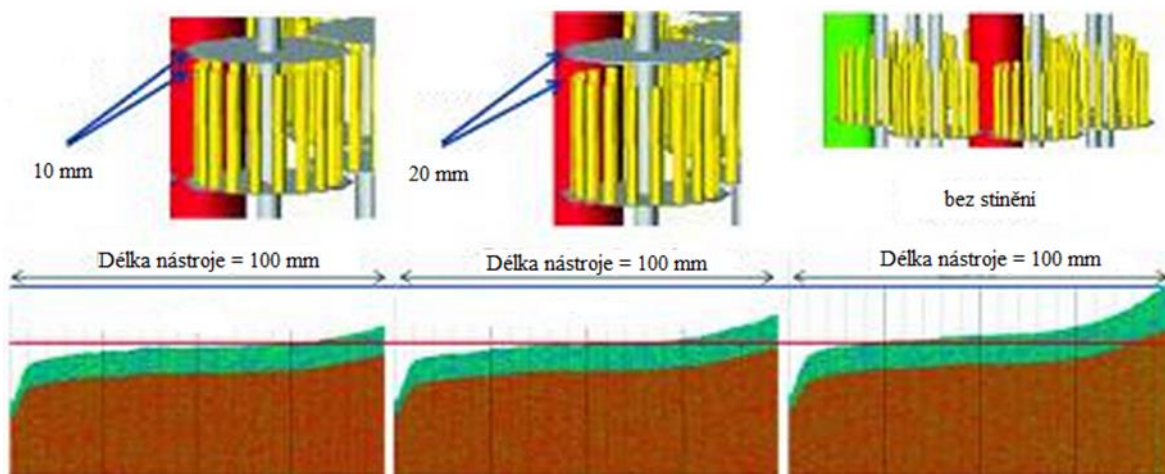
10 DISKUZE

Tvrдост

Obsahem této diplomové práce bylo měření tvrdosti povlaků používaných na vyměnitelných břitových destičkách. Z vyhodnocení naměřených hodnot tvrdostí vyplývá vliv tvrdosti samotného substrátu na výslednou hodnotu tvrdosti povlaku. Pro další výzkum se doporučuje měřit i mikrotvrđost na dokonale připravených vzorcích. Měření mikrotvrđosti už nezahrnuje tvrdost substrátu, ale pouze tvrdost samotného povlaku.

Tloušťka

Jak již bylo řečeno v kapitole Tloušťka, rozdílné tloušťky na špičce a ve středové části destičky jsou zapříčiněny horním stíněním v povlakovací komoře, tzv. „anténovým efektem“. Nanese ní různých tloušťek povlaku na destičku způsobuje odlišné vlastnosti povlaku. K zamezení tohoto negativního jevu se mění poloha stínícího zařízení tak, aby během nanášení došlo k co nejmenšímu rozdílu tloušťek. Příklad možné úpravy stínícího zařízení a redukce anténového efektu je na obr. 45.



Obr. 45 Počítačová simulace růstu tloušťky povlaku s různým nastavením horního stínění krytu.¹⁹

Kluzné vlastnosti

K ověření kluzných vlastností se v praxi doporučuje použít zkoušek pin – on – disk nebo ball – on – disk, které bohužel pro tuto práci nebyly dostupné. Z dostupných zkoušek můžeme za určitých podmínek použít klasické měření drsnosti. Z naměřených hodnot R_a a R_z se dají do určité míry kluzné vlastnosti předpovídat. Jak vyplývá z měření, hodnoty R_a a R_z budou záviset jednak na typu povlaku, ale především na opracování nástroje před nanášením povlaku. V tomto případě je určující stopa po broušení vyměnitelných břitových destiček. Proto se jako další krok výzkumu doporučuje měřit drsnost na vzorcích speciálně leštěných, kde se hodnota R_a pohybuje v rozmezí mezi $0,01\text{ }\mu\text{m}$ a $0,02\text{ }\mu\text{m}$. Výsledné hodnoty R_a a R_z pak nejsou ovlivněny stopou po opracování nástrojem, ale jen nanášenou vrstvou. Doporučuje se také použít měřícího nástroje s větším rozlišením měření, tak aby byl schopen zaznamenat hodnoty i na vyleštěných vzorcích.

Dalším zjištěným faktem je, že přestože se povlak TiN používá jako povrchová vrstva ke zlepšení nejen kluzných vlastností, povlak č. 1 má že všech čtyř zkoušených povlaků nejhorší naměřené hodnoty Ra. Z toho vyplývá, že kvalita výsledného povrchu je komplexní záležitostí a vyžaduje další upřesňující měření.

Abraze

Větší probroušený průměr u povlaku č. 3 během prvních 30 sek. je dán použitím povrchové kluzné vrstvy, která je měkká, tudíž se rychleji probrousí. Během další 60 sek. se však kulička dostává až na tvrdou vrstvu a otěr povlaku se snižuje.

Adheze

Je všeobecné platné, že vrstvy s menší tloušťkou jsou rychleji stržené, přesto povlak č. 3, u kterého byla naměřena nejmenší tloušťka, se vyznačuje poměrně dobrou adhezí. A to i přes fakt, že byla použita povrchová kluzná vrstva, která dle článku Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně – kohezivního a tribologického chování, výrazně snižuje adhezi povlaku.⁴³

Dobrá adheze povlaku je pravděpodobně způsobena nanášením nanovrstev a složením povlaku.

Odolnost vůči oxidaci

I přes to, že povlak na vzorku č. 3 má nanесenu povrchovou kluznou vrstvu, která dle článku Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně – kohezivního a tribologického chování snižuje teplotní odolnost, má v porovnání s ostatními povlaky nejlepší odolnost vůči oxidaci. Ta tedy bude pravděpodobně záviset na struktuře a složení povlaku.

Vzniku a vývoji tepelných trhlin se dá předejít použitím houževnatějšího slinutého karbidu, správnou volbou řezných parametrů a odstraněním chlazení pomocí řezné kapaliny, kdy je zjištěno, že použití řezné kapaliny na vodní bázi se zvyšuje opotřebení nástroje a prudce snižuje jeho životnost.

Statistika

Pro účel této diplomové práce, posouzení vlastností zkoumaných povlaků, budou naměřená data dostačující, pokud by však vznikla potřeba je statisticky zpracovávat, doporučuje se naměřit větší soubor dat pro přesnější závěry.

ZÁVĚR

Dřívější požadavky na PVD povlaky se ubíraly spíše ke zvýšení otěruvzdornosti. Nároky na ně však stále rostly a později tak tyto požadavky byly rozšířeny o tepelnou stabilitu, nízký koeficient tření, lepší houževnatost, vyšší tvrdosti atd. PVD povlaky jsou již delší dobu součástí praxe a tato diplomová práce si proto dala za cíl porovnat jednotlivé povlaky na čtyřech různých vzorcích. Jejím výstupem tedy je, že:

- Povlak na vzorku č. 1 má díky vhodné skladbě nanovrstev velmi dobrou adhezi. Nicméně ze všech čtyř porovnávaných povlaků má nejhorší otěruvzdornost a nejvyšší naměřené hodnoty Ra a to i přesto, že jako povrchový povlak byl použit TiN, který by měl vlastnosti povlaku zlepšovat. Na tomto povlaku se tedy potvrzuje, že pokud je povlak s horší otěruvzdorností, bude mít i vyšší naměřené hodnoty Ra. Tento povlak je pravděpodobně měkčí než ostatní a bude i hůř chránit před oxidací.
- Povlak na vzorku č. 2 se začíná bodově odlupovat jako první. S rostoucí silou zatěžování se ale odlupování nijak výrazně nehorší oproti vzorku č. 4. Povlak má nízké hodnoty Ra a velmi dobrou otěruvzdornost.
- U povlaku na vzorku č. 3 se nijak neprojeví nevýhody použití kluzné vrstvy, jako je snížená přilnavost nebo snížená teplotní odolnost. Právě naopak, použití kluzné vrstvy v kombinaci s tvrdými vrstvami a kladení nanovrstev, dává povlaku dobrou adhezi, nízké hodnoty Ra a oproti ostatním povlakům během zahřátí nejméně podléhá oxidaci.
- Povlak na vzorku č. 4 má vlivem kladení monovrstev oproti ostatním zkoušeným povlakům nejhorší adhezi. Monovrstvy, jejichž struktura je složená z kuželovitých zrn, se vlivem zatížení plasticky deformují, což následně vyvolá rozsáhlé odlupování vrstev povlaku. I přes zhoršenou přilnavost je to však povlak s nejlepší otěruvzdorností a nejnižšími hodnotami Ra a to pravděpodobně díky své struktuře a složení. S otěruvzdorností povlaku bude růst i jeho tvrdost.

Jak je ze závěrečného přehledu patrné, ne vždy se teoretické poznatky shodují s poznatky získanými z praktického měření. Vyhodnocování vlastností povlaku je tedy poměrně složitá a komplexní záležitost a jak již bylo zmíněno dříve, je závislá na mnoha parametrech. Porozumění jednotlivých vlastností a jejich závislostí umožňuje vývojářům nadále tyto povlaky zkvalitňovat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MATTOX, Donald. *Handbook of physical vapor deposition (pvd) processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control*. [online]. 1998 [vid. 2013-05-14]. ISBN 0-8155-1422-0. Dostupné z: <http://lib.semi.ac.cn:8080/tsh/dzzy/ebooks/full/fn121.pdf>
2. BORO VAN, Petr. *Řezné nástroje (2)*. In: Technický týdeník. [online]. 2011 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serial/rezne-nastroje/rezne-nastroje-2_8514.html
3. MATUŠKA, Martin. *Aplikace PVD povlaků pro frézování*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
4. USUI, Hiroaki a Kuniaki TANAKA. *Organic Film Formation by Deposition Technique*. In: Usui Lab. [online]. 2008 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.tuat.ac.jp/~usuilab/English/index.html>
5. RWTH AACHEN physik. *Sputter Deposition*. [online]. 2007 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.physik.rwth-aachen.de/en/institutes/institute-ia/research/sputter-deposition/>
6. FOLTÝN, Michal. *Povlakované slinuté karbidy*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
7. ZINDULKA, Ondřej. *Moderní metody povlakování nástrojů*. In: MM průmyslové spektrum. [online]. 2004 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/03/2004_10.pdf
8. MATTOX, Donald. Ion plating - past, present and future. *Surface and Coatings Technology*. [online]. 2000, č. 133-134, s. 517-521 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897200009221>
9. SANDVIK COROMANT. *Povlakovaný slinutý karbid*. [online]. [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx
10. COMMERC SERVICE. *Povlak Eifeler TiN*. [online]. 2008 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.commercservice.sk/tin.html>
11. WIKIMEDIA COMMONS. *Titanium nitride coating*. [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Titanium_nitride_coating.jpg
12. ICS CUTTING TOOLS, INC. *Special Surface Treatments*. [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.icscuttingtools.com/catalog/page_007.pdf

13. COMMERC SERVICE. *Povlak Eifeler ZrN*. [online]. 2008 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.commercservice.sk/zrn.html>
14. Zirconiumnitrid. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 29. 4. 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Zirconium_nitride
15. COMMERC SERVICE. *Multivrstvý povlak Eifeler TiCN*. [online]. 2008 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.commercservice.sk/ticn.html>
16. COMMERC SERVICE. *Nanokompozitný povlak Eifeler TiAlSiN*. [online]. 2008 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.commercservice.sk/sistral.html>
17. COMMERC SERVICE. *Povlak Eifeler CrN a CrCN*. [online]. 2008 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.commercservice.sk/crn.html>
18. NORTHEAST COATING TECHNOLOGIES. *Plasma Nitriding*. [online]. 2007 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.northeastcoating.com/PlasmaApplications_1.htm
19. HOLUBÁŘ, Pavel. *Počítačová simulace růstu PVD povlaků a nová řada trojvrstvých povlaků*. In: MM průmyslové spektrum. [online]. 2008 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-rustu-pvd-povlaku-a-nova-rada-trojvrstvyh-povlaku.html>
20. *Výkonné vrtací nástroje - vysoká produktivita obrábění*. In: MM Průmyslové spektrum. [online]. 2001 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vykonne-vrtaci-nastroje-vysoka-produktivita-obrabeni-2.html>
21. SELOS. *Korunkové vrtáky HSS-TiAlN, 30 mm*. [online]. 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.magnety.sk/cz/korunkove-vrtaky-hss-tialn30/>
22. GROTE, Karl-Heinrich a Erik ANTONSSON. *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. [online]. 2009 [vid. 2013-05-14]. ISBN 978-3-540-30738-9. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=9T5kd-ewRE8C&pg=PA628&lpg=PA628&dq=TiCrN+are+recommend+for+finishing&source=bl&ots=5fR2sGzjKA&sig=JrYSweJgYlxyEscI26BjjEsgqA&hl=cs&sa=X&ei=7W6OUeLxBsrHsgaLwYCo-DA&ved=0CDAQ6AEwAA#v=onepage&q=TiCrN%20are%20recommend%20for%20finishing&f=false>
23. *Řezné nástroje (3)*. In: Technický týdeník. [online]. 2011 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serial/rezne-nastroje/rezne-nastroje-3_8515.html
24. PALDEY a DEEVI. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review. *Materials Science and Engineering*. 2003, č. 342, s. 58-79.

25. HEDENQUIST, Per, Stafan JACOBSON, Sture HOGMARK. Tribological PVD Coatings: Characterisation of Mechanical Properties. *Surface and Coating Technology*. 1997, str. 212-217.
26. MOLLIKOVÁ, Eva. Zkoušky tvrdosti podle Vickerse. *Zkoušení materiálů a výrobků*. [online]. [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
27. Adheze. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 6. 5. 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Adheze>
28. ŠÍMA, Michal, Mojmír JÍLEK, Pavel HOLUBÁŘ a Ondřej ZINDULKA. *Měření vlastností povlaků na nástrojích*. In: MM Průmyslové spektrum. [online]. 2004 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich.html>
29. PVD coating characterization: Parameters and instruments to define morphological and tribological characteristics for technical applications. *P and P - Thin Advanced Technologies*. [online]. 2003 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.p-pholding.com/pdf/PVD-coating-characterization-technical-applications.pdf>
30. ATEAM. *Tenké vrstvy*. [online]. [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
31. PLATIT. *Test Methods of Coating Adhesion*. [online]. 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.platit.com.hk/en_Technology_NewsInfo.asp?id=1028
32. HOLUBÁŘ, Pavel, Mojmír JÍLEK a Milan RŮŽIČKA. *PVD technologie příprav otěrvyzdorných a kluzných vrstev v průmyslových podmínkách*. In: Jemná mechanika a optika. [online]. 2006, roč. 51, č. 4, str. 96-112 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://jmo.fzu.cz/2006/Jmo-04/JMO-200604.pdf>
33. BOUZAKIS, HADJIYIANNIS a SKORDARIS. The influence of the coating thickness on its strength properties and on the milling performance of PVD coated inserts. *Surface and Coating Technology*. 2003, č. 174-175, s. 393-401.
34. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
35. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody: Sylabus*. Brno, 2003, 83 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody_cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf
36. WENYI, Yan, O'Dowd NOEL 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*. 2002, č. 3.

37. UZIMEX. *Měření drsnosti povrchu*. [online]. 2006 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.uzimex.cz/Sortiment/Mereni-drsnosti-povrchu.html>

38. BENEŠ, Petr. Teplotní degradace tenkých otěruvzdorných PVD vrstev. *ATeam* [online]. 2007 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/download/rigo-benes.pdf>

39. VYDAVATELSTVÍ VSCHT . *Krystalografie rentgenová*. [online]. [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-002_v1/hesla/krystalografie_rentgenova.html

40. MELO, Anderson a Julio Cesar MILAN. Some Observation on Wear and Damages in Cemented Carbide Tools. *Journal of the Braz. Soc. Mech. Sci. and Eng.* [online]. 2006, č. 3 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.scielo.br/pdf/jbsmse/v28n3/30563.pdf>

41. CHEN, CHANG a SHIEH. Structures and Properties of (TiAlSi)N Films. *Procedia Engineering*. 2011, č. 36.

42. DRAŠAR, Petr. *Otěruvzdorné - PVD a CVD - povlaky*. In: Povrcháři. [online]. 2008, č. 2 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/200802_povrchari.pdf

43. SOSNOVÁ, Martina. Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování. *ATeam*. [online]. 2006 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_sosnova.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
HV	[-]	Tvrдост podle Vickerse
MP	[-]	Víceúčelový povlak
PVD	[-]	Physical vapour deposition
SD	[-]	Směrodatná odchylka
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička
WC	[-]	Karbid wolframu
Al	[-]	Hliník
AlCrN	[-]	Nitrid chromu a hliníku
Al ₂ O ₃	[-]	Oxid hlinitý
AlTiCrN	[-]	Nitrid hliníku titanu chromu
Co	[-]	Kobalt
CoWO ₄	[-]	Karbidy vzniklé po oxidaci
Cr ^{IV}	[-]	Šestimocný chrom
CrN	[-]	Nitrid chromu
Si ₃ N ₄	[-]	Nitrid křemičitý
s.r.o	[-]	Společnost s ručením omezeným
TaNb	[-]	Niob tantalu
Ti	[-]	Titan
TiAlCO	[-]	Kluzná vrstva TiAlCO
TiAlN	[-]	Nitrid hliníku titanu
TiAlSiN	[-]	Nitrid křemíku hliníku a titanu
TiCN	[-]	Kartido-nitrid titanu
TiCrN	[-]	Nitrid chromu titanu
TiN	[-]	Nitrid Titanu
ZrN	[-]	Nitrid zirkonu

Symbol	Jednotka	Popis
A	[-]	Amper
D	[mm]	Průměr délky úhlopříček vtisku
F	[N]	Síla
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	Nejvyšší výška profilu
T	[°C]	Teplota
ap	[mm]	Šířka záběru ostří
fz	[mm]	Posuv na zub
vc	[m/min]	Řezná rychlost
z	[-]	Počet zubů
α	[°]	Vrcholový úhel čtyřbokého jehlanu

SEZNAM PŘÍLOH

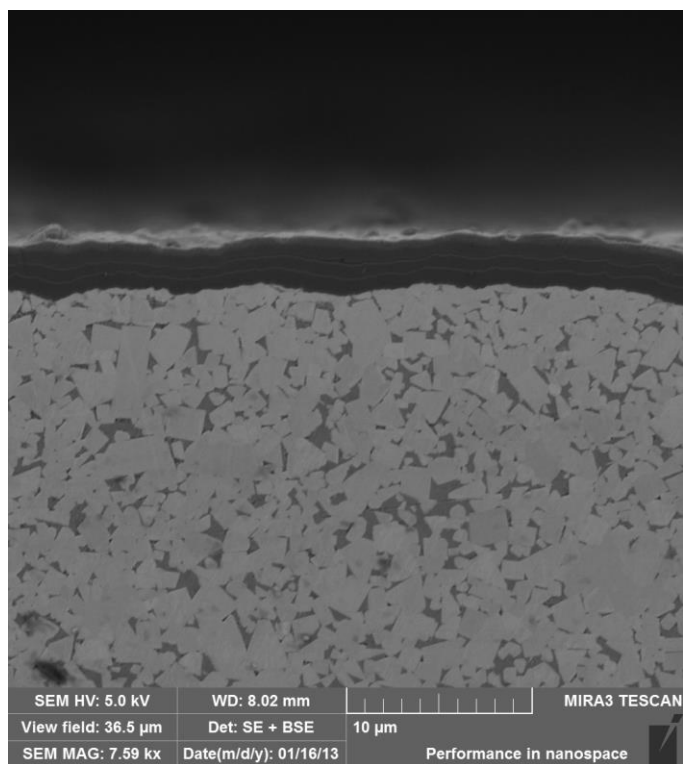
Příloha 1 Struktura jednotlivých vzorků

Příloha 2 Difraktogramy

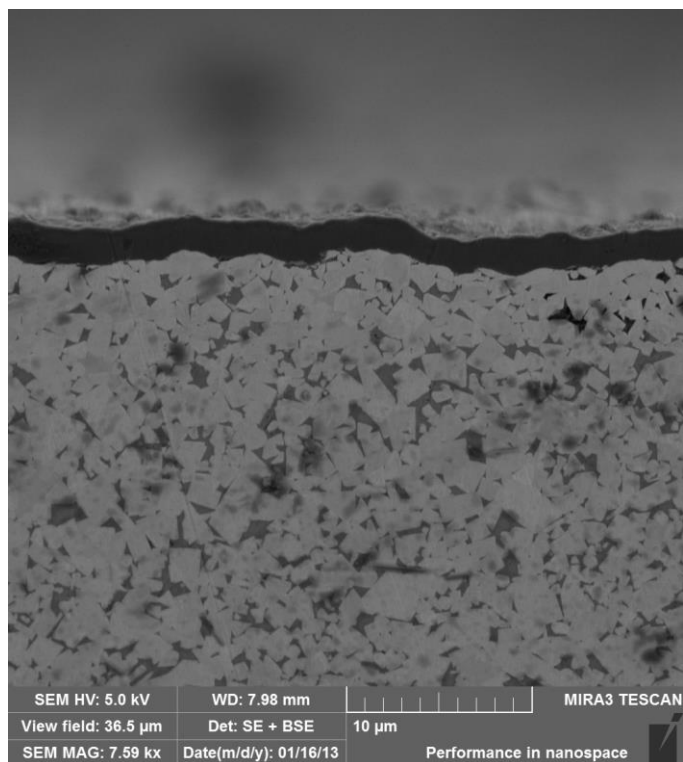
Příloha 3 Snímky teplotních trhlin po 1. a 2. průjezdu

PŘÍLOHA 1

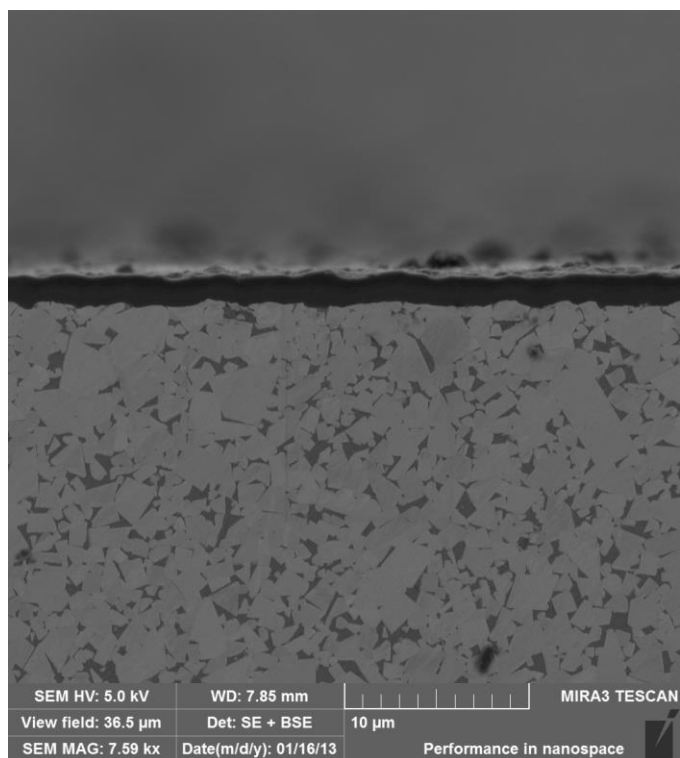
Vzorek č. 1



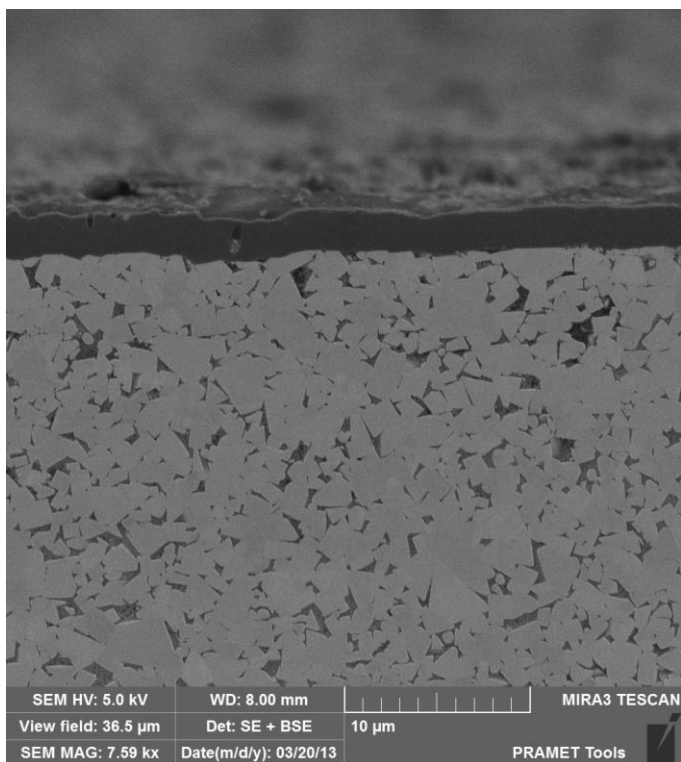
Vzorek č. 2



Vzorek č. 3

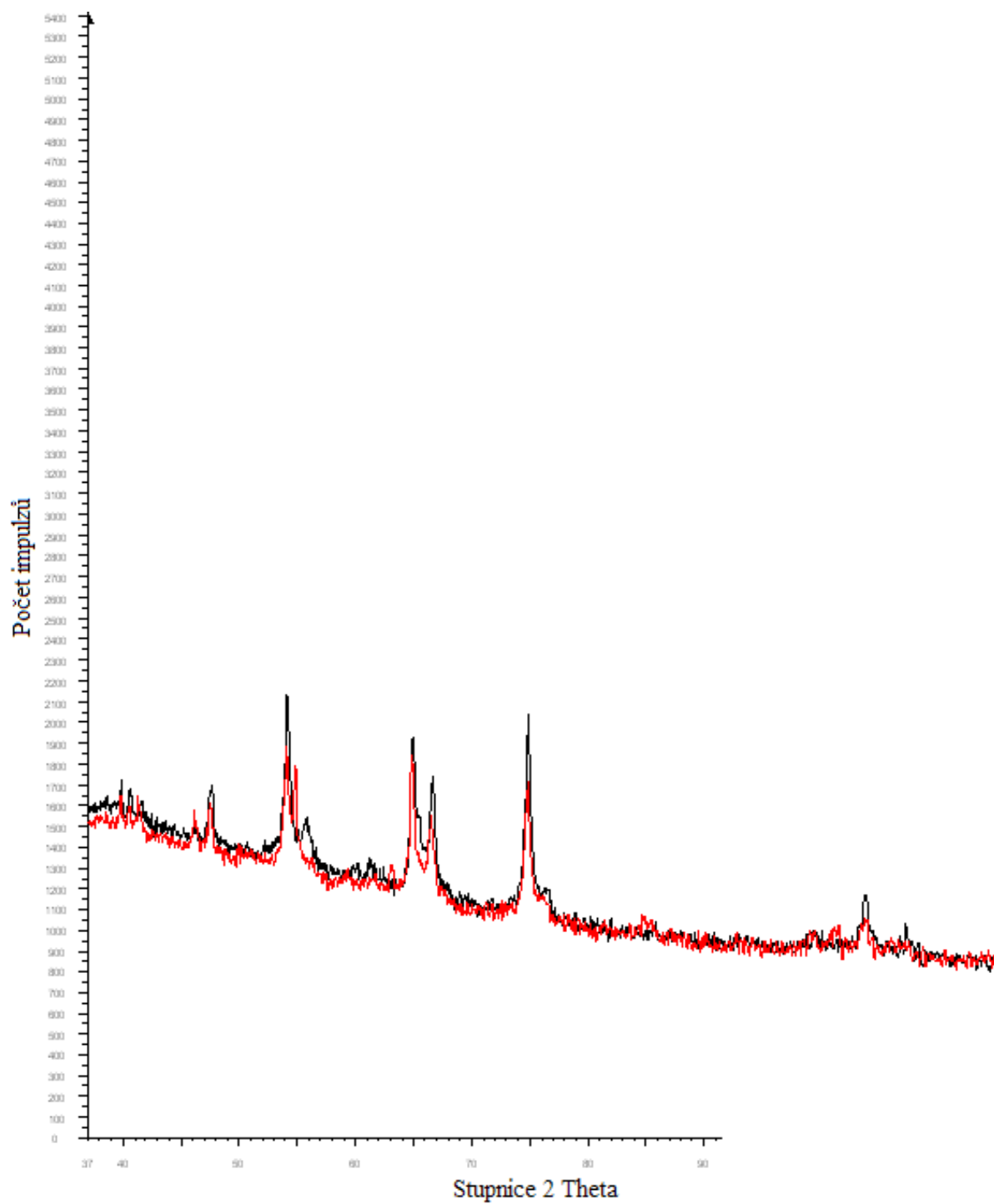


Vzorek č. 4



PŘÍLOHA 2

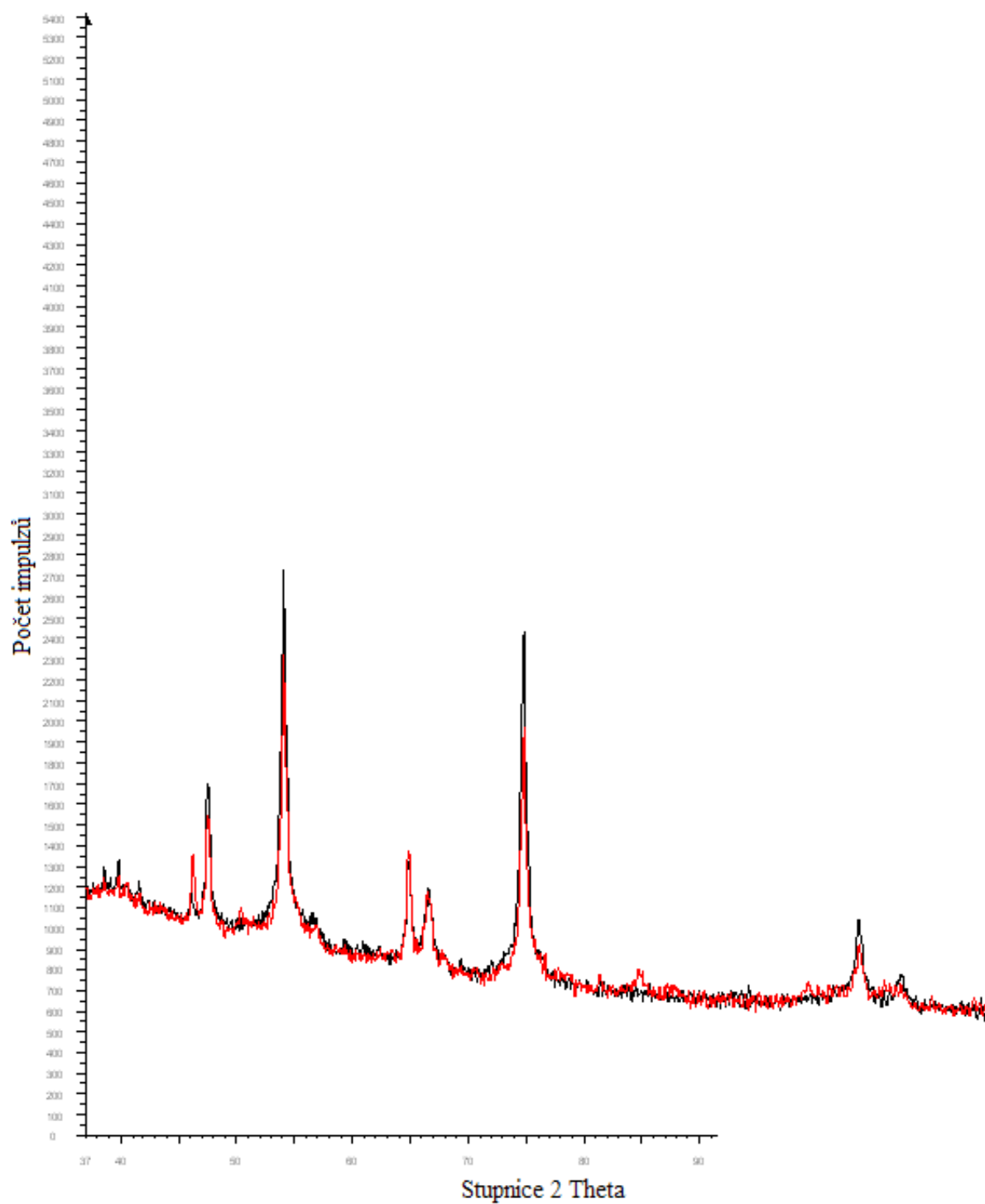
Vzorek č. 1



Černá – povlakovaný, nezahříváný vzorek.

Červená – zahřátí na 700 °C.

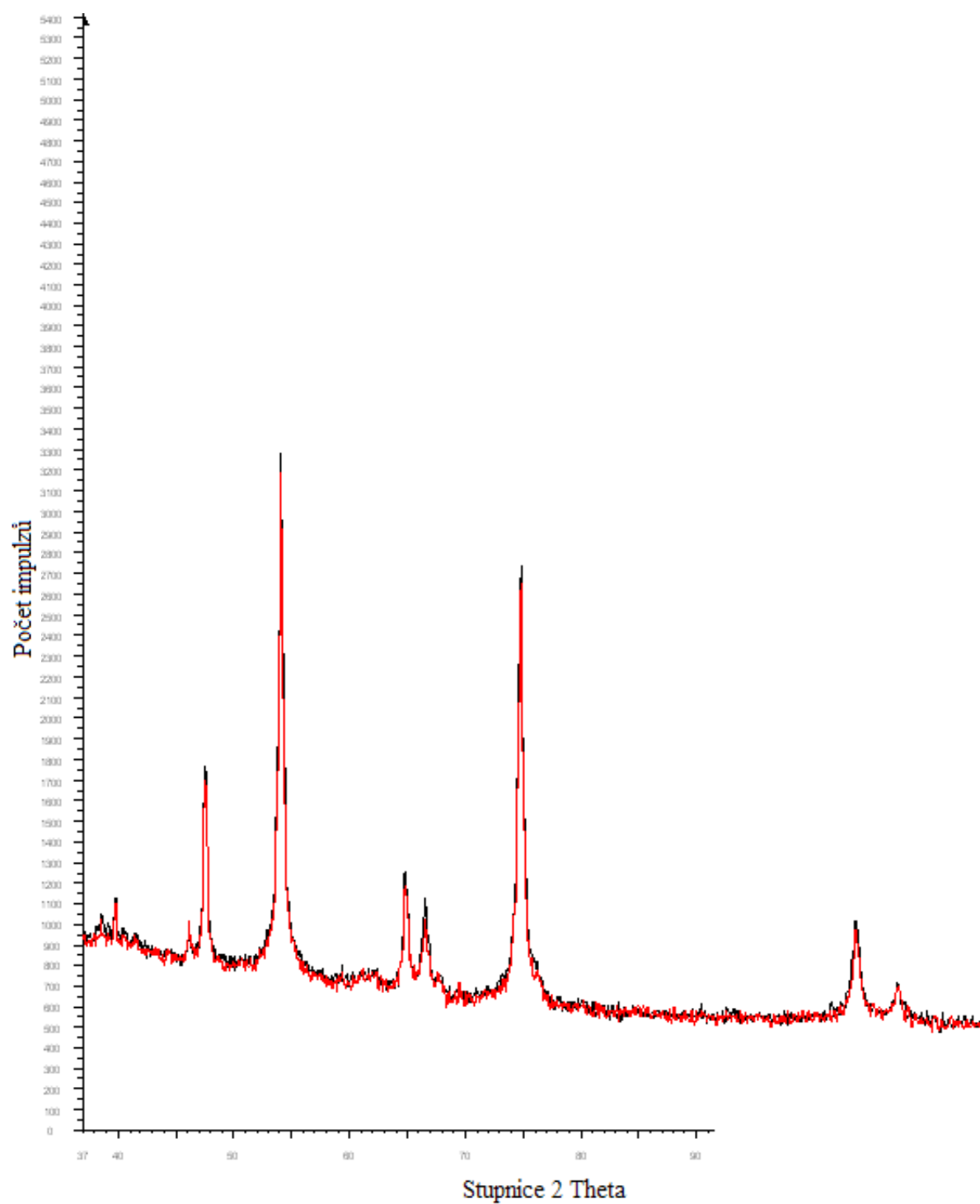
Vzorek č. 2



Černá – povlakovaný, nezahříváný vzorek.

Červená – zahřátí na 700 °C.

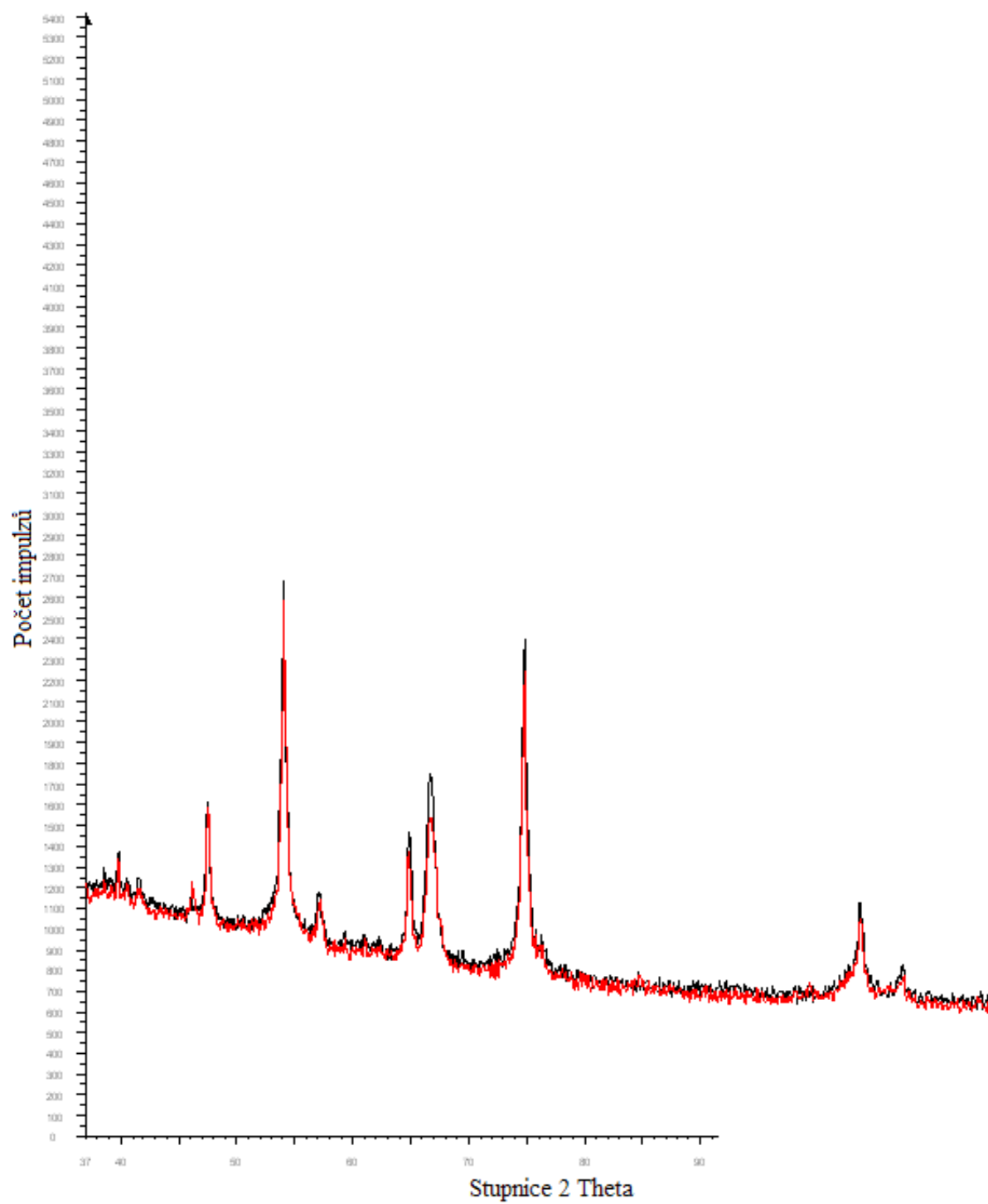
Vzorek č. 3



Černá – povlakovaný, nezahříváný vzorek.

Červená – zahřátí na 700 °C.

Vzorek č. 4

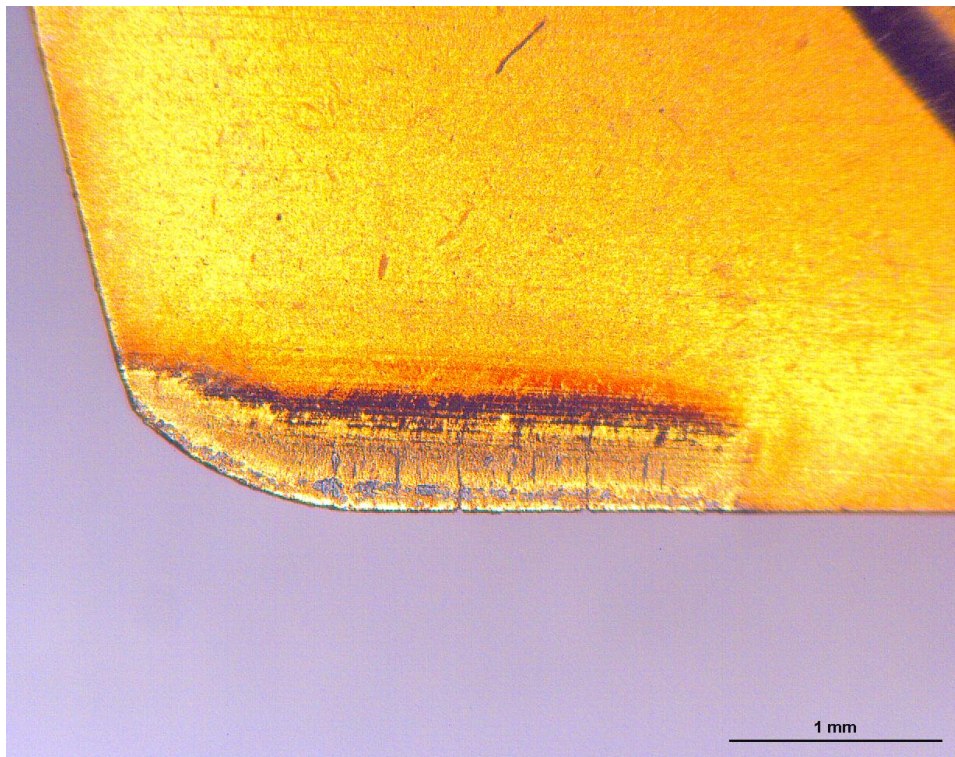


Černá – povlakovaný, nezahřívaný vzorek.

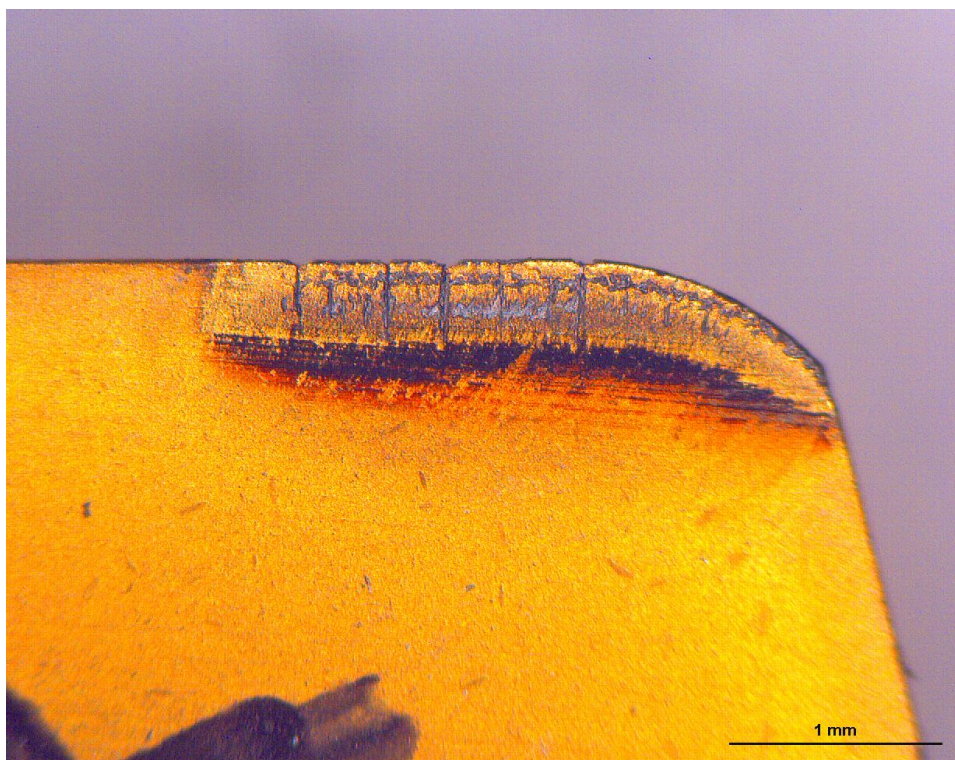
Červená – zahřátí na 700 °C.

PŘÍLOHA 3

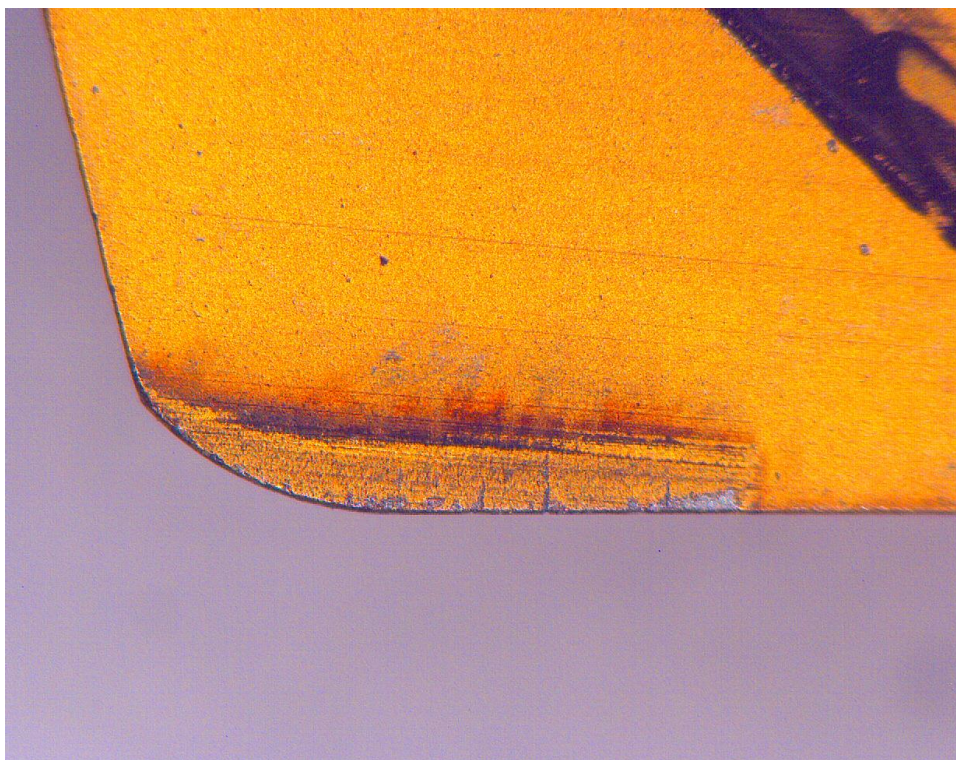
Vzorek č. 1 – po 1. průjezdu



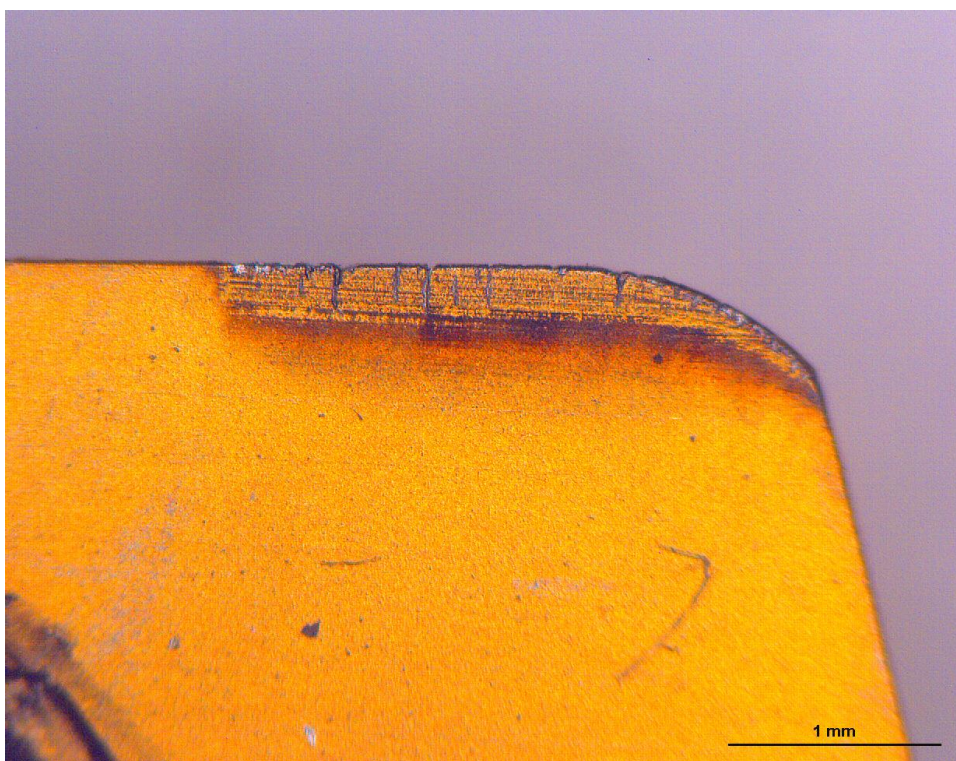
– po 2. průjezdu



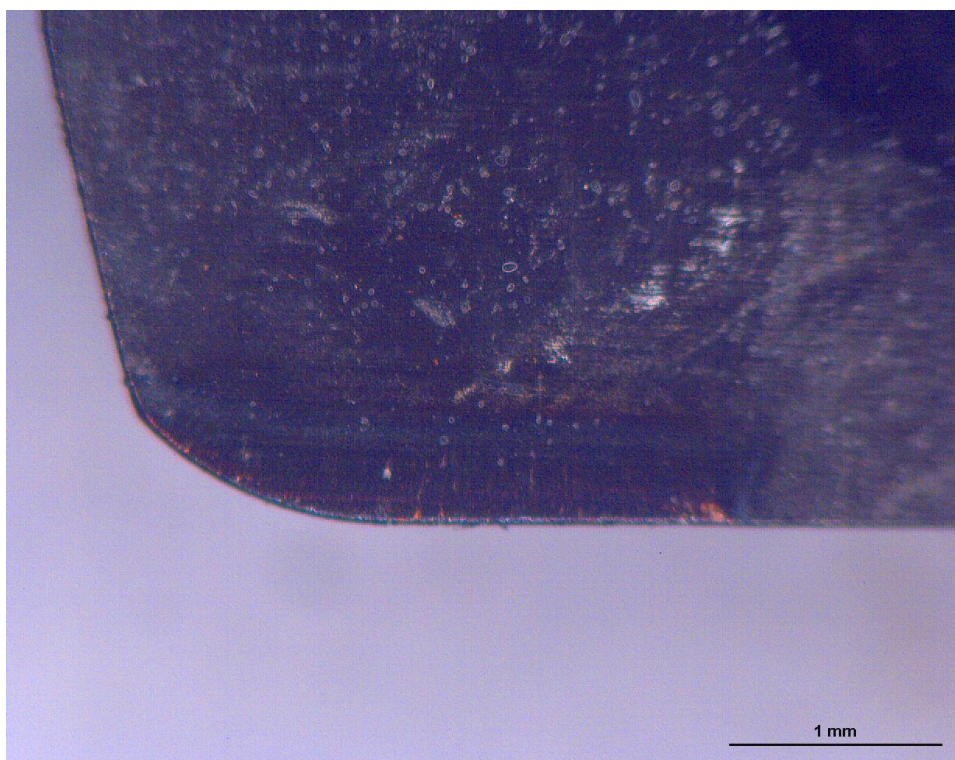
Vzorek č. 2 – po 1. průjezdu



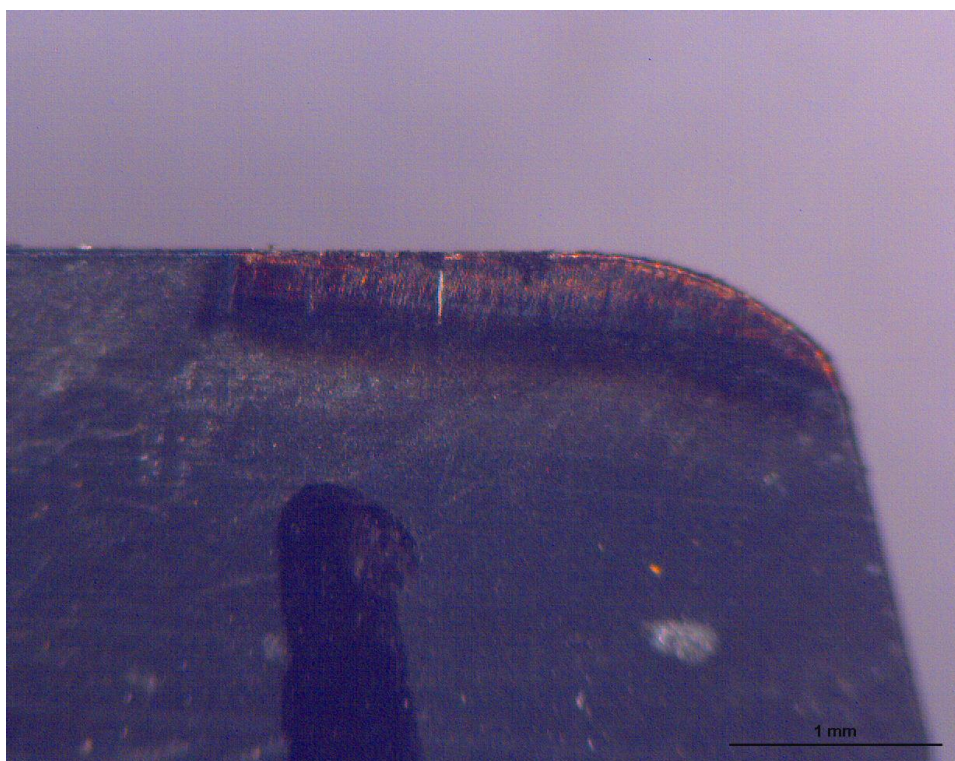
– po 2. průjezdu



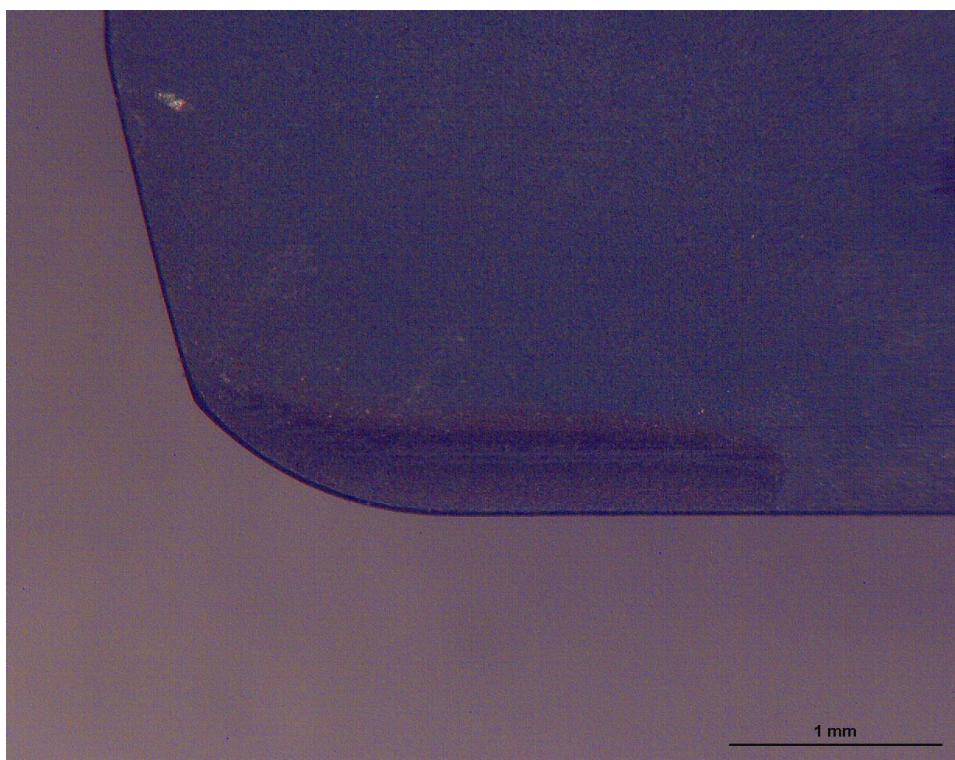
Vzorek č. 3 – po 1. průjezdu



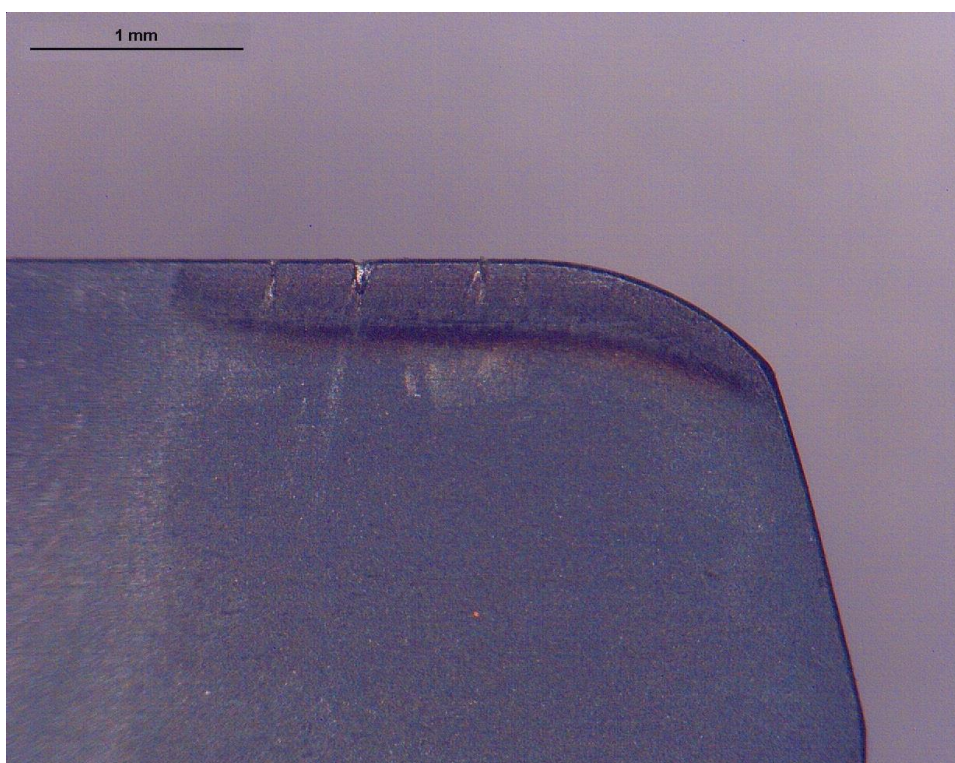
– po 2. průjezdu



Vzorek č. 4 – po 1. průjezdu



– po 2. průjezdu



Podmínky frézování:

Stroj	MCV 1270
Materiál	12050.1 180 - 190 HB
Chlazení	řezná kapalina směřovaná na výstup destičky z materiálu
Operace	nesousledné rovinné frézování
Destičky	SPKN 1203 EDER
Úhel nastavení hlavního ostří	$\kappa_r = 75^\circ$
z	1 zub
vc	420 m/min
otáčky	1319
fz	0,1 mm/z
ap	2,5 mm
rázů na 1 zub pro 1. průjezdu	3300
rázů na 1 zub pro 2. průjezdu	6600
čistý čas obrábění pro 1. průjezdu	2,5 min.
čistý čas obrábění pro 2. průjezdu	5 min.

Proces frézování:

