

PVD povlaky pro nástrojové oceli

Bc. Martin Rund

Vedoucí práce: Ing. Jan Rybníček Ph.D

Abstrakt

Tato práce se zabývá způsoby a možnostmi depozice PVD povlaků na nástrojové oceli. Obsahuje rešerši o PVD procesech, dále pak popisuje různé před depoziční procesy a charakterizuje vlastnosti CrN povlaků a vytvoření duplexních CrN povlaků. V druhé části práce jsou uvedeny výsledky a parametry provedených měření, kde se již zabývá porovnáním duplexních s „neduplexními“ CrN povlaky.

Klíčová slova

PVD povlakování, Duplexní povlaky, Vanadis 23, Orvar Suprem

1. Úvod

Od 70. let zaznamenalo PVD povlakování velký rozvoj. Prvním tenkým povlakem naneseným z plynné fáze, byl povlak TiN. V roce 2000 už bylo na trhu 14 různých druhů těchto vrstev. Vezme-li nyní v úvahu dnešní možnosti výroby povlaku jako např. Vícevrstevné systémy, nanokompozitní povlaky, případně gradientní vrstvy atd., je jich v dnešní době již nepřehledné množství.

PVD metoda je založena na odpaření nebo odprašení pevné látky v řízené atmosféře. Interval teplot pro depozici je 180 – 600 °C (tloušťka pohybuje mezi 2-6 μm). Výhoda této metody je nízká teplota samotného procesu, nedochází tedy k teplemu ovlivnění povlakovaného materiálu. Nevýhodou avšak může být nedostatečná adheze na základní materiál, pokud se povlakovaný materiál liší od základního svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Díky nízké teplotě nedochází k dostatečnému difúznímu spojení.

Hlavní rozvoj v tomto odvětví lze rozdělit do dvou směrů. Prvním je snaha vyvinout povlaky s vlastnostmi co nejvíce podobnými nástrojovým ocelím, druhým je vlastní úprava ocelového substrátu takovým způsobem, aby při velkých zatížení nedocházelo ke křehkému porušování povlaku.

Náplní této práce bylo především posoudit vlastnosti duplexních a „neduplexních“ CrN povlaků. Dále posoudit použití ledeburitické a subledeburitické oceli jako substrát pro PVD povlakování

2. Rozdělení PVD

Nejčastěji se PVD rozlišuje na čtyři základní typy.

Vakuové obloukové napařování – principem je odpaření materiálu z pevného nebo kapalného zásobníku ve vakuu a kondenzaci par na povlakovaném povrchu. Výhodou je vysoká depoziční rychlost avšak na úkor zhoršené kvality povlaku, díky tvorbě makročástic.

Reaktivní magnetonové napařování – princip spočívá v odprašování materiálu z pevného targetu kladnými ionty v plazmě, a následné kondenzaci takto získaných částic na povrchu materiálu.

Iontové plátování – jedná se o kombinovaný proces aktivovaný plazmou, kde jsou odpařené částice přitahovány k záporně nabitému vzorku, který je „bombardován“ ionty.

Reaktivní magnetronová depozice – v současnosti nejrozšířenější metoda. Spočívající v rozprašování targetu z daného kovu či slitiny, při použití reaktivních plynů např. N_2 , O_2 , CO_2 , NH_3 a další. Při zvolení vhodných terčů a reaktivních plynů lze připravit celou škálu vhodných materiálů. U rozprašování ze slitinového terče nemusí být výroba nejjednodušší. Například TiN se vyrábí práškovou metalurgií [1].

3. Technologie před povlakováním

Na začátku je nejdůležitější výběr materiálu, protože již ten má zásadní vliv jak na technologii, které budou před povlakovacím procesem, tak i na samotný způsob povlakování. Po broušení nástroje následuje intenzivní chemické čištění, oplach s následným pískováním případně odjehlením (pozn. přesné podmínky těchto procesů nemají důležitou vypovídací hodnotu pro tuto práci a proto nejsou více podrobně charakterizovány).

Při založení nástrojů do povlakovací komory, následuje před fází povlakování, cyklus iontového čištění. Jehož principem je přivedení záporného předpětí na substrát a ionizace plynu v komoře (např. argon). Ionizované atomy plynu jsou záporným předpětím substrátu urychlovány a při dopadu na substrát „vyrážejí“ částice nečistot. V druhé fázi se přiblíží nízkonapěťový zdroj elektrického oblouku k depoziční katodě. Zde se vytvoří katodová skvrna, která je opět zdroj iontů, tímto způsobem je povrch dočištěn. Nevhodně zvolenými parametry může dojít (především za vyšších energií) k částečnému odprášení povrchu, kde jsou nejvíce postiženy fáze s menší kohezní pevností a tvrdostí.

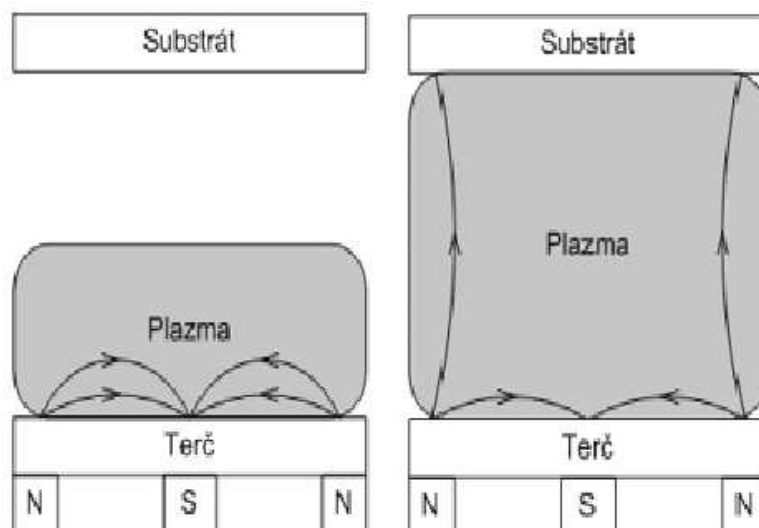
4. Magnetronová depozice

Po iontovém čištění následuje už samotný depoziční proces. Jak již bylo zmíněno výše, existuje mnoho metod PVD povlakování, z nichž každá má určité výhody a nevýhody. V našem případě byla použita technologie reaktivní magnetronové depozice na přístroji *Flexicoat 850* od firmy Hauzer.

Magnetronový systém je diodový (viz obr. 1) využívající magnetické pole. Terč (často označován Target) materiálu, který chceme rozprašovat, je katodou, na které je záporné napětí zdroje. Anoda co by povlakovaný substrát může být: uzemněna, na plovoucím potenciálu, nebo na předpětí. V případě uzemnění není anodou pouze substrát, ale také stěny komory, která je také uzemněná. Předpětí je zde důležitým parametrem ovlivňujícím strukturu povlaku, přičemž může být záporné nebo kladné.

Magnetické pole je vytvářeno vnitřním magnetem, který je uprostřed terče a vnější kruhový magnet je vně terče. Pole je zde proto, aby zamezilo ztrátám elektronů, a nutí je obíhat podél magnetických siločar v blízkosti terče, čímž se zvyšuje počet ionizačních srážek. Následkem toho stačí nižší napětí výboje, zrychlení depozice a možnost pracovat za nižších tlaků [2].

Typů magnetronů je mnoho. Liší se především uspořádáním magnetického pole. Častějším případem je tzv. nevyvážený magnetron (viz obr. 2). Vnější magnet je silnější než vnitřní. Některé siločáry jsou pak neuzavřeny a směřují k substrátu.



Obr. 1 Konvenční magnetron [2] **Obr.2** Nevyvážený magnetron [2]

Elektrony se pak mohou pohybovat až k substrátu a ionizují pracovní plyn.

Přítomnost reaktivního plynu je nutná. Reaguje s rozprášenými atomy terče, čímž umožňuje formování materiálu s požadovanými stechiometrickými vlastnostmi. Používají se N_2 , O_2 , CO_2 , NH_3 apod. Správnou kombinací plynu a materiálu terče, je možno dosáhnout sloučenin se specifickými vlastnostmi.

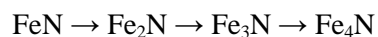
Nevýhodou reaktivního naprašování je, že se jedná o nelineární proces, který se projevuje hysterezním jevem. Pokud dojde k překročení průtoku reaktivního plynu, dojde k takzvanému „otrávení terče“. To je stav, kdy se na povrchu terče vytvoří nevodivý materiál, což má za následek prudký pokles depoziční rychlosti [2]. Po snížení průtoku reaktivního plynu se depoziční rychlost opět zvětšuje. S otrávením terče souvisí vznik mikrooblouků. Při dopadu iontu na nevodivý povlak nedochází k jeho zneutralizování nýbrž, akumulaci. Tento systém se začne chovat jako kondenzátor, který je nabíjen. Což v důsledku může vést ke snížení životnosti terče, vzniku chyb ve struktuře povlaku a celkové destabilizaci depozičního procesu.

Tyto nedostatky je možné odstranit použitím pulzního zdroje při naprašování. DC pulzní naprašování je velmi efektivní při eliminaci mikrooblouků a zároveň se jím dá dosáhnout vyšších rychlostí depozice [2].

5. Duplexní povlakování

Jedním z možných způsobů zlepšení adheze je takové přizpůsobení povrchu oceli, aby nedocházelo k plastickým deformacím. Toho lze dosáhnout tepelným zpracováním. Například kalením s následným popouštěním, případně plazmovou nitridací. Při plazmové nitridaci je veden elektrický proud plynem, kdy stěna pece je anoda a povlakovaná součást slouží jako katoda. Působením toku elektrického proudu v dusíkaté atmosféře dochází k výboji modro-fialové barvy, který rovnoměrně pokrývá povrch součásti během celého procesu. Kladné ionty jsou vlivem elektrostatického pole urychlovány k nitridovanému materiálu. Při dopadu částic dochází k ohřívání materiálu vlivem přeměny kinetické energie dopadajících molekul na tepelnou, zároveň jsou vyráženy ionty a elektrony z oceli (tzv. katodové odprašování). Během procesu vzniká na povrchu mikrovrstva přesycených nitridů, jež je v dynamické rovnováze. Probíhá tedy současně rozklad přesycených nitridů (viz obr. 3)

| | |
|-----------------|----------------|
| fáze ϵ | fáze γ' |
|-----------------|----------------|



Obr. 3 Rozklad přesycených nitridů [1]

Dusík, který se během rozkladu uvolňuje, difunduje do materiálu. Tenká nitridická vrstva ϵ případně γ' může vést jak ke zlepšení tak i zhoršení vlastností duplexních vrstev [3]. Při zvýšených teplotách může dojít k rozložení této vrstvy za vzniku škodlivých sloučenin, a tím k snížení tvrdosti povlaku a snížení odolnosti vůči opotřebení. Je tedy nutné proces plasmové nitridace kontrolovat a používat atmosféry s menším obsahem dusíku, čímž se zabrání vzniku karbonitridů na povrchu materiálu. Mezi hlavní výhody tohoto procesu patří jen nepatrné deformace nástrojů (není nutné následně obrábět), vysoká efektivita procesu, vysoká regulovatelnost procesu a nízká spotřeba provozních plynů [1].

Při použití plazmové nitridace a následného PVD povlakování (nutné aby oba procesy probíhaly v jednom a tom samém zařízení), vzniká tzv. duplexní povlak, jehož životnost a tribologické vlastnosti jsou lepší než u samotného povlaku nebo nitridace [4]. Duplexní povlak výrazně přispívá ke zlepšení adheze mezi např. taveninou a povrchem (u forem na odlévání), čímž se snižuje tepelná únava formy. Zároveň bylo zjištěno, že nitridování substrátu výrazně zvyšuje jeho tvrdost, odolnost vůči opotřebení a tečení.

6. Povlaky CrN

Povlaky na bázi CrN jsou v posledním čtvrt století podrobně zkoumány a v moderních aplikacích jsou velmi populární díky své odolnosti vůči opotřebení a korozní odolnosti i při vysokých teplotách. Nejčastěji se používají na aplikace obrábění mědi a jejích slitin, v procesech přesného lití a tváření hliníkových slitin. Výhoda oproti např. TiN je, že CrN povlaky je možné připravit ve větší škále tloušťek povlaků, až několik desítek μm . Rychlost depozice CrN je totiž 2-3 rychlejší než u TiN [1]. Ve skutečnosti ale není velká tloušťka povlaku výhodná, pokud opomineme ekonomické hledisko tak především z důvodu vzniku velkého pnutí ve vrstvě. Jako neoptimálnější se jeví pro všemožné tribologické systémy tloušťka 7 μm [1].

Základními fázemi jsou hexagonální Cr_2N a kubický CrN s plošně centrovanou mřížkou. Fázové složení povlaku určují parametry depozice a to především: parciální tlaky argonu a dusíku, teplota substrátu, napětí na substrátu, rychlost růstu povlaku a proud na targetu. Regulací těchto parametrů lze připravovat právě výše zmíněné fáze, přičemž fáze Cr_2N je tvrdší a má lepší korozní odolnost za studena, naproti tomu má fáze CrN lepší oteřuvzdornost [1]. Mikrotvrdost povlaků se pohybuje 1500 - 2900 HV, ale lze dosáhnout tvrdosti větší než 3000 HV. Existuje předpoklad, že tvrdost povlaku je závislá na velikosti zrn nitridu chromu a že existuje optimální velikost zrna, při níž je možné dosáhnout maximální tvrdosti. Velkou výhodou vrstev typu CrN je, že je možné vytvořit povlak, jehož modul pružnosti se nebude příliš lišit od modulu pružnosti substrátu. Je nutné ale brát v potaz, rozdílné vlastnosti povlaku v závislosti na daném substrátu. V případě ledeburitických ocelí je zjištěno, že povlak typu CrN vytváří velmi vysoká tlaková napětí 3,8 – 4,1 GPa. K řešení této skutečnosti se používá žíhání. Kdy po žíhání ledeburitické oceli při teplotě 300 °C kleslo napětí na cca 1,6 GPa [1].

Adheze CrN povlaků dosahuje dobrých výsledků, je-li aplikována na slinuté karbidy nebo ledeburitické oceli, případně i kalené oceli (např. 100Cr6). Již zmíněné žíhání má příznivý vliv i na adhezní chování povlaku, jako pravděpodobná příčina se jeví zhoršením přilnavosti povlaku na substrát právě díky vysokým tlakovým napětím. Zároveň lze říci, že adheze roste s ubývajícím podílem tvrdší fáze CrN a s rostoucím podílem Cr_2N (případně samotného Cr).

Povlaky na bázi CrN si zachovávají vysokou korozní odolnost v čistém kyslíku i do velmi vysokých teplot. Po podrobné analýze bylo zjištěno, že během nanášení povlaků za vysokých teplot v oxidačním prostředí s vysokým obsahem kyslíku dochází k rozkladu (viz rce. 1,2)



A v případě vytvoření povlaku pouze z Cr₂N dochází k rozkladu na CrN (rce. 3)



Lze říci, že vysoká korozní odolnost je způsobena vytvořením oxidické vrstvy Cr₂O₃ na povrchu povlaku. Jak bylo zjištěno, mají příznivý vliv na korozní odolnost tahová napětí v povlaku. Až při 750 °C ztrácí povlak CrN ochranný účinek, dochází totiž k praskání oxidického povlaku. Ten totiž podléhá růstu tloušťky a vnitřním napětím. Kyslík pak může difúzní cestou pronikat dále do materiálu povlaku. Navíc se mohou objevit v povrchu mikropóry, které zhoršují adhezy materiálu.

7. Experimentální část

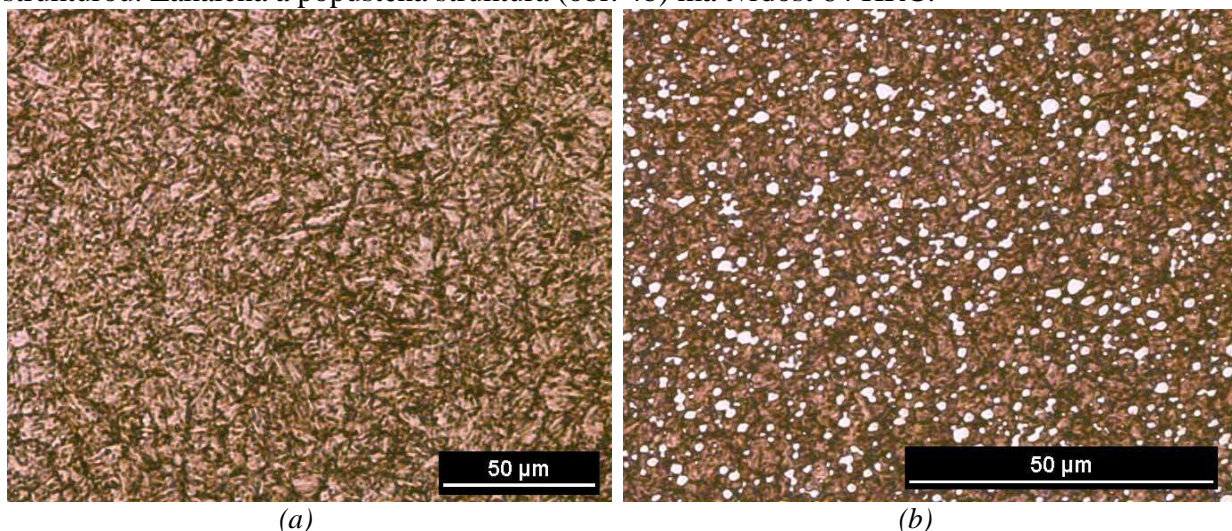
Oceli pro depozici PVD a následný popis tribologického chování byly vybrány takovým způsobem, aby výsledky byly referenčními pro co nejširší škálu materiálů.

Pro výzkum byla zvolena ocel HS 6-5-2 (ČSN 41 9830, Vanadis 23) a ocel X40CrMoV5-1 (ČSN41 9554, Orvar Supreme). 19 554 se nejčastěji používá k výrobě forem pro tlakové lití a 19 830 je typickým zástupcem oceli používané při výrobě řezných nástrojů. Jsou to velmi časté materiály, jež se používají pro PVD povlakování.

Výchozím polotovarem byly tyče kruhového průřezu (průměr 25 mm), v dodaném stavu byly žíhané na měkko. Příprava vzorků proběhla podle standardního metalografického postupu.

8. Vlastnosti a struktury materiálu

Orvar Supreme je ocel charakteristická vysokou rezistivitou proti teplotnímu rázu a únavě. Zároveň ale má dobrou tažnost, tvrdost a velmi jemnou strukturu. Je to subledeburitická ocel s perlitickou strukturou se sekundárními karbidy. Po zakalení a popuštění (obr. 4a) má tvrdost 51 HRC, kde je struktura popuštěný martenzit. Vanadis 23 je ledeburitická ocel s perlitickou strukturou. Zakalená a popuštěná struktura (obr. 4b) má tvrdost 64 HRC.



Obr.4 Struktura materiálu v zakaleném a popuštěném stavu (a) X40CrMoV5-1 (b) HS 6-5-2

Během jednoho depozičního cyklu byl nanesen povlak na oba typy vzorků. Aby na takto připraveném povlaku CrN (nebo duplexní CrN) bylo možné porovnat vlastnosti obou druhů

ocelí. Před povlakovacím procesem byly vorky mechanicky očištěny od nečistot a oxidických vrstev vzniklých při tepelném zpracování. Následovně byly odmaštěny v ultrazvukové pračce v acetonu. Povlakovací proces byl proveden v zařízení *Flexicoat 850*.

Duplexní povlakování – během 11 hodinového procesu byla metodou reaktivní magnetronové depozice vytvořena nejprve nitridovaná vrstva, na niž byl nanesen povlak Cr a následně CrN (viz tab.1). Teplota povlakovacího procesu byla 530 °C. Tloušťky povlaků byly změřeny pomocí metody Calatest.

Tabulka 1- výsledné tloušťky povlaků

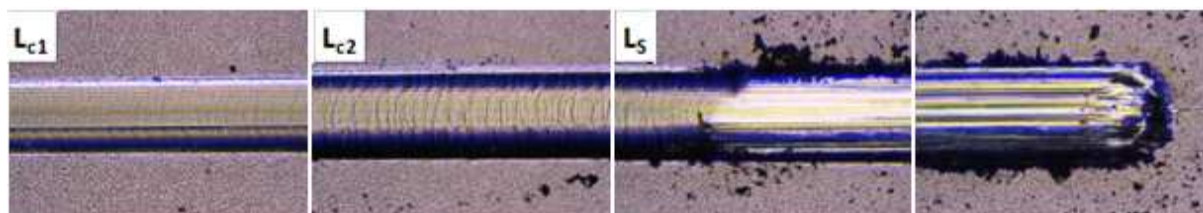
| | | |
|--------------------------|---------------|----------|
| <i>Duplexní povlak</i> | CrN | 4,27 μm |
| | Cr | 0,28 μm |
| <i>Povlak CrN</i> | CrN | 4,25 μm |
| | Cr | 0,23 μm |
| <i>Nitridická vrstva</i> | Orvar Supreme | 26,32 μm |
| | Vanadis 23 | 25,14 μm |

8.1. Adhezní chování povlaku

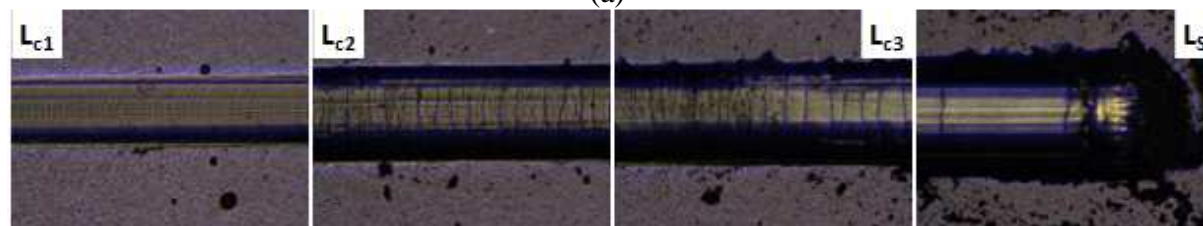
Nejdůležitější vlastností povlaku je jeho adheze k základnímu materiálu. Pro sledování adheze systému povlak – substrát byla použita vrypová zkouška „ Scratch test“. Principem metody je plynulé zatěžování indentoru (1-100 N), který se pohybuje rovnoběžně s povlakem. Zatížení bylo 50 N/min, při posuvu 5 mm/min a celkové délce 10 mm. Při zkoušce byl použit Rockwellův hrot (vrcholový úhel 120° a poloměr 0,2 mm). Při hodnocení vrypové stopy se sleduje oblast L_{C1} (první porušení povlaku, vznik trhlinek), L_{C2} (porušení povlaku většího rozsahu), L_{C3} (první adhezivní porušení povlaku) L_S totální odhalení substrátu [5] (obr.5), Výsledné hodnoty zatížení viz tab.2

Tabulka 2. - Výsledné hodnoty zatížení pro jednotlivé oblasti charakterizující kritické porušení

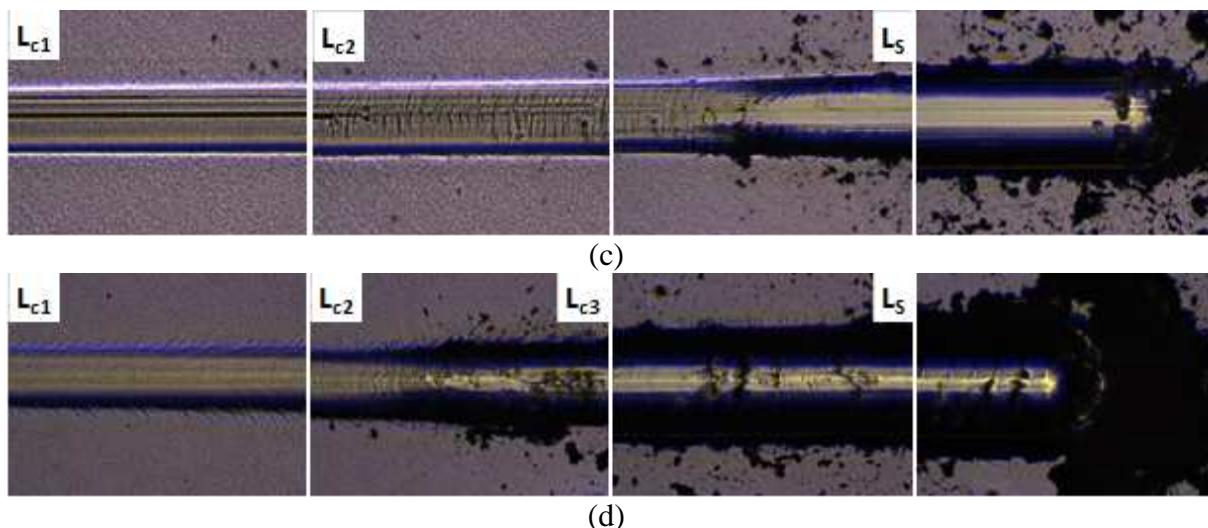
| Povlak | Substrát | L_{C1} [N] | L_{C2} [N] | L_{C3} [N] | L_S [N] |
|-------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|-----------|
| <i>Duplex CrN</i> | <i>Vanadis 23</i> | 50 | 76 | - | 85 |
| | <i>Orvar Suprem</i> | 45 | 58 | 76 | 83 |
| <i>CrN</i> | <i>Vanadis23</i> | 35 | 46 | - | 66 |
| | <i>Orvar Suprem</i> | 20 | 27 | 35 | 61 |



(a)



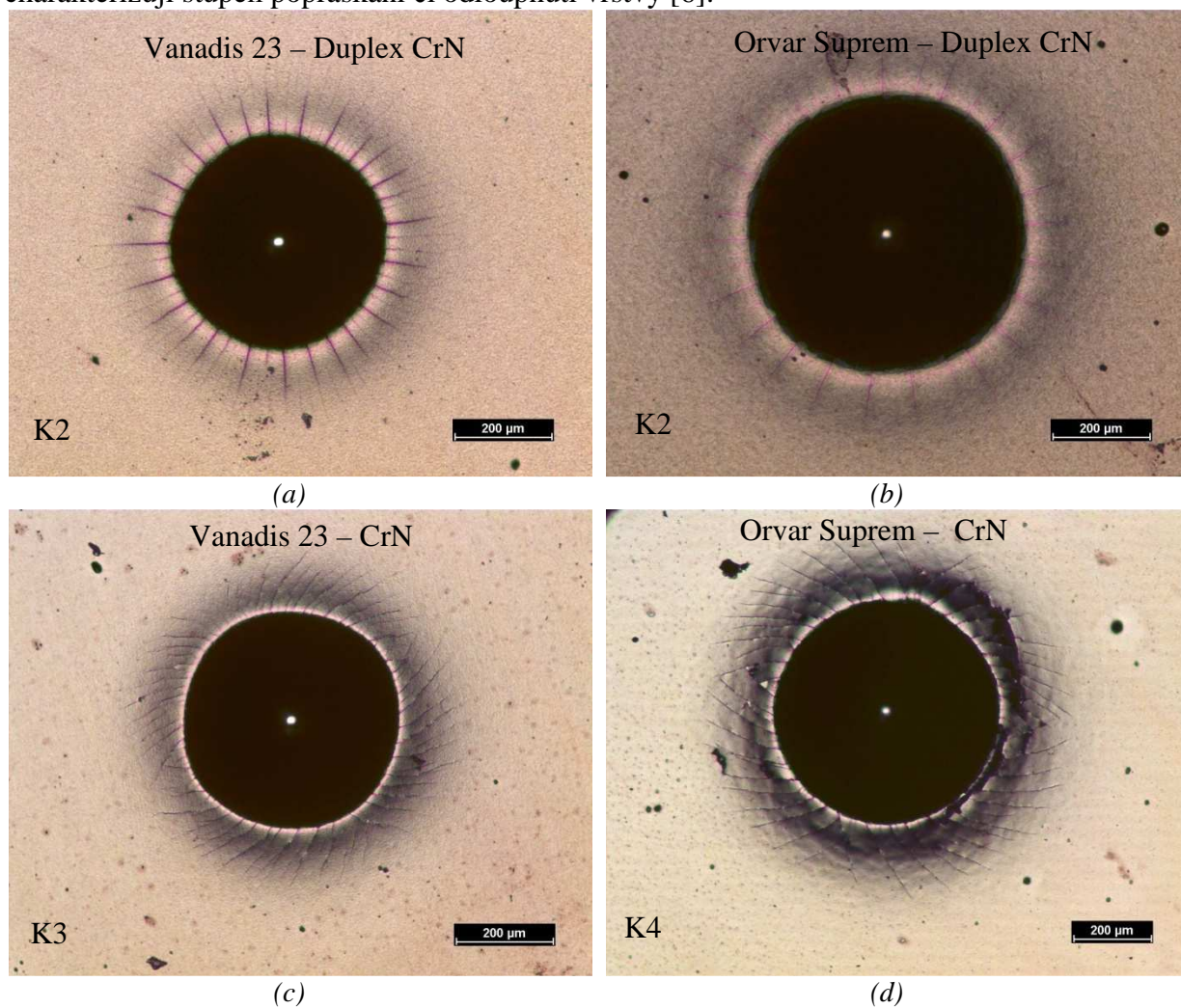
(b)



Obr.5 Záznam vrypové stopy Duplexního povlaku na oceli (a) Vanadis 23, (b) Orvar Suprem, a neduplexního CrN na oceli (c) Vanadis 23, (d) Orvar Suprem

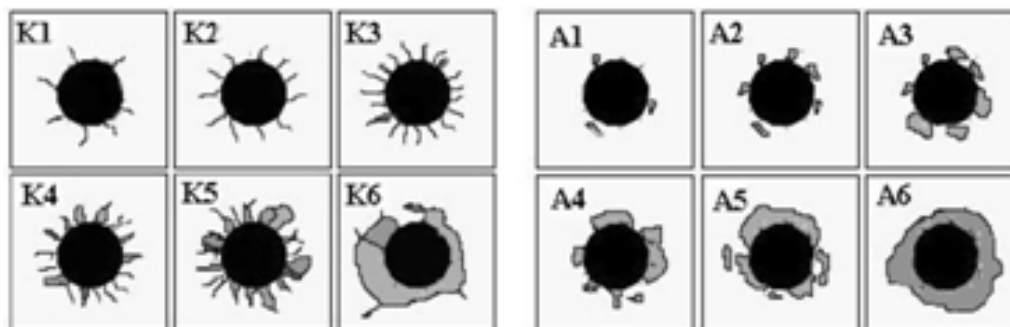
Vnikací zkouška („Mercedes test“) patří mezi velmi rozšířené metody sloužící ke zjišťování adheze povlaku na základě sledování rozvoje a charakteru trhlin.

Vyhodnocení vtisku (obr. 6) se provádí přiřazením adhezních čísel (obr. 7), který charakterizují stupeň popraskání či odloupenutí vrstvy [6].



Obr. 6 Záznam z vnikací zkoušky

Dané kategorie (K1 až K6 a A1 až A6) jsou seřazeny sestupně, kde K1 znamená nejlepší adhezi a K6 nejhorší adhezi. Při zkoušce přilnavosti vpichem, byl použit Rockwellův indentor se zatížením 1500 N.



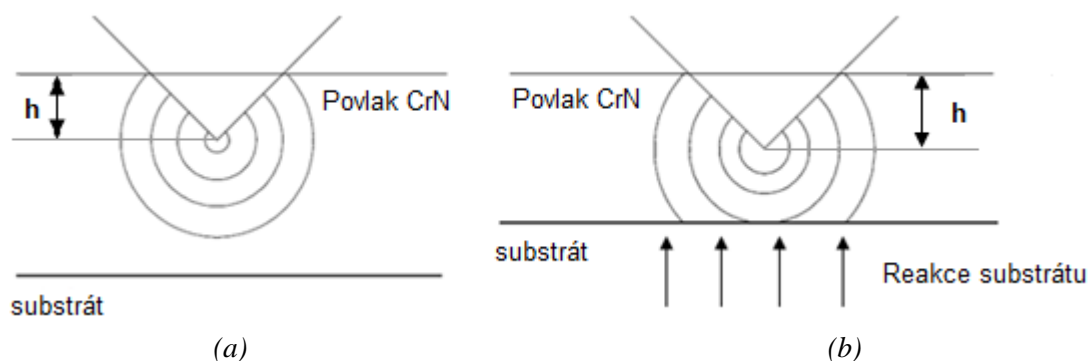
Obr. 7 Hodnocení porušení okolí vtisku Rockwellovým indentorem při zatížení 1500 N [6]

Výsledky Mercedes testu podtrhují výsledky z vrypové zkoušky. Na základě etalonu byl duplexní povlak zařazen do kategorie K2. Povlaku CrN byl (pro substrát Vanadis 23) přiřazen do kategorie K3 a pro substrát Orvar Suprem K4, kde již bylo patrná delaminace povlaku podél okraje v tisku. Výsledky testu také naznačují nižší tvrdosti povlaku CrN oproti duplexnímu povlaku.

8.2. Mikro a nanotvrdomost povlaku

Mikrotvrdomost je základní hodnota charakterizující mechanické vlastnosti povlaku a substrátu. Poskytuje informace o elastickém a plastickém chování materiálu. Mikrotvrdomost je odpor materiálu proti lokální plastické deformaci [5]. Pro měření mikrotvrdomosti byl použit neinstrumentovaný mikrotvrdoměr Leco s Vickersovým indentorem při zatížení 50g, pro každý vzorek byly provedeny 3 vpichy. Pro zvýšení přesnosti hodnot mikrotvrdomosti, byly úhlopříčky vtisku měřeny na světelném mikroskopu Neophot 32, s digitálním vyhodnocením obrazu. Při měření nanotvrdomosti bylo použito zařízení Nanotest (Micro materials UK), které umožňuje provádět měření při velmi nízkých zatížení. Přístroj provádí podrobné měření hloubky proniknutí hrotu v průběhu zatěžování a odlehčování. Z výsledných hodnot lze nejen určit hodnotu tvrdosti, ale i např. podíl elastické a plastické deformace během zatěžovacího cyklu [5]. Především je možno určit redukovaný modul pružnosti povlaku E_r , který zahrnuje elastické chování hrotu při indentaci.

Bylo provedeno 10 vpichů na každém vzorku při zatížení 200 mN a doby zatěžování 10 s/5 s/10 s (zatížení/výdrž na max. zatížení/odlehčení). Toto zatížení se již pohybuje na hranici mikrotvrdomosti). Při měření nanotvrdomosti je snahou měřit povlak v 10 % jeho tloušťky (viz Obr. 8). V našem případě došlo k překročení této 10ti% hranice. Tudíž lze předpokládat, že na reakci vůči zatížení hrotem se podílí jak povlak CrN, tak i substrát. Vyhodnocení výsledků proběhlo dle metody Olivera a Pharra.



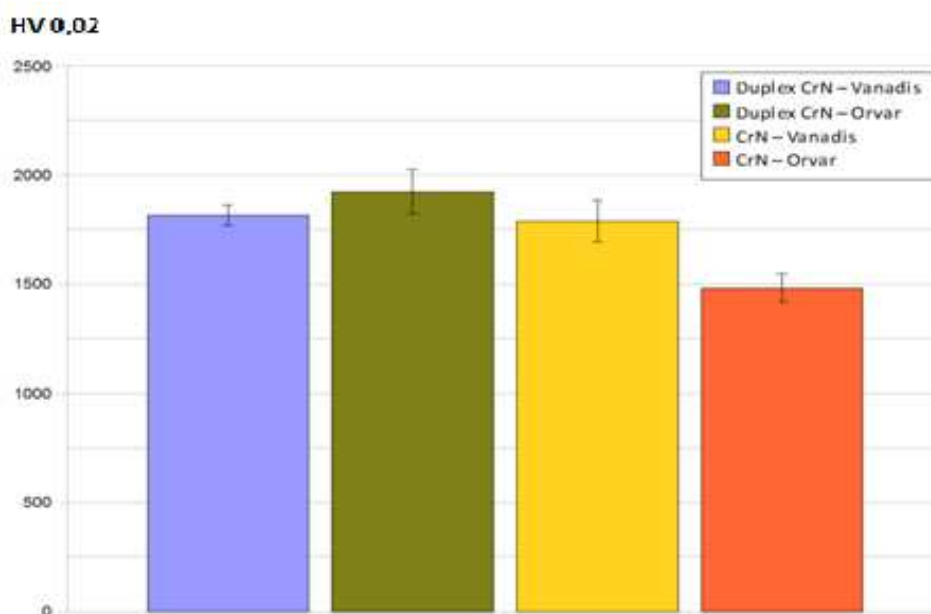
Obr. 8 Schéma měření nanotvrdomosti, (a) $h < 10\%$ tloušťky povlaku, (b) $h > 10\%$ tloušťky

Výsledky obou měření jsou uvedeny v tabulce 3 a srovnání nanotvrdosti povlaků na obr.9. Vyšší tvrdost je vždy patrná v případě duplexních povlaků. Výrazný je především rozdíl u oceli Orvar kde nárůst tvrdosti činí 42%. U oceli Vanadis 23 je tento rozdíl nižší, ovšem duplexní povlak stále vykazuje vyšší hodnoty. Z výsledku je také zřejmé že hodnoty mikrotvrdosti HV_{0,5} a nanotvrdosti H_{IT} vzájemně korespondují.

Tabulka 3 – Hodnoty mikro a nanotvrdosti

| | HV _{IT} | HV _{0,5} | E _r [GPa] | H ³ /E ² _r | H/E |
|----------------------|------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------------------|-------|
| Duplex CrN - Vanadis | 1815 | 2046 | 244 | 0,094 | 0,073 |
| Duplex CrN - Orvar | 1923 | 2029 | 258 | 0,100 | 0,073 |
| CrN- Vanadis | 1788 | 1936 | 250 | 0,086 | 0,070 |
| CrN - Orvar | 1485 | 1431 | 198 | 0,078 | 0,073 |

V poslední době je snahou vytvořit jeden nebo více parametrů, které by mohly smysluplně popsat kombinaci tvrdosti a houževnatosti povlaku. Jedním z nich je právě poměr H/E [7], kdy právě nejvyšší číslo poměru H/E ukazuje nejlepší odolnost materiálu vůči plastické deformaci a adhezi [7]. Není překvapením, že větší modul pružnosti udává zároveň i větší tvrdost. Jako referenční modul pružnosti oceli Vanadis a Orvar byla brána hodnota $E=220$ GPa.



Obr. 9 Porovnání nanotvrdostí CrN povlaků

Z výsledků měření rovněž vyplynulo, že byla překročena mezní hodnota hloubky měření (10% tloušťky povlaku) a na výsledné tvrdosti se tedy podílí i substrát. Je tedy nutné v dalších měřeních upravit parametry takovým způsobem, aby nebyla tato hranice překročena.

8.3 Tribologie

Při určování tribologických vlastností bylo použito zařízení Tribotest a metoda „Pin on Disk“. Principem tohoto měření je vlačování ocelové kuličky (100Cr6, průměr 6 mm) do rotujícího vzorku a vybroušení dráhy o poloměru 3 mm, otáčky 300 1/min, činí celková dráha 5 000 otáček. Tento test byl proveden na všech vzorcích.

Duplexní povlaky jednoznačně prokázaly menší objem opotřebení v porovnání s povlakem CrN (viz tab. 4). Ocel Vanadis 23 měla s duplexním povlakem objem opotřebení menší o 12%, Orvar Suprem o 24%.

Šířka stopy po kuličce d a koeficient tření μ byly u duplexního povlaku rovněž menší.

Tabulka 4 - Výsledné hodnoty hloubky otěru a objemu opotřebení v závislosti na zatížení

| Povlak | Substrát | d [μm] | V [mm^3] | w · 10 ⁻⁶ [mm^3/Nm] | μ |
|------------|----------|---------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-------|
| duplex CrN | Vanadis | 294,39 | 468,79 | 995 | 0,324 |
| | Orvar | 390,79 | 622,51 | 1322 | 0,334 |
| CrN | Vanadis | 351,2 | 559,36 | 1188 | 0,344 |
| | Orvar | 517,62 | 825,01 | 1752 | 0,351 |

9. Závěr

Cílem této práce bylo porovnání vlastností povlaku CrN a duplexního CrN a posouzení použití těchto povlaků na oceli Orvar Suprem (19554) a Vanadis 23 (19 830). Výsledky prokázaly výrazné zlepšení všech sledovaných vlastností u duplexních povlaků. Výrazně lepší u duplexních povlaků byla především adheze. Hodnota L_s (totální odhalení substrátu) byla pro duplexní povlaky o 20 N vyšší. Tyto výsledky potvrdil i následně provedený „Mercedes test“. Z výsledků dále vyplývá, že na výsledné hodnotě tvrdosti se podílí i základní materiál, především nitridovaná vrstva (duplexní povlaky). V případě povlaků bez nitridované vrstvy, je ve výsledcích patrný vliv rozdílné tvrdosti substrátu. Při posuzování duplexních povlaků na konkrétní oceli má nejlepší výsledné vlastnosti ledeburitická ocel Vanadis 23 v porovnání k subledeburitické oceli Orvar. V provedených měření vykazovala lepší adhezi a menší otěr, při srovnatelné tvrdosti povlaku.

Seznam symbolů

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------------------------|
| d | šířka stopy po kuličce | [mm] |
| E | Youngův modul pružnosti | [MPa] |
| Er | redukovaný modul pružnosti | [GPa] |
| L_{c1} | první porušení povlaku | [N] |
| L_{c2} | porušení povlaku většího rozsahu | [N] |
| L_{c3} | první adhezivní porušení povlaku - odhalení substrátu | [N] |
| L_s | totální odhalení substrátu | [N] |
| H | tvrdost | [HV] |
| μ | koeficient tření | [-] |
| V | objem stopy vybroušené kuličkou | [mm^3] |
| w | objem opotřebení v závislosti na zatížení | [mm^3/Nm] |

Seznam citované literatury

- [1] Jurčí, P. *Nástrojové oceli ledeburitického typu*. Praha : České vysoké učení technické v Praze , 2009. 360 s
- [2] Meissner, M. *Reaktivní magnetronové nanášení fotoaktivních vrstev TiO₂ a jejich vlastnosti* [online].Plzeň :Západočeská univerzita v Plzni,2007.70s
- [3] Spies, H., Höck, K., Larisch, B. *Duplex-Randschichten der Verfahrenskombination Nitrieren-Hartstoffbeschichten*. [online]1996.URL:<<http://www.nitrierpraxis.de/archiv/59-veroeffentlichungen-in-der-htm.html> >
- [4] Zindulka, P., *PVD technologie přípravy otěruvzdorných a kluzných vrstev*. Šumperk : SHM s.r.o, 2006. URL:< <http://www.shm-cz.cz/files/literatura/37.pdf> >
- [5] Sosnová, M., *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování*[online]. Plzeň : Západočeská Univerzita v Plzni, 2006. URL:< <http://ateam.zcu.cz>

/FRVS_zprava_dalsi_studium_sosnov

[5] Kadlec, J., *Metodika hodnocení chemického složení a vlastností povlaků FeFe₂O₄* [online]. Brno Univerzita Obrany v Brně, 2006. URL:<<https://appl.vojenskaskola.cz/Guarantee/Pages/PDF/ShowPublikaceDPB.aspx?ID=fd95f5f2-8b9c-411d-aef8-aa92b3aeeac9>>

[7] Deak, B., Smith, J., *Investigating the correlation between nano-impact fracture resistance* [Online] 2007. Elsevier [s.n] URL:< <http://infolib.hua.edu.vn/Fulltext/ChuyenDe2009/CD21/46.pdf> >