

Měření mechanických vlastností nástrojů s různými povlaky

Štěpán Broža

Bakalářská práce
2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Štěpán Broža**
Osobní číslo: **T16654**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření mechanických vlastností nástrojů s různými povlaky**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat literární studii na dané téma
2. Příprava zkušebních těles pro experiment
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených hodnot

Rozsah bakalářské práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. PTÁČEK, L a kol. **Nauka o materiálu I**. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2
2. PTÁČEK, L. a kol.: **Nauka o materiálu II**, Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
3. BALTÁ CALLEJA, F a Stojko Christov FAKIROV. **Microhardness of polymers**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, xiii, 237 s. ISBN 0-521-64218-3.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**

Ve Zlíně dne 18. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 15. 5. 2019

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Bakalářské práce se zabývá porovnáním mechanických vlastností povlaků nanesených metodou PVD a PA-CVD s porovnáním se základním materiálem (1.2343). V bakalářské práci jsou nejdříve popsány tvarové části formy, rozdělení materiálů, metody povlakování a způsoby měření tvrdostí. V další části jsou shrnuty mechanické vlastnosti zjištěné pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti DSI.

Klíčová slova: Povlakování, povlaky, PVD, PA-CVD, tvrdost, instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the comparison of the mechanical properties of coatings made by PVD and PA-CVD compared with the base material (1.2343). In the bachelor thesis there are as first described shaped parts of the mold, the division of materials, methods of coating and methods of measuring hardness. The next part is focused on summary of mechanical properties measured by depth sensing instrumentation DSI.

Keywords: Coats, coating, PVD, PA-CVD, hardness, depth sensing indentation DSI.

Děkuji mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Ovsíkovi Ph.D. za odborné vedení, čas, který mi věnoval, jak při zpracování teoretické části, tak i laboratorním měření a vyhodnocování naměřených výsledků a za dobré rady po celou dobu tvorby práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TVAROVÉ DUTINY FORMY	12
1.1 ZNAČENÍ TVAROVÝCH DUTIN	12
1.2 ÚPRAVA POVRCHU TVAROVÝCH DUTIN	13
2 ROZDĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ	14
2.1 ŽELEZO A SLITINY ŽELEZA S UHLÍKEM.....	14
2.1.1 Čisté železo	15
2.1.2 Soustava Fe-C a Fe-Fe ₃ C	15
2.2 OCELI.....	16
2.2.1 Rozdělení ocelí podle chemického složení	17
2.2.2 Nelegované oceli obvyklých jakostí	18
2.2.3 Nelegované oceli jakostní a ušlechtilé	18
2.2.4 Oceli pro výztuž do betonu	19
2.2.5 Oceli pro kolejnice	20
2.2.6 Oceli automatové	20
2.2.7 Oceli k cementování.....	20
2.2.8 Oceli k zušlechťování.....	20
2.2.9 Oceli k nitridaci.....	20
2.2.10 Oceli pružinové	21
2.2.11 Nerezavějící oceli	21
2.2.12 Žáruvzdorné oceli.....	22
2.2.13 Žárupevné oceli	22
2.2.14 Nástrojové oceli	22
3 POVLAKOVÁNÍ	25
3.1 FYZIKÁLNÍ DEPOZICE PAR (PVD)	26
3.2 CHEMICKÁ DEPOZICE PAR (CVD)	29
3.3 CHEMICKÁ DEPOZICE POMOCÍ PLAZMATU PACVD.....	30
4 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	32
4.1 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	32
4.1.1 Vrypová zkouška.....	32
4.1.2 Odrazová zkouška	32
4.1.3 Vnikací zkouška	33
4.2 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI DSI	35
4.2.1 Princip	35
4.2.2 Postup.....	36
4.2.3 Tvrdost podle Martense HM	37
4.2.4 Vtisková tvrdost H _{IT}	37
4.2.5 Vtiskový modul E _{IT}	38
4.2.6 Vtiskové tečení C _{IT}	38
4.2.7 Vtisková relaxace R _{IT}	39
4.2.8 Plastické a elastické části práce vnikacího procesu	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	42

6	PŘÍSTROJE A VZORKY PRO EXPERIMENT.....	43
6.1	PŘÍSTROJE	43
6.1.1	Nano-indentanční test.....	44
6.1.2	Ultra-nano-indentanční test.....	45
6.2	VZORKY	45
6.2.1	Základní materiál	46
6.2.2	TiAlN	46
6.2.3	CrN.....	46
6.2.4	TiN	47
6.2.5	DLC Comp	47
6.2.6	TiCN.....	48
6.2.7	TiB ₂	48
7	VÝSLEDKY EXPERIMENTU.....	50
7.1	VICKERSOVA TVRDOST H _{VIT}	50
7.1.1	Nano-indentanční test.....	50
7.1.2	Ultra-nano-indentanční test.....	51
7.2	VTISKOVÁ TVRDOST H _{IT}	52
7.2.1	Nano-indentanční test.....	52
7.2.2	Ultra-nano-indentanční test.....	53
7.3	VTISKOVÝ MODUL E _{IT}	54
7.3.1	Nano-indentanční test.....	54
7.3.2	Ultra-nano-indentanční test.....	55
7.4	HLOUBKA VTISKU H _{MAX}	56
7.4.1	Nano-indentanční test.....	56
7.4.2	Ultra-nano-indentanční test.....	57
7.5	DEFORMAČNÍ ELASTICKÁ PRÁCE W _{ELAST}	58
7.5.1	Nano-indentanční test.....	58
7.5.2	Ultra-nano-indentanční test.....	59
7.6	DEFORMAČNÍ PLASTICKÁ PRÁCE W _{PLAST}	60
7.6.1	Nano-indentanční test.....	60
7.6.2	Ultra-nano-indentanční test.....	61
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	63
	ZÁVĚR	70
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	71
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	76
	SEZNAM TABULEK.....	78
	SEZNAM PŘÍLOH.....	79

ÚVOD

Zpracovávání plastových materiálů je dnes čím dál více rozšířené. Jednou z metod výroby je vstřikování plastů, kde je nejdražší položka zkonstruování nové formy, případné opravy a jejich údržba. Jedna z nejvíce opotřebovávaných částí formy je tvarová dutina, u které dochází k přímému styku s plastem, a to i za velkých tlaků. Při porušení těchto tvarových částí forma vyrábí nepřesné výrobky a je nutno ji opravovat. Z těchto důvodů se klade důraz na zvýšení životnosti forem. K prodloužení životnosti se používají povlaky, které mají mnohem lepší mechanické vlastnosti než nástrojová ocel.

Bakalářská práce se zabývá porovnáním naměřených mechanických vlastností povlaků nanášených metodami PVD a PA-CVD se základním materiálem. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části jsou popsány tvarové části formy, rozdělení materiálů, především ocelí, metody povlakování (PVD, CVD, PA-CVD) a způsoby měření tvrdostí, zejména instrumentovanou zkoušku tvrdosti DSI.

V praktické části jsou uvedeny jednotlivé vzorky a měřicí přístroj, na kterém jsou provedeny instrumentované zkoušky tvrdosti DSI, a to pro nano-indentální testy o zatížení 250 mN a ultra-nano-indentální testy při zatížení 50 mN. Naměřené výsledky jsou porovnány jak pro dané povlaky mezi sebou, tak i se základním materiálem. Na závěr jsou získané výsledky vyhodnoceny a porovnány s parametry povlaků od výrobce. Na tomto základě je vyhodnocena vhodnější metoda měření na zjišťování mechanických vlastností povlaků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TVAROVÉ DUTINY FORMY

Tvarovou dutinu formy tvoří tvárníky, tvárnice a posuvná jádra po uzavření formy. Tvarová dutina udává tvar a rozměr výsledného vstříkovaného výrobku. Jejich správné navržení je velmi důležitou fází konstrukčního návrhu. Špatně navržené rozměry se projeví v porušení požadovaných rozměrů výstřiku. Pokud nejde o rozměr s předepsanou tolerancí, je možné tuto nepřesnost odstranit upravením technologických parametrů, někdy ale pouze zbývá drahá oprava rozměrů formy.

Povrch i rozměry výrobku závisí na přesnosti tvarové dutiny a kvalitě její plochy, která se skládá z tvárníku, tvárnice, tvarových vložek a jader. Přesnost tvarových dutin vstříkovací formy je ovlivňována:

- smrštěním plastu,
- výrobní tolerancí,
- opotřebením dutin formy.

Největší dopad na špatné navržení rozměrů má hlavně nepřesný odhad smrštění určitého rozměru v průběhu tváření. Odpovídající velikost smrštění je někdy obtížné určit, protože vypočtené smrštění pro komplikovanější výrobky není stejné s hodnotou uváděnou v tabulkách od výrobců plastů, takže konstruktér se musí často spoléhat na své zkušenosti. Velikost smrštění je ovlivňována:

- tvarem výstřiku,
- konstrukcí formy,
- technologií vstříkování. [1]

1.1 Značení tvarových dutin

U vícenásobných forem se tvarové dutiny značí písmeny, čísla nebo i kombinací, která může být doplněny označením čísla dílu. Toto pomáhá k jednoduché orientaci výstřiku k příslušným tvářecím dutinám. Ovšem pokud by značení nebylo vhodné, třeba ze vzhledových nebo funkčních důvodů, nemusí se používat.

Znaky se gravírují do hloubky 0,3 mm. Měly by být ve zrcadlovém pohledu, a proto je dobré použít písmena a římské číslice, které se zachovávají stejné i při zrcadlovém pohledu. [2]

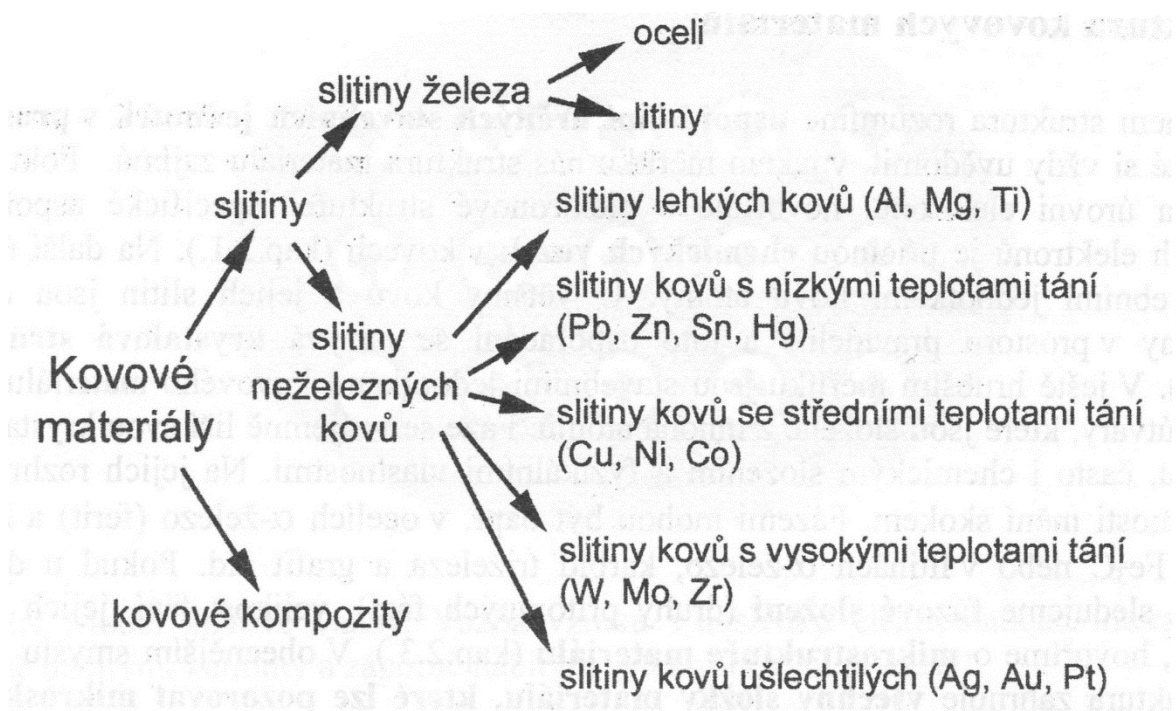
1.2 Úprava povrchu tvarových dutin

Tvarová dutina je určena jak tvarem s určitými rozměry, tak i jakostí povrchu. Povrch dutiny se vyrábí dle požadavku na povrch výrobku. Možné výroby povrchu:

- Matný – technologicky nejjednodušší. Normálně to je výchozí plocha po elektroerzivním obrábění, avšak lze vyrobit i dalšími technologiemi (např. otryskávání, ruční úprava, aj.). Většinou se dle i požadované jakosti určí způsob dokončení.
- Lesklý – nákladná a náročná operace. Forma se vyrábí z kvalitní oceli, a i technologie vstřikování je na velké úrovni. Pomocí různých mechanických pomůcek, nebo elektrických jednotek s přímočarým, rotačním i planetovým pohybem prostřednictvím brusného tělíska či pasty, se leští tvarová dutina. Stupeň lesku se definuje např. vysoký lesk, zrcadlový lesk, aj.
- Dezénovaný – čím dál více se používá. Nejenže je esteticky významný, ale dokáže i zakrýt drobné povrchové vady na výrobku. Dezénovat jdou všechny plochy, ale musí být dostupné. Podle technologie výroby dezénu se může vybrat vzor. [1]

2 ROZDĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

Kovové materiály se rozlišují podle kovu, který ve slitině obsahuje hlavní podíl. K těmto kovům se přidávají prvky, tyto prvky nazýváme přídavné (legující). Ve slitinách se také mohou vyskytovat prvky, které nebyly odstraněny při výrobě nebo rafinaci základního kovu. Těmto prvkům se říká nečistoty. Některé tyto prvky zhoršují vlastnosti technických kovů a jiné jsou prospěšné nebo aspoň nezávadné. Na Obr. 1. lze vidět schematické rozdělení kovových materiálů. Toto rozdělení ukazuje nejvýznamnější postavení slitin železa. Pro slitiny neželezných kovů jsou významné vlastnosti, které mohou určovat jejich hlavní použití. [3, 4]



Obr. 1. Rozdělení kovových materiálů [4]

2.1 Železo a slitiny železa s uhlíkem

Slitiny železa jsou nejvíce používány jako konstrukční materiál ve strojírenství. V posledních letech zvyšují své využití vůči jiným materiálům. Další nejrozšířenější kov je hliník a jeho slitiny. Železo a slitiny železa jsou nejpříjemnější z ekologického hlediska, protože železo je snadno recyklovatelné a zároveň je nejúspornější na výrobu oceli. Na jednu tunu oceli se při výrobě spotřebuje 19 GJ, a pro porovnání na jednu tunu hliníku 160 GJ. [3]

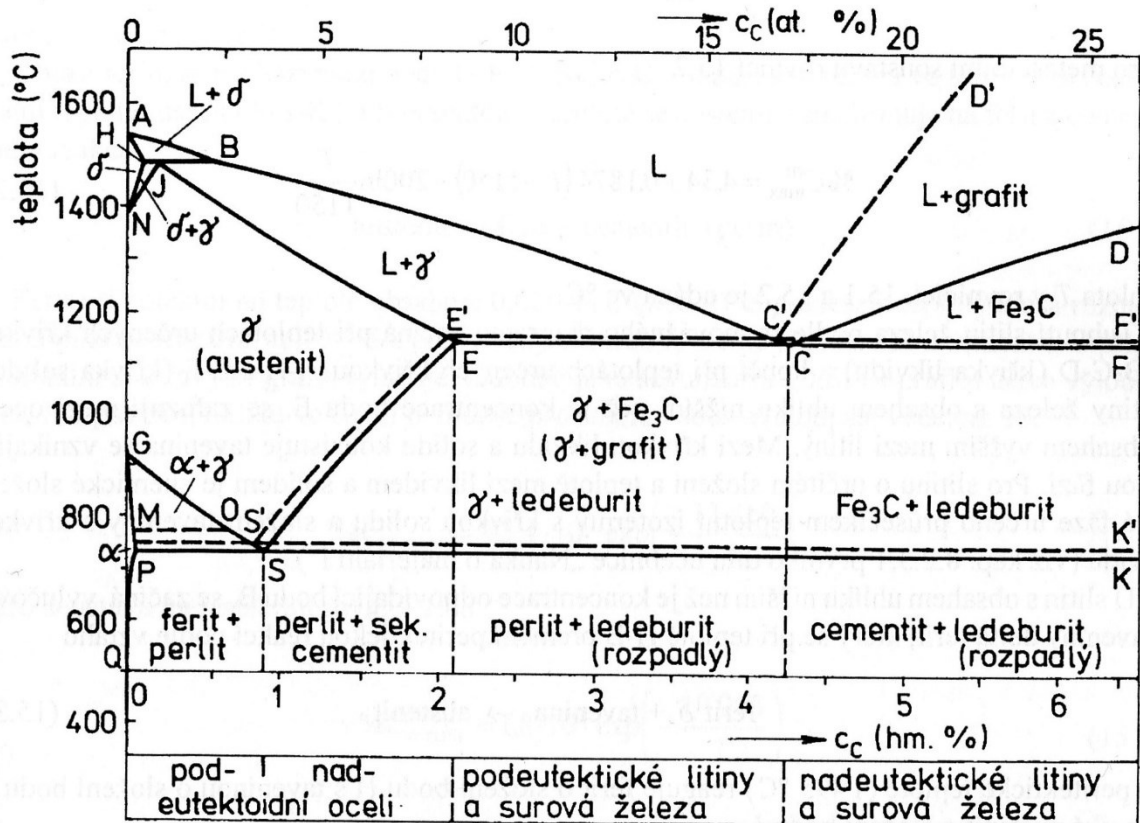
2.1.1 Čisté železo

Čisté železo má poměrně nízkou pevnost a je měkké i tvárné. V závislosti na teplotě se železo vyskytuje ve dvou krystalografických modifikacích:

- Modifikace α – s krystalickou mřížkou kubickou prostorově středěnou je stabilní do teploty 912 °C. Modifikace je feromagnetická do teploty 760 °C (Curieho teplota), nad touto teplotou ztrácí magnetické vlastnosti a někdy se označuje jako modifikace β .
- Modifikace γ – s krystalickou mřížkou kubickou plošně středěnou je stabilní v rozmezí 912 až 1392 °C.
- Modifikace δ – s krystalickou mřížkou kubickou prostorově středěnou je stabilní v rozmezí 1392 až 1539 °C (teplota tání). [3, 4]

2.1.2 Soustava Fe-C a Fe-Fe₃C

Výroba železa probíhá redukcí železné rudy uhlíkem. Ve vyrobeném materiálu je tedy vždy obsažen uhlík, který zpravidla nejvýznamněji ovlivňuje vlastnosti slitin železa. Uhlík se může vyskytovat ve slitině železa s uhlíkem v tuhém roztoku s omezenou rozpustností uhlíku. Uhlík se v tuhém roztoku vylučuje jako samostatná fáze v případě překročení rozpustnosti uhlíku. Při nízkých obsazích tvoří uhlík intersticiální sloučeninu Fe₃C. Sloučenina Fe₃C není stabilní a může se rozkládat na grafit a železo. Chování soustavy železo-uhlík je popsáno dvěma stavovými diagramy, které se liší v tom, zdali je uhlík obsažen jako karbid železa (Fe₃C) nebo jako grafit (C). Významnější se nazývá metastabilní diagram Fe-Fe₃C a ten druhý stabilní diagram Fe-C. Oba diagramy jsou uvedeny na obr. 2., podstatné teploty a koncentrace jsou v diagramu označeny velkými písmeny. Pro stabilní soustavu mají písmena apostrof, např. S'. [3, 4]



Obr. 2. Rovnovázný diagram železo-uhlík [3]

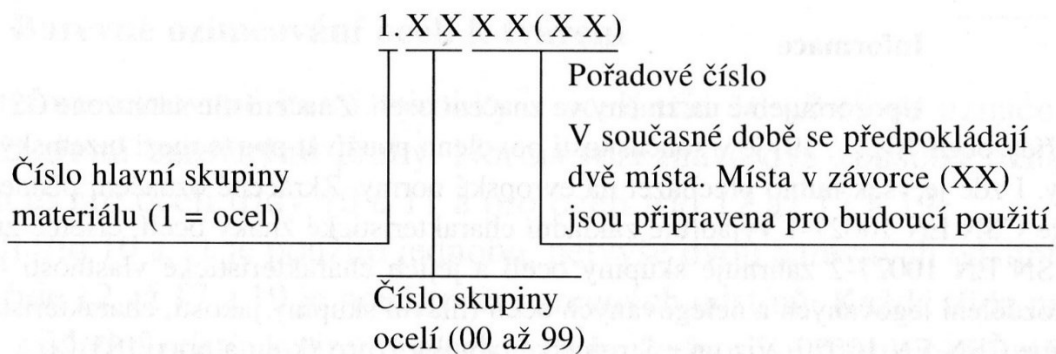
V diagramu se vyskytují tyto fáze:

- ferit – intersticiální tuhý roztok uhlíku v Fe α ,
- austenit – intersticiální tuhý roztok v Fe γ ,
- δ (delta ferit) – intersticiální tuhý roztok uhlíku v Fe δ ,
- cementit – intersticiální chemická sloučenina železa a uhlíku Fe_3C ,
- grafit – uhlík krystalizující v šesterečné soustavě,
- ledeburit – eutektikum v metastabilní soustavě (při eutektické teplotě se skládá z austenitu a cementitu),
- perlit – eutektoid v metastabilní soustavě (skládá se z feritu a cementitu),
 - morfologicky se rozlišuje perlit lamelární (lamely feritu a cementitu) a perlit zrnitý (ferit s globulárním cementitem). [3]

2.2 Oceli

Oceli mají rozdělení dle technických norem. V České republice se normy označují ČSN, ale v rámci evropské integrace byla dohoda, že se normy sjednotí. Proto se dnes používají normy

evropské (EN) a české. České normy, které splňují evropské předpisy se dnes značí ČSN EN a číslo příslušné evropské normy. Oceli jsou materiály podle normy ČSN EN 10020, které všeobecně obsahují méně než 2 % uhlíku, a i jiné prvky, avšak hmotnostní podíl železa je vždy větší než jakéhokoli jiného prvku. Na obr. 3 je zobrazeno značení ocelí podle normy ČSN EN 10027-2. [3, 5]



Obr. 3. Značení ocelí [5]

2.2.1 Rozdělení ocelí podle chemického složení

Oceli se dělí dle chemického složení na:

Oceli nelegované – obsahy jednotlivých prvků nedosahují mezních obsahů tab. 1. Nelegované oceli jsou ve třech hlavních skupinách jakosti podle normy ČSN EN 10020:

Nelegované oceli obvyklých jakostí jsou druhy, kde z hlediska jakosti nevyžadují při výrobě speciální opatření, ale musí dodržet dané podmínky:

- nepoužívat pro tepelné zpracování,
- musí splňovat tabulkové hodnoty pro nezpracovaný nebo normalizační žíhaný stav,
- nemají určeny další kvalitativní charakteristiky,
- až na Si a Mn nejsou určeny obsahy legovacích prvků.

Nelegované jakostní oceli pro tyto oceli není žádná předepsána rovnoměrná reakce na tepelné zpracování, ale jsou na ně kladeny vyšší nároky než na oceli obvyklých jakostí, proto se jim při výrobě musí dávat větší pozornost.

Nelegované ušlechtilé oceli na tyto oceli je kladen vyšší stupeň čistoty než na oceli jakostní, protože jsou určeny pro zušlechťování nebo povrchové kalení. Vyznačují rovnoměrnější reakci na tepelné zpracování a dané chemické složení. Zvláštními podmínkami pro výrobu a testy je dosaženo požadovaných vlastností. [3, 5]

Oceli legované obsahy jednotlivých prvků, minimálně jednoho, dosahují nebo překračují mezní obsahy podle tab. 1. Legované oceli dělíme podle normy ČSN EN 10020 na:

Legované jakostní oceli mají obdobné použití jako nelegované jakostní oceli, ale obsahují legovací prvky, pro splnění zvláštních podmínek použití.

Legované ušlechtilé oceli přesným stanovením chemického složení, speciálními podmínkami výroby a testů, je dosaženo požadovaných zpracovatelských a užitných vlastností. [3, 5]

Tab. 1. Mezní obsahy legovací prvků [5]

Prvek		Mezní obsah (%)	Prvek		Mezní obsah (%)
Al	hliník	0,10	Ni	nikl	0,30
B	bor	0,0008	Pb	olovo	0,40
Bi	bismut	0,10	Se	selen	0,10
Co	kobalt	0,10	Si	křemík	0,50
Cr	chróm	0,30	Te	telur	0,10
Cu	měď	0,40	Ti	titan	0,05
La	lanthanidy	0,50	V	vanad	0,10
Mn	mangan	1,65	W	wolfram	0,10
Mo	molybden	0,08	Zr	zirkonium	0,05
Nb	niob	0,06	ostatní (mimo C, P, S, N) vždy		0,05

2.2.2 Nelegované oceli obvyklých jakostí

Oceli se používají k výrobě plochých výrobků, které jsou určeny pro ohýbání za studena. Jde hlavně o plechy (nepatří sem plechy pro hluboký tah) a pásy z měkkých ocelí. Je možné použití i jako strojní součásti s malými nároky na mechanické vlastnosti. Nezaručuje se houževnatost a svařitelnost materiálu. [3]

2.2.3 Nelegované oceli jakostní a ušlechtilé

Podle normy ČSN EN 10020 se tyto oceli rozdělují dle jejich využití. Zároveň jsou zde podle této normy do jednotlivých skupin uvedeny i nízkolegované oceli.

Hlubokotažné oceli válcované za studena

Tyto oceli se řídí podle normy ČSN EN 10130. Nejvíce se poskytují jako pásy nebo plechy. Po žíhání se výrobky slabě převálcují za studena, čímž se předejde vzniku deformačních čar. Vznik deformačních čar je schopen se obnovit při pozdějším zpracování, aby se tomu předešlo, je doporučeno zpracovat výrobky co nejrychleji. Oceli jsou dobré pro svařování běžnými postupy.

Pro ocelové konstrukce

Nelegované jakostní oceli podle ČSN EN 10025+A1 jsou vhodné na výrobu plochých a dlouhých výrobků. Dle normy jsou pro tyto oceli předepsané minimální hodnoty R_e , R_m , A a KV . Jsou vhodné pro tváření za studena (ohýbání, profilování a tažení), eventuelně i za tepla. Na svařování se hodí, pouze když splňují jakostní stupně JR, J0, J2 a K2. S klesajícím ekvivalentem uhlíku, a od stupně JR ke K2, se zvyšuje svařitelnost.

Svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli podle ČSN EN 10113–1 až 3 jsou vhodné pro vysoce namáhané svařované konstrukce (mosty, nádrže na vodu, zásobníky, aj.). Mikrolegují se niobem, vanadem a titanem. Obsah prvků je určen podle obsahu uhlíku a dusíku, a také podle požadovaných mechanických vlastností. Dobrá svařitelnost se získává menšími obsahy uhlíku, chromu, molybdenu a mědi. Pro vyšší pevnost se tepelně nebo termomechanicky zpracovávají.

Konstrukční oceli odolné vůči atmosférické korozi podle ČSN EN 10155, by měli odolávat korozi bez povrchové úpravy za vhodných atmosférických podmínek. Toho se dosahuje přidáním přesného množství legujících prvků. Tyto prvky s povětrnostními podmínkami vytváří na povrchu ochranná vrstva oxidů.

Oceli pro tlakové nádoby

Podle normy ČSN EN 10028 jsou oceli vhodné na výrobu plochých a dlouhých výrobků pro konstrukci tlakových nádob. Patří sem i oceli pro svařované plynové láhve. Předepsané zkoušky jsou na mechanické vlastnosti, vnitřní jakosti a chemické složení. Rozdělují se na:

- svařitelné nelegované a legované oceli pro vyšší teploty dle ČSN EN 10028–2,
- normalizačně žíhané jemnozrnné konstrukční oceli vhodně ke svařování dle ČSN EN 10028–3,
- oceli legované niklem se zaručenými vlastnostmi při nízkých teplotách dle ČSN EN 10028–4. [3]

2.2.4 Oceli pro výztuž do betonu

Tyto oceli se dodávají podle ČSN EN 10080, kde jsou normovány dvě oceli se stejným chemickým složením, a to B500A a B500B. Jejich mez únavy je dána 180 MPa. Používají se ve formě drátů, lan nebo tyčí. U ocelí jsou běžně zaručeny od výrobce pevnostní vlastnosti. [3, 4]

2.2.5 Oceli pro kolejnice

Používají se perlitické oceli nelegované nebo legované s nízkými obsahy manganu nebo chromu. Většinou jde o oceli s obsahem uhlíku okolo eutektoidní koncentrace (0,5 – 0,8 %) a je stanoven maximální obsah vodíku. U ocelí je požadována tvrdost, pevnost a odolnost proti oděru. [3, 4]

2.2.6 Oceli automatové

Obsahují více než 0,1 % síry a eventuelně fosforu podle normy ČSN EN 10087, tímto se zlepšuje obrobitelnost. Kvůli vyššímu obsahu síry a fosforu se nedoporučuje svařování. Automatové oceli se dělí na:

- oceli, které jsou dodávány v tepelně nezpracovaném stavu,
- oceli stanovené pro cementování,
- oceli k zušlechťování. [3]

2.2.7 Oceli k cementování

Obsahují poměrně málo uhlíku podle normy ČSN EN 10084, a proto jsou určeny k povrchovému sycení uhlíkem. Pomocí obohacování povrchové vrstvy uhlíkem před kalením, získáváme velké tvrdosti povrchu. Z toho plyne, že po následném kalení se pro relativně velké pevnosti v tahu uchovává houževnatost jádra. [3, 4, 5]

2.2.8 Oceli k zušlechťování

Oceli podle normy ČSN EN 10083 jsou určeny pro tepelné zpracování kalením a vysokoteplotním popouštěním. Jsou určeny k výrobě dynamicky namáhaných strojních součástí. Dodávají se tepelně nezpracované. Pro lepší obrobitelnost jsou určeny ocele s přesným rozmezím koncentrace síry. [3, 4]

2.2.9 Oceli k nitridaci

Oceli podle ČSN EN 10085 jsou vhodné pro nitridaci ocelí, které mají kontrolovaný obsah dvou a více nitrodotvorných prvků (hliník, chrom, vanad) a obvykle jsou legovány molybdenem. Dodávají se v tepelně nezpracovaném stavu po válcování za tepla. Sycení dusíkem se provádí pro výrazné vytvrzení povrchu. [3, 4]

2.2.10 Oceli pružinové

Oceli podle ČSN EN 10132-4 jsou dodávány vyžíhané naměkko, válcované za studena nebo zušlechťené. Největší nároky u pružinových ocelí jsou vysoký modul pružnosti a únavová životnost. Při malém namáhání se používají nelegované oceli a při vyšším namáhání legované křemíkem a chromem (eventuelně chromem a vanadem nebo niklem). [3, 4]

2.2.11 Nerezavějící oceli

Podle ČSN EN 10088 je primární prvek vysokolegovaných nerezavějících ocelí chrom. Schopnost pasivace poskytuje ocelím odolnost proti elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Pro pasivaci musí být obsah nad 11,5 % chromu v tuhém roztoku. Tento obsah závisí nejen na obsahu chromu v oceli, ale i na obsahu uhlíku, který snižuje obsah chromu tvorbou karbidů. Typické pro tyto oceli je nízký obsah uhlíku, většinou pod 0,08 %. Podle normy rozdělujeme oceli na čtyři skupiny:

- Feritické oceli – obsahují až 30 % chromu a do 0,08 % uhlíku. Jsou nekalitelné, je možno tedy jejich mechanické vlastnosti zlepšovat tvářením za studena a rekrystalizací.
- Martenzitické oceli a vytvrditelné oceli – obsahují kolem 12–18 % chromu a do 1 % uhlíku. Čím větší obsah uhlíku, tím větší obsah chromu, aby se dosáhlo dostatečné korozní odolnosti. Jsou samokalitelné, ale nejčastěji se kalí do oleje s následným popouštěním.
- Austenitické oceli – obsahují 18–20 % chromu a 8–11 % niklu. Pro další vylepšení odolnosti vůči korozi se získává přísadou molybdenu a nízkým obsahem uhlíku do 0,03 %. Je to nejdůležitější skupina nerezavějících ocelí. Tato skupina ocelí z nerezavějících ocelí je jediná nemagnetická. Jsou nekalitelné, ale pro dosažení homogenní struktury je doporučeno žíhání při vysokých teplotách kolem 1 100 °C.
- Austeniticko-feritické oceli (duplexní oceli) – obsahují 20–26 % chromu, 4–7 % niklu a také jsou legovány molybdenem, eventuelně dusíkem. Uhlík je obsažen ve velmi malém obsahu až setiny %. S porovnáním s austenitickými dosahují větší pevnosti, ale trochu horší tvárnosti a svařitelnosti. [3, 4]

2.2.12 Žáruvzdorné oceli

Oceli podle ČSN EN 10095 mají velkou odolnost proti oxidaci, korozi a dlouhodobě trvalé vlastnosti v horkých plynech. Odolnost za velkých teplot získávají legováním chromem, křemíkem, hliníkem a niklem. Až na výjimky obsahují pod 0,12 % a dají se svařovat. Složení mají podobné nerezavějícím ocelím a dělí se na feritické, austenitické a austeniticko-feritické oceli. [3]

2.2.13 Žárupevné oceli

Oceli odolávají tečení při velkých teplotách. Jde o oceli převážně legované karbidotvornými prvky např. chrom, nikl, molybden, aj. Pomocí těchto prvků je dosaženo mechanické stability za velkých teplot. Některé se strukturou podobají nerezavějícím ocelím, avšak se zvětšenými obsahy prvků vytvářejících stabilní karbidy. [4]

2.2.14 Nástrojové oceli

Především skupiny ocelí jsou materiály konstrukční, ale nástrojové oceli jsou určeny k výrobě nástrojů pro zpracování ostatních materiálů (obrábění a tváření). Nástrojové oceli jsou velmi různorodá skupina podle chemického složení i vlastností. Podle záměru použití se dělí na:

- nelegované oceli,
- legované oceli pro práci za studena,
- legované oceli pro práci za tepla,
- rychlořezné oceli. [3, 4]

Při práci za studena se používají legované a nelegované oceli, které mají provozní teplotu povrchu nástroje okolo 20 °C. Při práci za tepla se používají legované oceli, které mají provozní teplotu povrchu nástroje nad 200 °C. Rychlořezné oceli podle svého chemického složení dosahují vysoké teploty popouštění a vysoké tvrdosti za tepla. Používají se k výrobě nástrojů pro třískové obrábění a tváření. U většiny nástrojů se vyžadují následující vlastnosti:

- Tvrdost – závisí zejména na obsahu uhlíku a na tepelném zpracování. Kalením a popouštěním za studena získáváme vysokou tvrdost.
- Plastické vlastnosti a houževnatost – záleží hlavně na matici a množství, morfologii a velikosti karbidů a na přítomnosti vměstků, eventuálně výrobních vad. U ocelí s nízkou

kou pevností do 1 800 MPa se určuje tažnost pomocí statické zkoušky v tahu a houževnatost zkouškou rázem v ohybu. U oceli s pevností nad 1 800 MPa lze určit plastické vlastnosti jedině statickou zkouškou v ohybu.

- Odolnost proti popouštění – je hlavně významná pro řezné nástroje a nástroje pracující za vyšších teplot. Odolnost se hodnotí podle snížení tvrdosti při dlouhodobém vystavení vyšším teplotám. Zesílení odolnosti se dosahuje legováním karbidotvornými prvky a přísadou kobaltu.
- Řezivost – je důležitá hlavně pro řezné nástroje. Na řezivost velmi působí množství složením a rozložením karbidů ve struktuře.
- Tepelná únava – ukáže se po jisté době u nástrojů, po kterou je vystaveny změnám teploty. Projevuje se vznikem trhlinek na pracovním povrchu. Odolnost vůči tepelné únavě záleží především na mezi kluzu a houževnosti. Nejvíce odolávají oceli s vysokým obsahem chrómu a s přísadou molybdenu, tyto oceli zachovávají při vysoké pevnosti i vysokou houževnatost.
- Prokalitelnost – znamená to schopnost získat požadovanou tvrdost po kalení do určité hloubky. U nelegovaných ocelí je nízká prokalitelnost. Prokalitelnost se zvyšuje skoro se všemi legujícími prvky.
- Rozměrová stálost – je vyžadována u měřidel a tvarových nástrojů pro přesné obrábění. Pomocí změny struktury dosáhneme rozměrové změny, ke kterým dojde při změně teplot.

Nelegované nástrojové oceli – rozlišují se hlavně podle obsahu uhlíku. Nevýhodou nelegovaných nástrojových ocelí je malá prokalitelnost. Využití nachází pro výrobu ručního nářadí a nástrojů používaných v zemědělství. Obsahují 0,40 až 1,10 % uhlíku, křemík do 0,40 % a nízký obsah molybdenu. Dosahují tvrdosti 52 až 60 HRC. Z nelegovaných nástrojových ocelí se mohou vyrábět i části nástrojů na nesení legovaných nástrojových ocelí.

Legované nástrojové oceli pro práci za studena – mají obdobné využití jako nelegované oceli, ale dosahují vyšší prokalitelnosti a tvrdosti 60 až 64 HRC. Hlavní legovací prvky jsou chróm, wolfram, molybden a vanad. Se zvyšujícím množstvím legovacích prvků roste prokalitelnost, tvrdost a odolnost nástrojů vůči opotřebení. Pro oceli s nízkým obsahem uhlíku, lze zvýšit houževnatost přidáním niklu. Jsou nejčastěji kaleny do oleje. Využití nachází pro dynamicky namáhané nástroje pro tváření za studena.

Legované nástrojové oceli pro práci za tepla – je vyžadována vysoká odolnost vůči deformaci, erozi, otěruvzdornost a odolnost vůči tepelné únavě. Oceli jsou obvykle složeny z 0,28 až 0,60 % uhlíku, do 5,50 % chromu, do 3 % molybdenu a do 1,1 % vanadu. Využití nachází na zápustky, trny a k výrobě vstřikovacích forem. [3]

Na tvarovou vložku vstřikovací formy lze použít ocel 1.2343. Tato ocel má vysokou houževnatost, odolnost proti tepelnému zatěžování, dobrou tepelnou vodivost a velkou pevnost za tepla. Je určena ke kalení v oleji, ve vodě i na vzduchu. Má velmi dobrou prokalitelnost, odolnost proti popouštění a malou citlivost proti prudkým změnám teplot. Kalením lze získat tvrdost 50–56 HRC. Ocel je vhodná pro tepelné zpracování i pro nástroje chlazené vodou. [6, 7]

Tab. 2. Složení oceli 1.2343 [7]

	C	Mn	Si	Pmax.	Smax.	Cr	Mo	V
%	0,33 - 0,41	0,25 - 0,5	0,8 - 1,2	0,03	0,02	4,8 - 5,5	1,1 - 1,5	0,3 - 0,5

Rychlořezné oceli – zachovávají velkou tvrdost do teplot okolo 550 °C. Dále mají velkou řezivost, odolnost proti oděru a proti popouštění. Jde o ledeburitické oceli vysoce legované s obsahem uhlíku nad 0,70 %. Charakteristická ocel pro tuto skupina má složení: 0,75 % uhlíku, 18 % wolframu, 4 % chromu a 1 % vanadu. Pro více namáhané oceli se přidává ještě kobalt o obsahu do 12 %. [3]

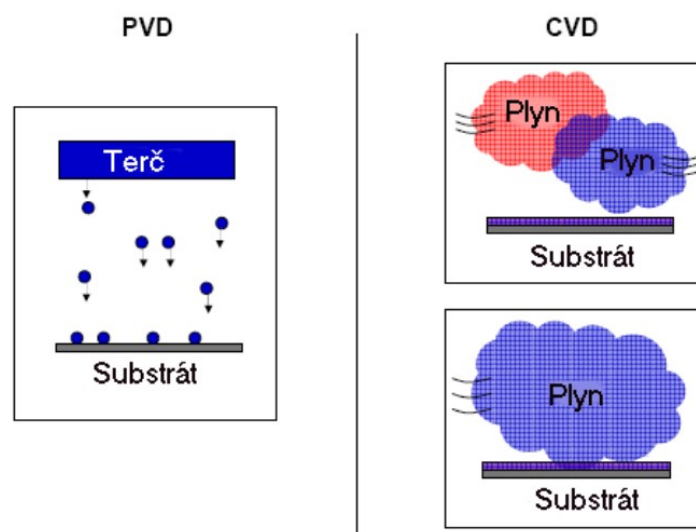
3 POVLAKOVÁNÍ

Povlakování se používá pro zlepšení vlastností povrchu výrobku při zachování vlastností původního materiálu. Povlakované nástroje ve srovnání s nepovlakovanými mají velkou odolnost vůči opotřebení, mechanickým rázům, působením kyselin a zásad, erozi a vysokým teplotám. Užívají se pro dekorativní účely, elektroizolační schopnosti a pro zvýšení nebo snížení součinitele tření a tepelné vodivosti. Tyto účinky se získávají určitou kombinací různých prvků. [8, 9]

Při narůstajících nárocích na životnost tvarových dílů vstřikovacích forem a se zvyšujícím objemem plněných kompozitních materiálů, s požadavky optické čistoty při vstřikování a na snížení tření se na dané díle uplatňuje technologie vytvářející tenké vrstvy s požadovanými vlastnostmi.

Tenké vrstvy se pohybují v tloušťce od desítek nanometrů až po jednotky mikrometru. V porovnání s původním materiálem dochází ke změně fyzikálního chování, tato změna je důsledkem jak malých tlouštěk vrstev, tak i technologii vzniku vrstvy. Technologie často probíhají kondenzací par ve vakuu (až 10^{-8} Pa). Pro povlakování jsou nejpoužívanější:

- PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální depozice par),
- CVD (Chemical Vapour Deposition – chemická depozice par),
- PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition – chemická depozice pomocí plazmatu). [10]



Obr. 4. Princip metod PVD a CVD [14]

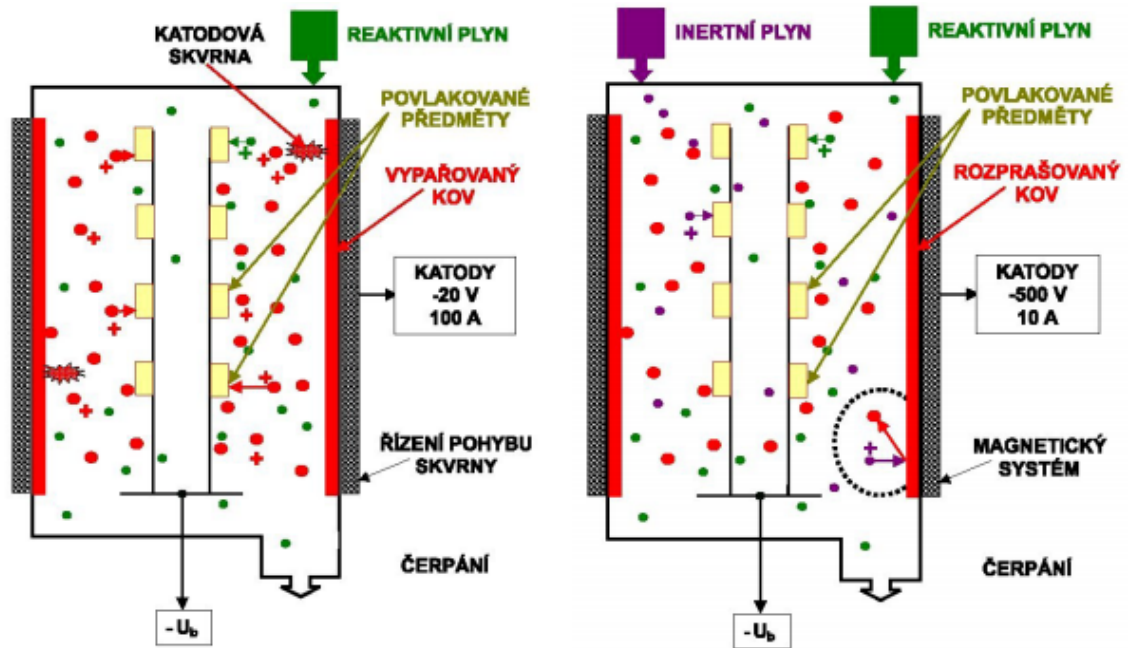
Před nanesením povlaku je třeba prvně důkladně očistit, několikastupňové hrubé čištění stlačeným vzduchem, proudem vody a oxidu hlinitého s velmi jemnou zrnitostí, a odmastit povrch nástroje. Pro odmaštění povrchu lze použít slabě alkalický vodný roztok, ultrazvukové lázně a vodné oplachy. Pak se povrch osuší teplým vzduchem nebo v sušičkách. Následující kroky přípravy se už odehrávají ve vakuové komoře. V komoře se nejprve od povrchu odebírají vázané plyny. Poté se pomocí proudu iontů plynu nebo kovem odebere pár nanometrů z vrstvy povrchu. Při tomto ději se zároveň povrch ohřívá na požadovanou teplotu. Povrchy, které nejsou určeny k povlakování se musí chránit třeba zasunutím do přípravku. [8, 10, 11]

Často se mezi základní materiál a povlak nanáší mezivrstva, která mezi základním materiálem a povlakem rozkládá namáhání, srovnává rozdíly modulu pružnosti, snižuje napětí a působí jako protioxidační a protikorozní ochrana. Mezivrstva tvoří vrstvu o tloušťce 2 až 15 μm a je tvořena materiály: Mo, Ni + Al, Ni + Cr, Ni + Ti a MoCrAlY. [8]

3.1 Fyzikální depozice par (PVD)

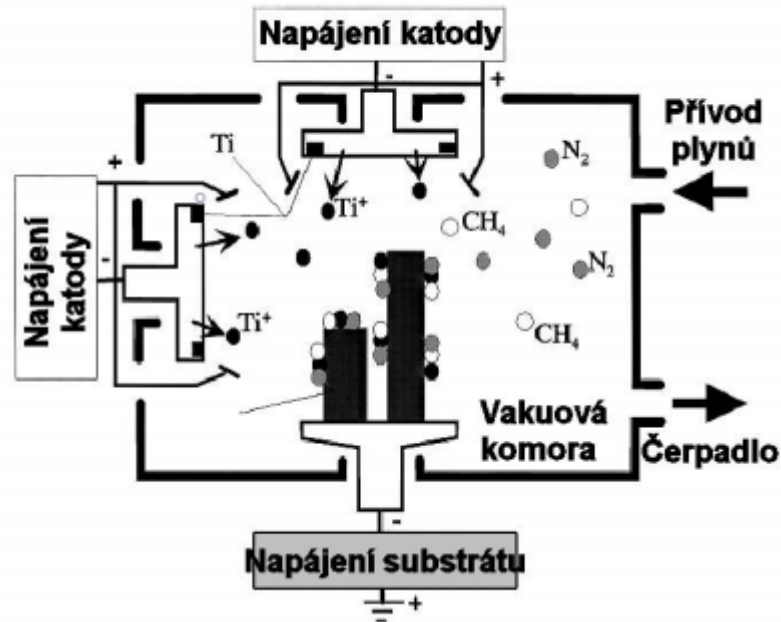
Technologie nanášení povlaků PVD je určena pro výrobu tvrdých povlaků na základě kovů pomocí částečně ionizovaných par kovu a jejich reakcí s plyny, a tím vzniká tenká vrstva o definovaném složení na povrchu dílce. Děj se odehrává mezi elektrodou, dílcem a pracovním plynem. Ionty kovu jsou popoháněny k povrchu dílce a reagují s atomy pracovního plynu, který tvoří další složku pracovního povlaku (eventuelně více plynů pro více složek povlaku). Pro technologii PVD je možnost více způsobů nanášení povlaků:

- Napařování – vysokoteplotní odpaření ve vakuu pomocí odporového ohřevu.
- Magnetronové napařování – zlepšuje klasickou metodu, kde magnetické pole usměrňuje plazmu, která je zdrojem většího množství bombardujících iontů.
- EBPVD (Electron Beam PVD) – ohřev a odpaření je výsledkem bombardování povrchu materiálu svazkem elektronů a odpařovaný materiál je zapojen jako anoda. Napařování vzniká bombardováním povrchu ionty pracovního plynu, deponovaný materiál je zapojen jako katoda. Atomy deponované látky jsou odpařovány z povrchu terče a na substrátu vytvářejí povlak.
- PLD (Pulsed Laser Deposition) – na terč deponovaného materiálu dopadají pulzy laserového svazku, čímž atomy materiálu dosáhnou dostatečného množství tepelné a mechanické energie pro převedení do plynného nebo plazmatického stavu. [8, 10]



Obr. 5. Napařování (vlevo) a napařování (vpravo) [12]

Nejvíce používané metody jsou napařování a obloukové napařování. Bombardováním kovových terčů energetickými ionty pracovního plynu při napařování pomocí elektrického výboje vzniká ionizovaná pára. Skrze velkou kinetickou energii iontů se uvolňují částice o požadovaném chemickém složení z terče čistého kovu a na povrchu dílce tvoří povlak. Pro obloukové napařování se využívá opakovaně obloukový výboj, svazek elektronů nebo klasický odporový ohřev, čímž se odpařuje materiál z čistého kovu. Částice se usazují na povrchu dílce a vytváří tenkou vrstvu povlaku, silně spojenou s podkladem. Kombinací napařování a napařování je iontová implantace. Zde dochází k silnému elektrickému poli, které způsobuje elektrický výboj a ionizuje jak částice plynu, tak i odpařené částice čistého kovu. Produktem reakce iontů je povlak vytvořen na povrchu dílce. Všechny metody PVD vyžadují střední až vysoké vakuum. [10, 11, 12, 13]



Obr. 6. Iontová implantace [12]

Povlaky mohou být nanášeny jako monovrstva, multivrstva či gradientní vrstva. Novou generací jsou supermřížkové a nanostrukturní variace vícevrstvých povlaků, které vylepšují vlastnosti. Typ povlaku se používá podle náročnosti aplikace a jeho struktury, která lze optimalizovat pro požadované vlastnosti. Obvykle používané povlaky jsou např. TiN, TiAlN, TiCN, ZrN. Nejčastější použití těchto povlaků je na obráběcí a tvářecí nástroje, tvarové díly vstřikovacích i jiných forem, mechanické komponenty nebo zdravotnické nástroje a pomůcky, které využívají mechanických vlastností (např. tepelná bariéra, houževnatost, životnost, aj.) nebo i vzhledu jednotlivých povlaků. [10, 11]

Depoziční teplota procesu je nízká a nachází se mezi 250 a 450 °C, avšak dle druhu základního materiálu může být teplota pod 70 °C, či naopak až při 600 °C. Technologie PVD byla vytvořena povlakování nástrojů z rychlořezné oceli, protože nízká teplota zajistí, že nenaštane tepelné ovlivnění materiálu. Dnes se už používá i pro břitové destičky, které jsou pro přerušovaný řez. [10, 12]

Nanášení povlaku je redukováno pouze stabilitou materiálu při depoziční teplotě a jeho elektrické vodivosti. Materiál stanovený pro povlakování metodou PVD může být ocel, nezelezné kovy, karbidy wolframu, součástky z hliníku a plastu, ale i hodně tenké fólie z PP, PE a dalších materiálů u kterých nedochází k tepelné degradaci během povlakování. [10, 14]

Jakost a tloušťka nanášeného povlaku záleží na čistotě materiálu elektrody, pracovních plynů, době nanášení, teplotě a velikosti proudu a napětí. Povlaky jsou homogenní, mají konstantní tloušťku a velkou soudržnost s materiálem. Tloušťka povlaku je v rozmezí 2 až 5 μm , ale lze udělat i vrstvu tenkou několik set nanometrů, či naopak silnou až 15 či více mikrometrů. Dále je potřeba mít dokonale očištěn materiál. Po přípravě povrchu přichází k nanášení vrstvy buď modifikací povrchu implantací částic, nebo tvorbou mezivrstvy, která zvětšuje přilnavost vrstvy k nástroji. [8, 10, 11]

PVD povlaky jsou lehce recyklované. Pomocí silného oxidačního činidla (roztok peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu zahřátého na 70 °C) se bez narušení původního povrchu chemicky odleptá vrstva PVD. Po odleptání povlaku je potřeba povrch opláchnout a pomocí vhodného činidla pasivovat. [10]

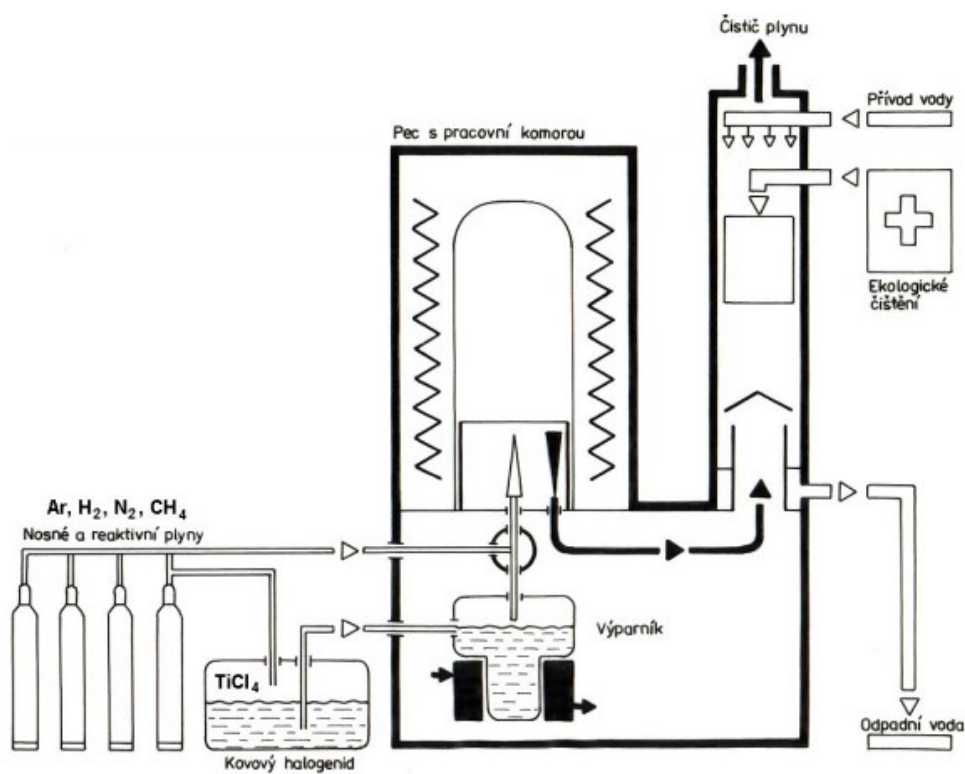
Výhodou PVD technologie je nízká teplota procesu a možnost povlakovat ostré hrany. Dalšími výhodami jsou nízký koeficient tření, možnost vzniku přesných tlouštěk vrstev a velkou kombinací druhů vrstev. Mezi nevýhody se řadí komplikovaný vakuový systém a potřeba pohybovat povlakovanými dílci z důvodu rovnoměrného nánosu povlaku, protože na ploše, která neleží ke směru odpařovaných částic se vytvoří nedokonalá vrstva, nebo dokonce se i nevytvoří vůbec. [12, 14]

3.2 Chemická depozice par (CVD)

Technologie nanášení povlaků CVD využívá chemických reakcí v plynné fázi. Produkt reakce potom vytvoří na povrchu základního materiálu tenkou vrstvu. Reakce probíhá za teploty 800 až 1 050 °C a tlaku 10^3 až 10^4 Pa. Rychlost nárustu povlaku je 1 až 3 $\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$. Celková tloušťka nanášeného povlaku je 5–12 μm a pro speciální případy může být až 20 μm tlustý povlak. Obvykle používané povlaky jsou např. TiC, TiCN, TiN. Pro možnost vysoké teploty se tato metoda hodí i k nanášení vícevrstvých povlaků. Dobré soudržnosti povlaku s materiálem se dosahuje dokonalým očištěním povrchu, kde vzniká povlak. Tato technologie se také hodí pro nanášení tenkých vrstev křemíku (Si), oxidu křemičitého (SiO_2), karbidu křemíku (SiC), nitridu křemíku (Si_3N_4) a pro vysoce čisté kovy jako jsou molybden (Mo), tantal (Ta), titan (Ti), nikl (Ni), wolfram (W) a na bázi uhlíku se strukturou grafitovou, diamantovou a polymerní. [8, 9, 10, 13, 15]

Hlavním materiálem pro povlakování jsou nástrojové oceli, karbidy wolframu, vysokoteplotní slitiny niklu, keramiky a grafitu. Zušlechtné nástrojové oceli a díly po povlakování potřebují znovu teplené zpracování k dosažení požadované tvrdosti. [15]

K výhodám technologie CVD patří, že můžeme povlakovat i nepřístupné části (dutiny, drážky), a i přes složitost dílce dosahují nanesené vrstvy rovnoměrné tloušťky. Povlaky mají vysokou adhezi a odolnost proti opotřebení, také se vyznačují velkou teplotní stabilitou a jsou velmi ekonomicky výhodné k povlakování silných vrstev. Jako nevýhody jsou považovány ekologicky škodlivé pracovní plyny, velká energetická náročnost, dlouhý pracovní cyklus 8–10 hodin. Další nevýhodou je tahové pnutí ve vrstvě a velká pracovní teplota, která nedovoluje vznik určitých typů povlaků (např. TiAlN). [12, 13, 14, 15, 16]



Obr. 7. Princip povlakovacího zařízení pro metodu CVD [12]

3.3 Chemická depozice pomocí plazmatu PACVD

Pomocí plazmatu (výboje v plynu) je iniciována chemická reakce. Při reakci nastávají srážky elektronů s vysokou energií s těžkými molekulami plynu. Produktem jsou vysoce reaktivní částice. Chemicky aktivovaná plazma dovoluje snížit teplotu, která je požadována pro vytváření povlaku na povrchu dílce. Povlakování je nejvíce prováděno za teplot 470 až 530 °C

a není potřeba vysoké vakuum. Povlakování je prováděno až po úplném zušlechtnění na určenou tvrdost. Tato metoda je určitým přechodem mezi technologiemi PVD a CVD a také dovoluje zároveň nitridovat a povlakovat v jednom procesu. Hodí se pro ocelí s popouštěcí teplotou nad 550 °C (např. 1.2343, 1.2436 a slinuté karbidy). [10, 12, 17]

Touto metodou se dosáhne tloušťkově homogenního povlaku i na tvarově složitých částech. Mohou být povlakovány i dutiny a velké dílce (do cca 1 250 kg). Povlaky se také vyznačují extrémně nízkým koeficientem tření (až 0,1). Tato metoda se může především použít tam, kde nelze aplikovat CVD metodu z hlediska velké teploty povlakování. [10, 17]

Technologie PACVD je vakuový proces pro nanášení zejména DLC (diamantu podobný uhlík) povlaků. Materiály k povlakování touto metodou jsou plynné fáze, a proto jsou vhodné i pro 3D dílce a není potřeba s dílci otáčet, jak je tomu u PVD technologie. Aplikuje se pro velkou škálu vodivých i nevodivých materiálů, a to i při teplotě pod 200 °C. Charakteristická tloušťka povlaku je v rozpětí od 2 μm do 3 μm.

DLC povlaky jsou amorfni a dosahují velké tvrdosti (10 až 40 GPa). Mají vynikající odolnost proti opotřebení a nízký koeficient tření. Jsou vhodné pro mechanické sestavy, kde dochází k valivému či posuvnému pohybu. Je to ideální povrch, jelikož nepotřebuje žádné další úpravy a je vysoce vhodný pro přesné tvarové díly forem. Docílí se až několikanásobně zvýšené životnosti formy. Povlaky jsou také chemicky inertní a biokompatibilní, a proto se mohou také používat ve zdravotnictví u různých pomůcek nebo implantátů. [10]

Mezi výhody PACVD technologie patří možnost povlakovat široké velké spektrum materiálů, nezpůsobuje žádné deformace přesných dílců a nejsou nutné následné povrchové úpravy, zároveň je možné nitridovat a povlakovat v jednom procesu. Také není potřeba vysoké vakuum, což zrychluje proces. Dílec se při povlakování nemusí otáčet. Jedná se o zelenou technologii s ohledem na zdroje, proces i produkty. [10, 17]

4 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Při výběru materiálu pro požadovanou výrobu se hledí na mechanické, technologické, fyzikální i chemické vlastnosti materiálu. Při výběru záleží na vlastnostech, které jsou nejvíce potřeba na danou aplikaci materiálu, aby byl materiál pevný nebo tvárný, zdali na něj bude působit velká síla, a to pomalým zatěžováním nebo rázovým. Na vlastnosti materiálu taky značně působí teplota, která mění krystalickou strukturu materiálu při dosažení určitých hodnot. Po stanovení požadovaných vlastností, můžeme určit vhodný materiál. Vlastnosti materiálu se vyjadřují číselnými hodnotami (materiálová charakteristika). Tato charakteristika je hodnota, kterou určujeme zkoušením materiálu.

Mechanické zkoušky stanovují vlastnosti, které sdělují deformační chování materiálu a zkoušky dělíme na statické a dynamické zkoušky. Statické zkoušky probíhají pozvolným zatěžováním (bez rázu). Hlavně se zkouší pevnost materiálu. Podle typu zatížení členíme tyto zkoušky na zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu. Dynamické zkoušky se provádějí pomocí náhlé změny namáhání a dochází často k porušení součásti. [5, 18]

4.1 Zkoušky tvrdosti

Zkouška tvrdosti je snadná, nejrychlejší a nejlevnější zkouška, kterou můžeme zjistit mechanické vlastnosti. Z tvrdosti lze i vyvozovat jiné vlastnosti jako pevnost v tahu, obrobiteľnosť aj. Tvrdost znamená odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Tvrdost uvádíme bez jednotek s označením způsobu měření nebo stupnice. Vyznačuje se značkou H. Měření tvrdosti lze provádět hodně způsoby, ale podle principu se dělí na vrypové, odrazové a vnikací. [5, 18]

4.1.1 Vrypová zkouška

Je určena pro tvrdé a křehké materiály např. sklo, porcelán, aj. Uplatňuje se zkouška podle Martense.

Zkouška podle Martense HMa – pomocí tvrdého hrotu (kuželového diamantu) přitlačeného měnitelným tlakem na leštěný povrch testovaného materiálu. Síla F , která je nezbytná k vytvoření vrypu o šířce 0,01 mm, je měřítkem tvrdosti. [5, 18]

4.1.2 Odrazová zkouška

Provádí se pomocí závaží s kulovitě zakončeným hrotem (diamantový). Závaží se spustí z určité výšky od testovaného vzorku a měří se výška jeho odrazu. Tato hodnota je rovnou

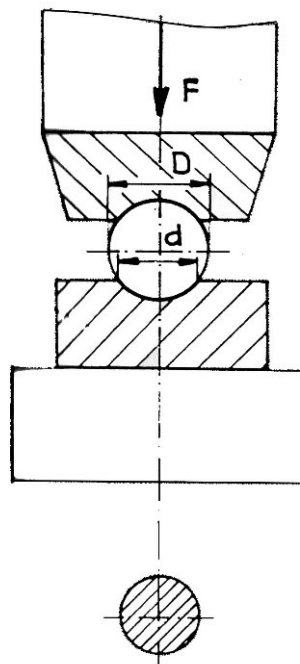
hodnota tvrdosti podle Shoreho HSh. Měření se provádí na přístroji zvaném Shoreho skleroskop.

Tento princip zjišťování tvrdosti byl upraven i pro materiály s malým modulem pružnosti a vysokou elastickou deformací (měkké plasty a pryže). Tvrdost je zjišťována podle hloubky proniknutí kužele do povrchu zkušební těliska. Značí se Shore A (velmi měkké plasty) a Shore B (středně tvrdé plasty). [5, 18, 19]

4.1.3 Vnikací zkouška

Nejvíce používaný způsob zjišťování tvrdosti. Tvrdost je určena pomocí velikosti vtisku velmi tvrdého tělesa v testovaném materiálu. Nejpoužívanější zkušební metody jsou podle Brinella, Rockwella a Vickerse. [5, 18]

Zkouška tvrdosti podle Brinella HB – podle normy ČSN EN ISO 6506 se zkouška provádí na povrchu testovaného tělesa. Princip měření je ve vtiskování zkušební tělesa o průměru D danou silou F a po uvolnění se změří průměr vtisku d , jak lze vidět na Obr. 8.



Obr. 8. Princip zkoušky podle Brinella [18]

Zkušební těleso se podle normy označuje podle použití ocelové kalené kuličky HBS a pro kuličku z trvdokovu HBW. Brinellova zkouška tvrdosti je určena pro materiály s nižší nebo

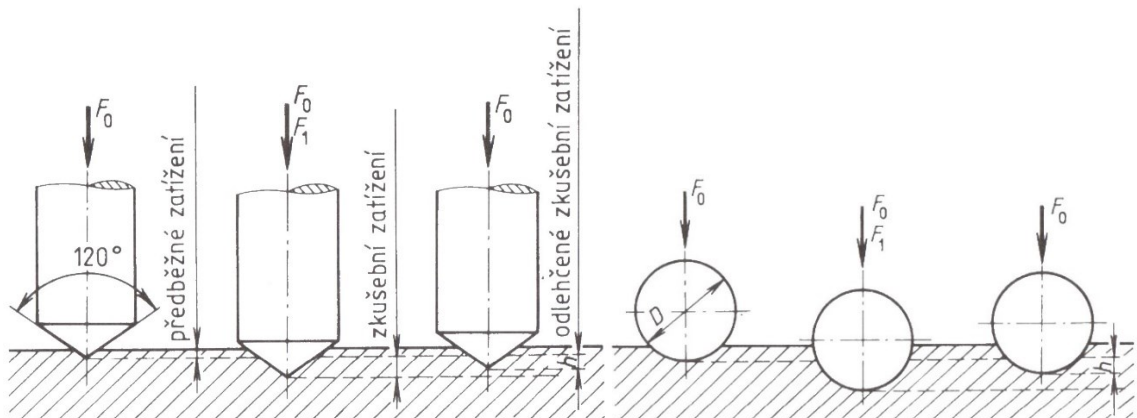
střední tvrdostí. Hloubka vtisku musí být osmkrát větší než tloušťka zkušebního tělesa. Povrch je hladký a rovný, bez okují a mazadel. Pro výpočet tvrdosti dle Brinella se používá vztah (1).

$$HB = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Vztah je platný pouze při splnění podmínky, že průměr vtisku leží v rozmezí (0,3 až 0,6) D. Pro materiály je stanovena zatěžovací konstanta k, která je stanovena pro různé materiály. Hodnota konstanty je podle tvrdosti testovaného materiálu rozčleněna do šesti stupňů. Pomocí této konstanty určíme zatěžující sílu pro splnění podmínky (2). [5, 18, 19]

$$k = \frac{F}{D^2} [N/mm^2] \rightarrow F = k \cdot D^2 [N] \quad (2)$$

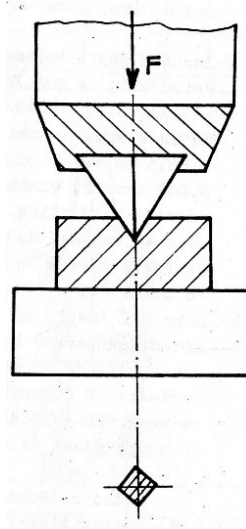
Zkouška tvrdosti podle Rockwella HR – podle normy ČSN EN ISO 6508 zkouška se zakládá na hloubce vniknutí h (max. 0,2 mm) diamantového kužele o vrcholovém úhlu 120° nebo malá kulička z tvrdokovu. Zkouška probíhá tak, že kužel nebo kulička, která je v kontaktu s povrchem, zatížíme předběžným zatížením F_0 . Vytvoříme malý vtisk, z kterého vycházíme v následujícím měření, kde dodáváme přídatnou sílu F_1 , dokud nezískáme sílu celkovou F (kde F je součet F_0 a F_1). Doba působení síly F je 10 až 15 sekund, pro materiály s omezenou plastickou deformací na čase se doba ubírá na 1 až 5 sekund. Poté uvolníme zatížení na F_0 a odečteme hloubku vtisku h. Princip zkoušky je znázorněn na Obr. 9. Pro výpočet tvrdosti dle Rockwella se používá vztah (3), kde N je konstanta charakterizující stupnici a S je jednotková stupnice. [5, 18, 19]



Obr. 9. Princip zkoušky podle Rockwella [5]

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad (3)$$

Zkouška tvrdosti podle Vickerse HV – podle normy ČSN EN ISO 6507 jde o zatlačování diamantového jehlanu o vrcholovém úhlu 136° do testovaného tělesa silou F po dobu 0 až 15 sekund. Po uplynulé době se zatížení uvolní a změří se uhlopříčky vtisku, z kterých se udělá aritmetický průměr. Princip zkoušky je znázorněn na Obr. 10. Pro výpočet tvrdosti dle Vickerse se používá vztah (4), kde d je uhlopříčka vtisku.



Obr. 10. Princip zkoušky podle Vickerse [18]

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

Tato zkouška lze použít pro všechny tvrdosti, je hodně přesná a nevyžaduje velké zatížení. Jelikož lze tuto zkoušku provádět při malých zatížení (1 až 10^{-3} N), lze také měřit mikrotvrdost. [5, 18, 19]

4.2 Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI

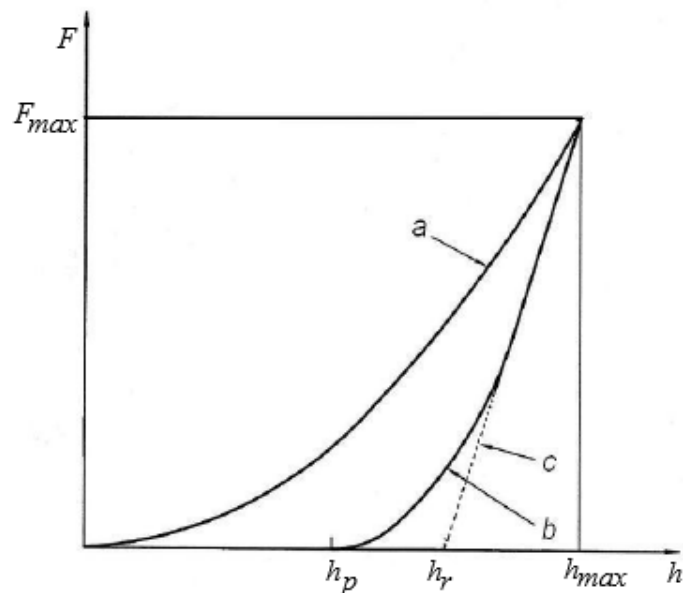
Instrumentovaná zkouška tvrdosti podle normy ČSN EN ISO 14577 nám říká, že lze pomocí této zkoušky určit parametry stejné jako u obvyklé metody. Důležitější je, že jde určit také i jiné vlastnosti materiálu (např. vtiskový modul a elastickoplastická tvrdost). Každá hodnota jde vypočítat, není potřeba vtisk opticky proměřovat. [21]

4.2.1 Princip

Plynulým sledováním zatížení a hloubky vtisku je možno určit tvrdost a materiálové vlastnosti. Materiály a tvary vnikacího tělesa musí být tvrdší, než je testovaný materiál, mohou být použity:

- diamantový čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou o úhlu mezi osou a stranou 68° (Vickersův jehlan);
- diamantový jehlan s trojúhelníkovou základnou o úhlu mezi osou a stranou $65,27^\circ$ (Berkovichův jehlan);
- tvrdokovová kulička;
- diamantový kužel se sférickým vrcholem.

Zkouška postupuje podle zatížení F nebo posunu vnikacího tělesa. Během celého cyklu je zaznamenán čas, hloubka vtisku h , které odpovídá zatížení F . Zkušební zatížení a hloubka vtisku v závislosti na čase, je výsledkem zkoušky. Na Obr. 11 je znázorněn schematicky zkušební postup. [21]



Obr. 11. Schématické znázornění zkušebního postupu [21]

- a – aplikace zkušebního zatížení,
- b – odlehčení zkušebního zatížení,
- c – tečna ve křivce b v F_{max} ,
- h_p – trvalá hloubka vtisku po odlehčení zkušebního tělesa,
- h_r – průsečík tečny c ke křivce b v F_{max} s osou hloubky vtisku.

4.2.2 Postup

V místě zkoušky nesmí být žádné tekutiny nebo maziva, až na ty, které jsou pro zkoušku potřebné. Je potřeba, aby se nevyskytovaly ani nechtěné látky jako jsou např. prachové částice.

Zkušební teplota je sice důležitá, ale více důležitější je, aby teplota při zkoušce nekolísala. Tato teplotní stabilita se musí dodržovat pro dosažení velké přesnosti výsledků. Zkoušky se obvykle měří při teplotě okolí v rozmezí 10 až 35 °C.

Testované těleso musí být pevně podepřeno, aby nedocházelo ke zvýšené poddajnosti stroje. Proto je potřeba těleso usadit buď na podpoře nebo v držáku. Dotykové plochy tělesa s podporou nebo držákem, musí být očištěny od nežádoucích látek, které by mohly zvýšit poddajnost podpory.

První dotyk mezi vnikacím tělesem a testovaným tělesem je nulový bod, který je potřeba určit pro každý soubor. Nulový bod se může také vypočítat. Pro stanovení je vhodná malá rychlost přisunování, aby se vyvarovalo rázu.

Průběh zkoušky musí být proveden bez jakýchkoliv otřesů, vibrací a teplotním změnám okolí, jinak by došlo k ovlivnění výsledků. Ze zkušebního zatížení nebo posunu vnikacího tělesa v závislosti na čase, je možné určit zkušební profil. Je potřeba, aby zkouška probíhala za konstantní rychlosti posunu vnikacího tělesa a použitého zatížení. [21]

4.2.3 Tvrdość podle Martense HM

Stanovuje se z hloubky vtisku během rostoucího zatížení, a hlavně po dosažení určeného zatížení. Tvrdość podle Martense je vhodná pro všechny materiály, protože obsahuje plastickou i elastickou deformaci. Určíme ji pomocí vztahu (5):

$$HM = \frac{F}{A_s(h)} [MPa] \quad (5)$$

- F – zkušební zatížení;
- $A_s(h)$ – plocha povrchu. [21]

4.2.4 Vtisková tvrdość H_{IT}

Míra odporu k trvalé deformaci nebo poškození neboli vtisková tvrdość je uvedena vztahem (6):

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p(h_c)} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (6)$$

- F – zkušební zatížení;
- $A_p(h_c)$ – průmět kontaktní plochy mezi vnikacím tělesem a zkušebním tělesem. [21]

4.2.5 Vtiskový modul E_{IT}

Vtiskový modul je srovnatelný s Youngovým modulem materiálu a lze spočítat prostřednictvím Poissonova poměru zkušební tělesa podle vztahu (7):

$$E_{IT} = \frac{1 - (v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (v_i)^2}{E_i}} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (7)$$

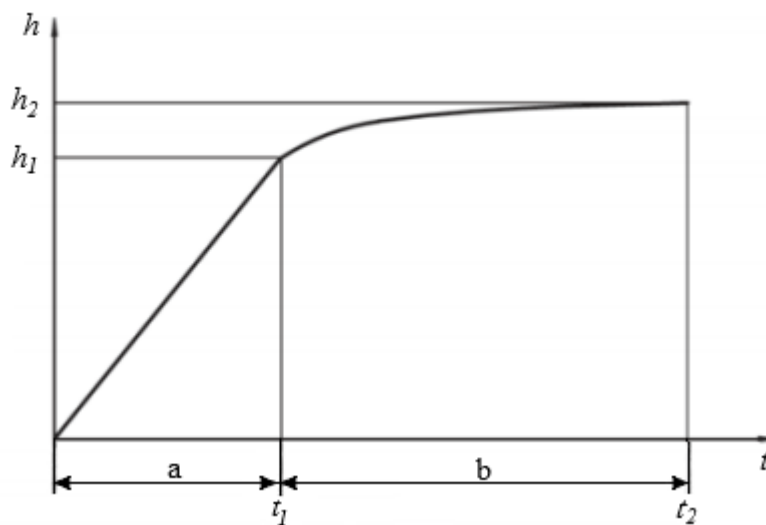
- v_s – Poissonův poměr zkušební tělesa;
- v_i – Poissonův poměr vnikacího tělesa;
- E_r – redukovaný modul vtiskového kontaktu;
- E_i – modul vnikacího tělesa. [21]

4.2.6 Vtiskové tečení C_{IT}

Z měřené změny hloubky vtisku za konstantního zatížení, lze vypočítat relativní změnu hloubky vtisku. Tato hodnota je tečení materiálu a je dána vztahem (8):

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{F_1} \cdot 100 [\%] \quad (8)$$

- h_1 – hloubka vtisku v čase (t_1), v tomto čase je dosaženo zkušebního zatížení;
- h_2 – hloubka vtisku v čase (t_2), jedná se o setrvání na stálé hodnotě zkušebního zatížení.



Obr. 12. Vyjádření vtiskového tečení [21]

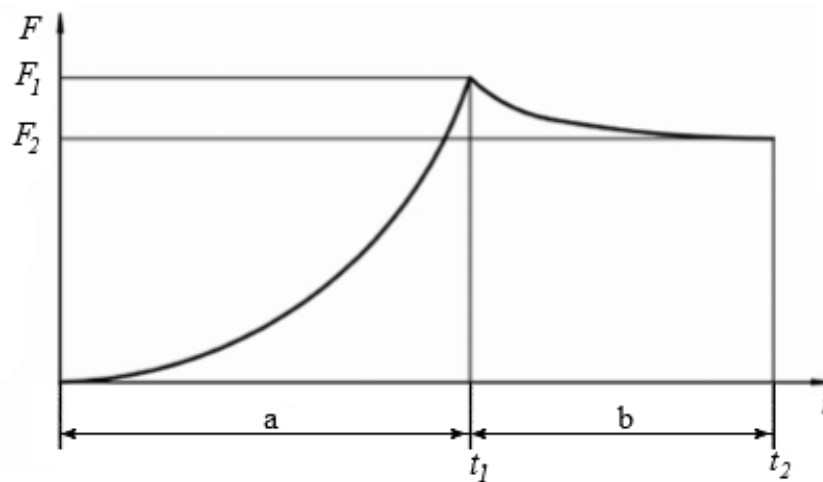
- a – aplikace zkušebního zatížení,
- b – zkušební zatížení udržované na konstantní úrovni od t_1 do t_2 . [21]

4.2.7 Vtisková relaxace R_{IT}

Při měření se zkoumá změna zkušebního zatížení, a z toho se může vypočítat relativní změnu zkušebního zatížení neboli relaxaci materiálu. Vtisková relaxace je dána vztahem (9):

$$R_{IT} = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100 [\%] \quad (9)$$

- F_1 – zatížení při dosažení hloubky vtisku;
- F_2 – zatížení po čase, kdy hloubka vtisku byla na stálé hodnotě.



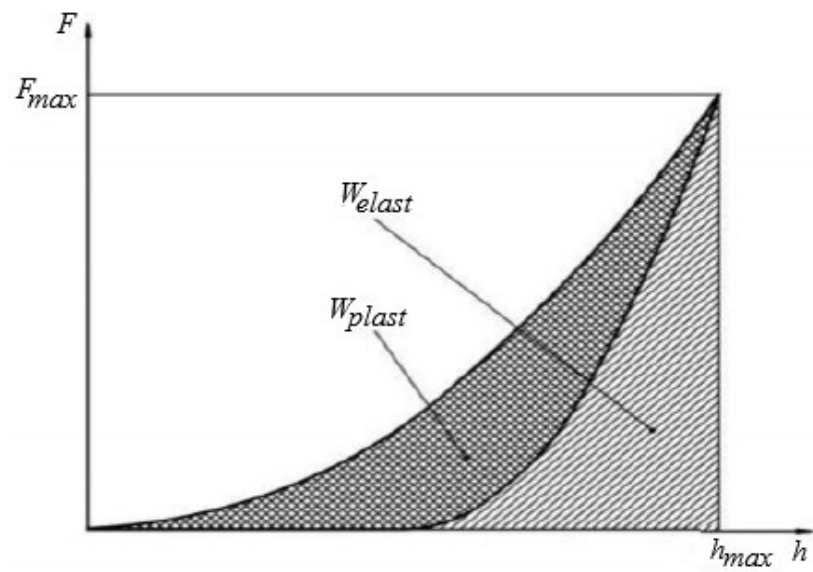
Obr. 13. Vyjádření vtiskové relaxace [21]

- a – aplikace hloubky vtisku,
- b – hloubka vtisku udržovaná na konstantní úrovni od t_1 do t_2 . [21]

4.2.8 Plastické a elastické části práce vnikacího procesu

Při zatěžování během vnikacího procesu je použita plastická deformační práce W_{plast} a při odlehčování zatížení je uplatněna práce elastické zpětné deformace W_{elast} . Součtem elastické a plastické práce dostaneme práci celkovou W_{total} . Z čehož můžeme určit charakteristiku zkušebního tělesa, která je dána vztahem (10): [21]

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{plast}} \cdot 100 [\%] \quad (10)$$



Obr. 14. Znárodnění práce vnikacího procesu [21]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo zjistit mechanické vlastnosti povlaků s porovnáním se základním materiálem (1.2343) a zjistit ovlivnění použitého povlaku na výsledné mechanické vlastnosti nástroji. Povlakováno bylo šest vzorků, kde pět vzorků bylo povlakováno metodou PVD a jeden metodou PACVD. Vlastnosti byly zjištěny instrumentovanou zkouškou DSI, měřila se nano a ultra-nano tvrdost. Naměřená data byla následně graficky zpracována a porovnána.

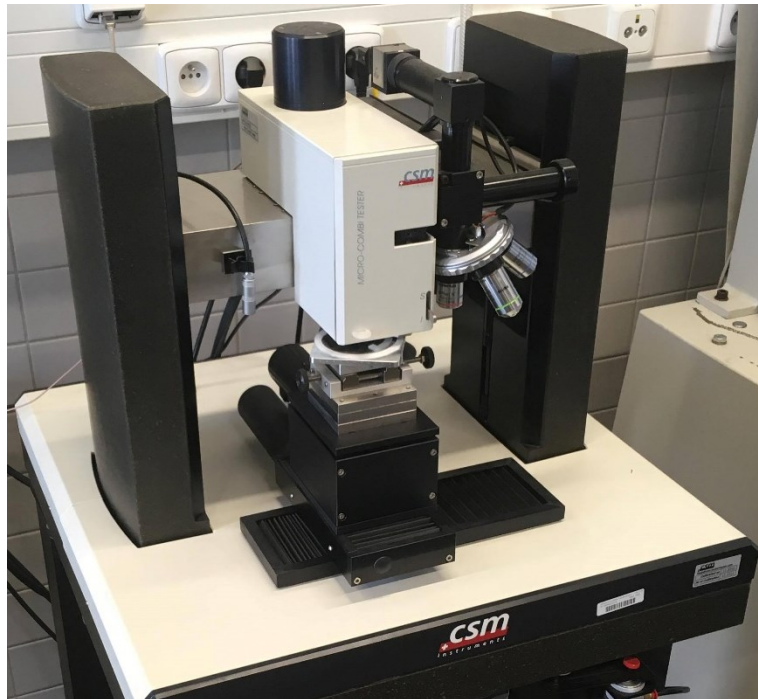
Úkoly bakalářské práce:

- Vypracovat literární studii na dané téma.
- Příprava zkušebních těles pro experiment.
- Provedení experimentu.
- Vyhodnocení naměřených hodnot.

6 PŘÍSTROJE A VZORKY PRO EXPERIMENT

6.1 Přístroje

Experiment se měřil na indentačním testeru firmy Anton-Paar (Obr. 15.) k měření tvrdosti podle metody DSI. Na základě velikosti aplikovaného zatížení dělíme test na nano a ultra-nano-indentaci.



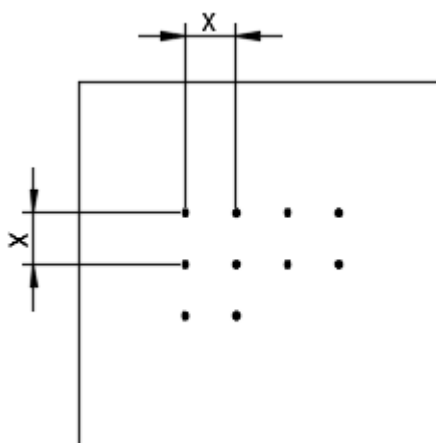
Obr. 15. Indentační tester firmy Anton-Paar

Cílem měření je vyhodnotit optimální povlak pro tvarovou dutinu formy, se kterým se dosahuje nejlepších mechanických vlastností. Na Obr. 16. je znázorněn příklad tvarové dutiny formy.



Obr. 16. Tvarová dutina formy

Na všech vzorcích proběhlo deset měření. Každý vpich byl uveden ve vzájemné vzdálenosti, jak je znázorněno na Obr. 17., tato vzdálenost se liší dle typu zkoušky. Vpichy se prováděly ve třech řadách, kde v prvních dvou byly čtyři za sebou a v poslední řadě už jen zbývající dva. Pro nano-indentaci test je vzdálenost vpichů $500\ \mu\text{m}$ a pro ultra-nano-indentaci test $200\ \mu\text{m}$.



Obr. 17. Schéma měření

6.1.1 Nano-indentaci test

Instrumentovaná zkouška tvrdosti se měřila na nano-indentaci testeru firmy Anton-Paar (NHT³). Na všech vzorcích proběhlo deset měření. Naměřená data mechanických vlastností se vyhodnotily dle metody OLIVER a PHARR. Jako vnikací těleso se použil trojboký diamantový jehlan (Berkovich).

Nastavení parametrů zkoušky bylo:

- Aplikované zatížení při zkoušce – 250 mN.
- Výdrž při maximálním zatížení – 90 s.
- Zatěžující a odtěžující rychlost – 500 mN/min.

6.1.2 Ultra-nano-indentací test

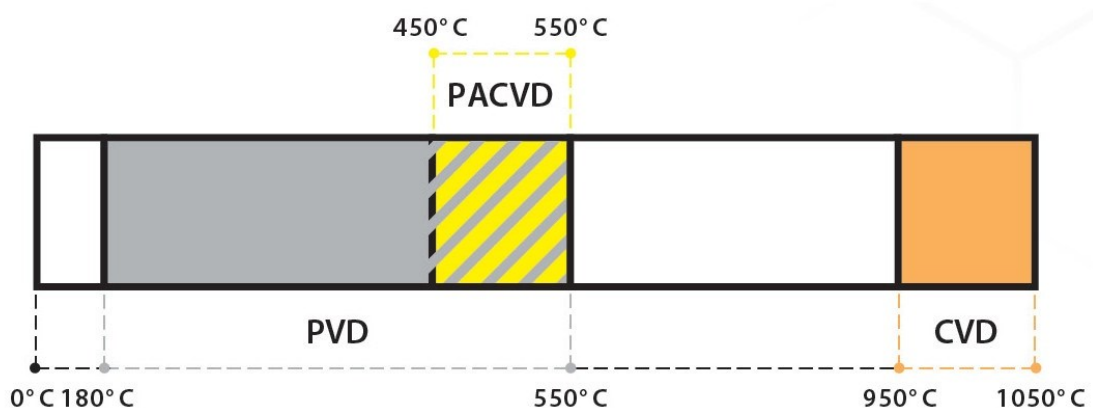
Instrumentovaná zkouška tvrdosti se měřila na ultra-nano-indentacním testeru firmy Anton-Paar (UNHT³). Na všech vzorcích proběhlo deset měření. Naměřená data mechanických vlastností se vyhodnotily dle metody OLIVER a PHARR. Jako vnikací těleso se použil trojboký diamantový jehlan (Berkovich).

Nastavení parametrů zkoušky bylo:

- Aplikované zatížení při zkoušce – 50 mN.
- Výdrž při maximálním zatížení – 90 s.
- Zatěžující a odtěžující rychlost – 100 mN/min.

6.2 Vzorky

Celkem bylo sedm vzorků, z nichž šest bylo povlakováno a z toho pět vzorků metodou PVD (TiAlN, CrN, TiN, DLC Comp, TiCN) a jeden vzorek metodou a PACVD (TiB₂). Poslední vzorek byl základní materiál bez povlaku. Vzorky byly povlakovány ve spolupráci s firmou VÚHŽ. Teplotní rozdělení pro povlakování ve firmě je znázorněno na Obr. 18.



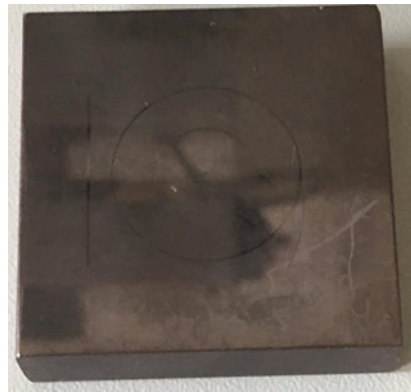
Obr. 18. Povlakovací teploty firmy VÚHŽ [22]

6.2.1 Základní materiál

Povlaky byly nanášeny na destičku o rozměrech 40x40x10 mm z nástrojové oceli pro práci za tepla. Byl použit materiál 1.2343, který má základní charakteristiku uvedenou v kapitole 2.2.14.

6.2.2 TiAlN

Výrobce je udávána tvrdost povlaku 2 500 – 3 500 HV, koeficient tření 0,4 a pracovní teplota 800 °C. Povlakovací teplota je do 600 °C a povlak je nanášen o tloušťce 1 – 8 μm fialové barvy. Používá se pro řezné nástroje, které dosahují vysokých tepelných zatížení a řezných rychlostí (frézování a vrtání litiny a ocelolitiny), dále nachází využití při vstřikování plastů a lisování plechů. [22]



Obr. 19. Povlak TiAlN

6.2.3 CrN

Výrobce je předepsána tvrdost v rozmezí 1 500 – 2 500 HV, koeficient tření 0,4 a pracovní teplota 700 °C. Nanášení povlaku se provádí při teplotě 150 – 450 °C o tloušťce 1 – 10 μm a stříbrnošedé barvě. Je určen pro formy na tváření za studena a lisování, používá se i v potravinářském průmyslu. Také nachází uplatnění pro formy a trysky vstřikovacích plastů. [22]



Obr. 20. Povlak CrN

6.2.4 TiN

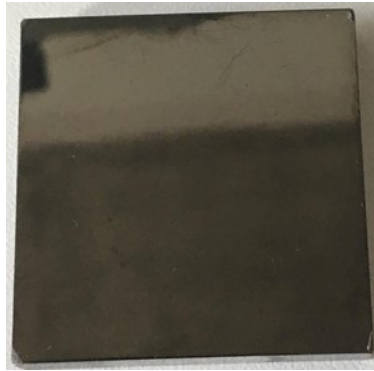
U tohoto povlaku výrobce udává tvrdost 2 500 HV, koeficient tření 0,4 a pracovní teplotu 600 °C. Povlak je nanášen při teplotě 150 – 600 °C o tloušťce 1 – 6 μm a zlaté barvy. Aplikuje se hlavně na řezné nástroje (vrtáky, závitníky). [22]



Obr. 21. Povlak TiN

6.2.5 DLC Comp

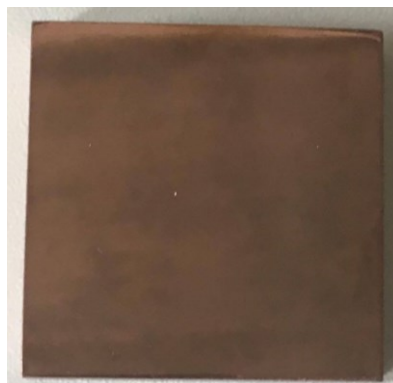
Výrobce stanovuje tvrdost povlaku o velikosti 2 000 – 4 000 HV, koeficient tření 0,05 – 0,15 a pracovní teplota 350 °C. Povlakování probíhá při teplotě 160 – 300 °C o tloušťce 1 – 3 μm, černé barvy. Povlak se používá pro hliníkové formy na lisování gumy, nachází uplatnění i v potravinářském průmyslu. Má dobré kluzné vlastnosti a vysokou abrazivní odolnost. Snižuje spotřebu maziv a zabraňuje nalepování zpracovaného materiálu. [22]



Obr. 22. Povlak DLC Comp

6.2.6 TiCN

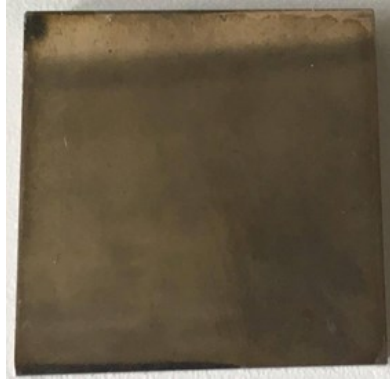
Výrobce udává tvrdost 3 000 HV, koeficient tření 0,4 a pracovní teplotu 600 °C. Povlakování probíhá do teploty 600 °C a tvoří tloušťku 1 – 4 μm, bronzové barvy. Uplatnění nachází u rezných a střížných nástrojů a u málo namáhaných lisovacích nástrojů. [22]



Obr. 23. Povlak TiCN

6.2.7 TiB₂

Dle výrobce je tvrdost 2 500 – 3 200 HV, koeficient tření 0,4 – 0,5 a pracovní teplota 800 °C. Povlakovací teplota je 520 °C a nanáší se vrstva o tloušťce 2 – 3 μm, žlutošedé barvy. Používá se pro formy vstřikovacích plastů, povlakování tvarově komplikovaných dílů s úzkými zářezy. [22]



Obr. 24. Povlak TiB₂

7 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Instrumentovanou zkouškou DSI lze získat velké množství mechanický vlastností vzorku. V této bakalářské práci se vyhodnocovaly jen určité vlastnosti, které se po skončení měření na každém vzorku zprůměrovaly (11) a vypočetly směrodatné odchylky (12). Následné výsledky se graficky zpracoval. Byli vyhodnoceny mechanické vlastnosti:

- Vickersova tvrdost H_{VIT} [HV].
- Vtisková tvrdost H_{IT} [MPa].
- Vtiskový modul E_{IT} [GPa].
- Hloubka vtisku h_{max} [nm].
- Deformační elastická práce W_{elast} [pJ].
- Deformační plastická práce W_{plast} [pJ].

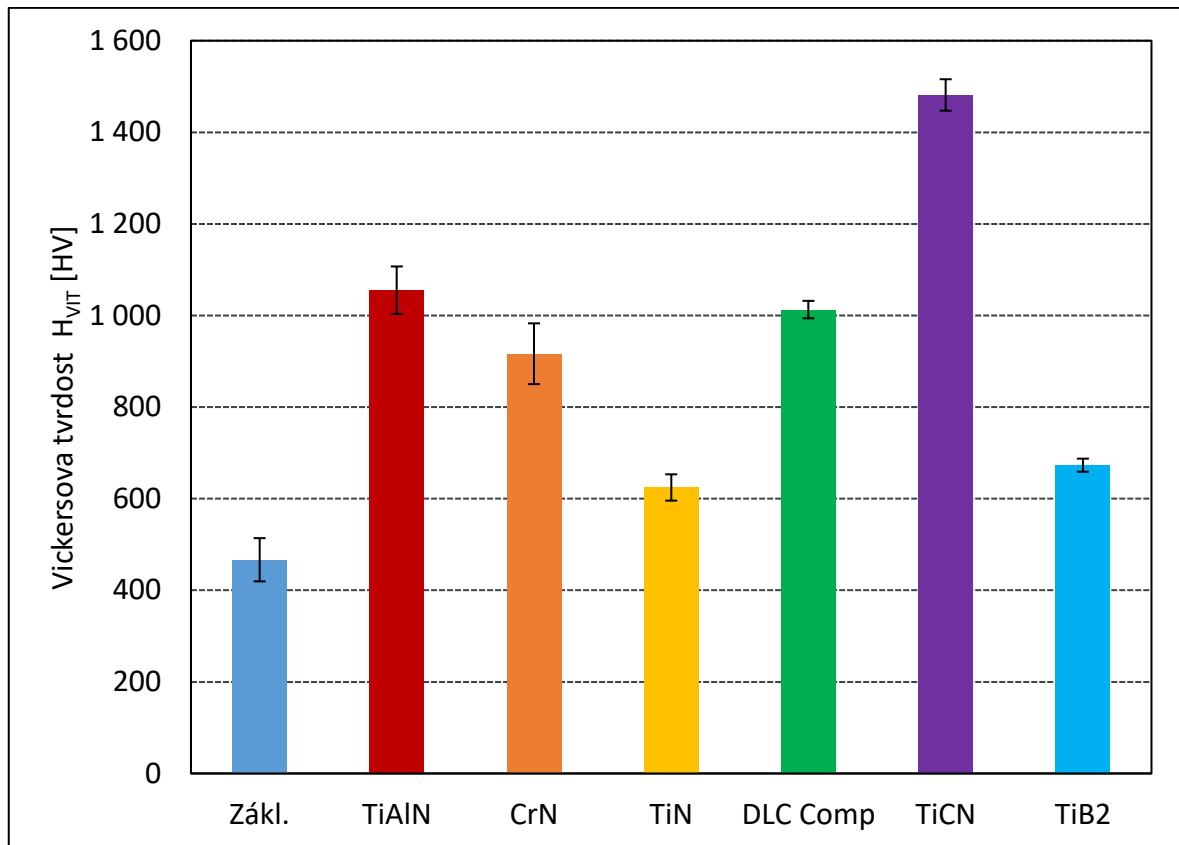
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

7.1 Vickersova tvrdost H_{VIT}

7.1.1 Nano-indentální test

Z výsledků, které jsou uvedeny v Tab. 3. a graficky znázorněny na Obr. 25., je viditelné, že všechny povlaky vykazují větší Vickersovu tvrdost než základní materiál, který má 467 HV. Nejvyšší hodnotu dosahuje povlak TiCN 1 482 HV, který má nárůst 217 % Vickersovy tvrdosti oproti základnímu materiálu. Nejnižší hodnotu má TiN 625 HV, kde to je pouze o 34 % vyšší než základní materiál. Povlak TiB₂ je na tom podobně jako TiN. Zbývající povlaky jsou vyšší o 96 % u CrN a o 117 % u DLC Comp. TiAlN vyšel podobně jako DLC Comp.



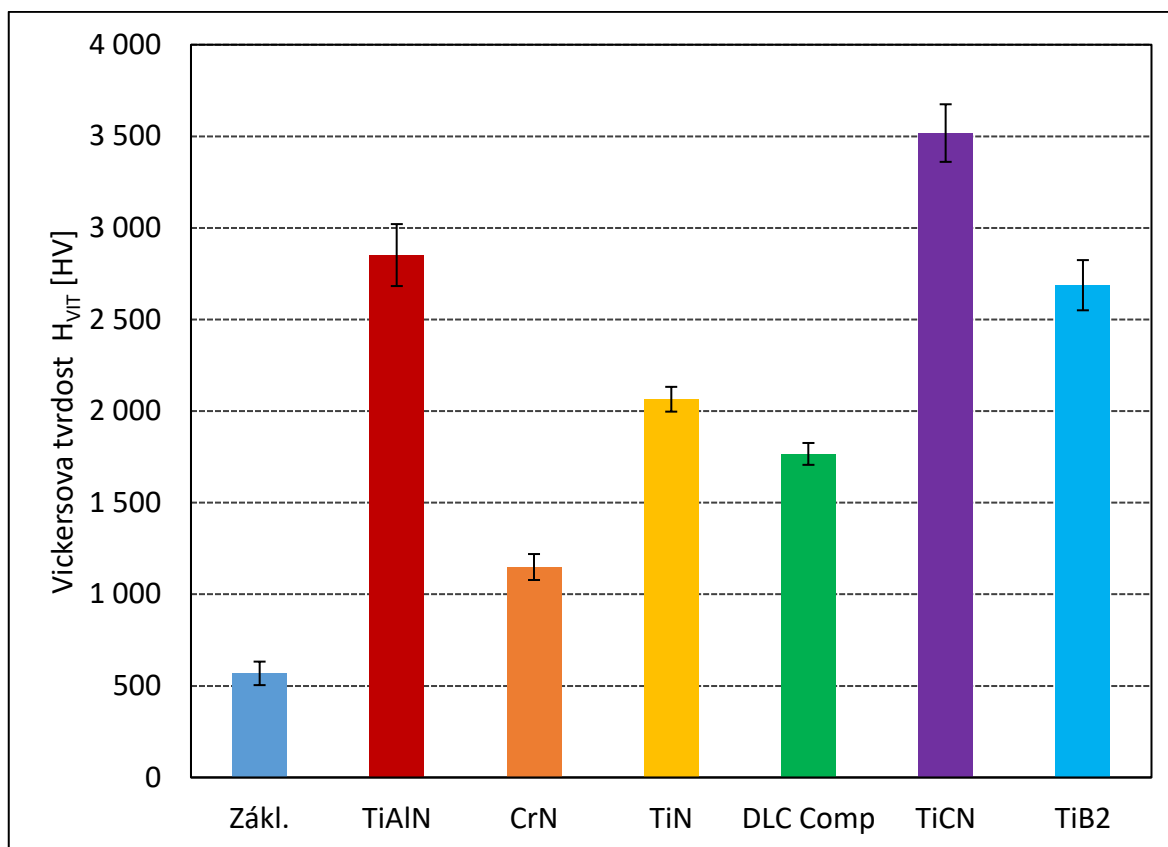
Obr. 25. Vickersova tvrdost pro nano-indentaci

Tab. 3. Vickersova tvrdost pro nano-indentaci

	H_{VT} [HV]						
Povlak	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	467	1 055	917	625	1 013	1 482	673
s	94	104	133	57	38	69	29

7.1.2 Ultra-nano-indentaci test

Pro ultra-nano-indentaci test z povlaků vychází nejnižší hodnota pro CrN 1 149 HV, který dosahuje o 102 % vyšší Vickersovy tvrdosti než základní materiál 568 HV. Povlak DLC Comp vyšel ještě o 109 % lépe, celkem tedy o 211 % více než základní materiál. Ještě lepších výsledků dosáhl povlak TiN, který má nárůst Vickersovy tvrdosti o 264 %. O 373 % vyšší Vickersovu tvrdost má povlak TiB₂, od kterého se TiAlN výrazně neliší. Nejvyšší Vickersova tvrdost byla naměřena jako u nano-indentaci testu pro povlak TiCN 3 518 HV, kde je nárůst o 519 %. Tyto údaje jsou shrnuty v Tab. 4. a graficky znázorněny na Obr. 26.



Obr. 26. Vickersova tvrdost pro ultra-nano-indentaci

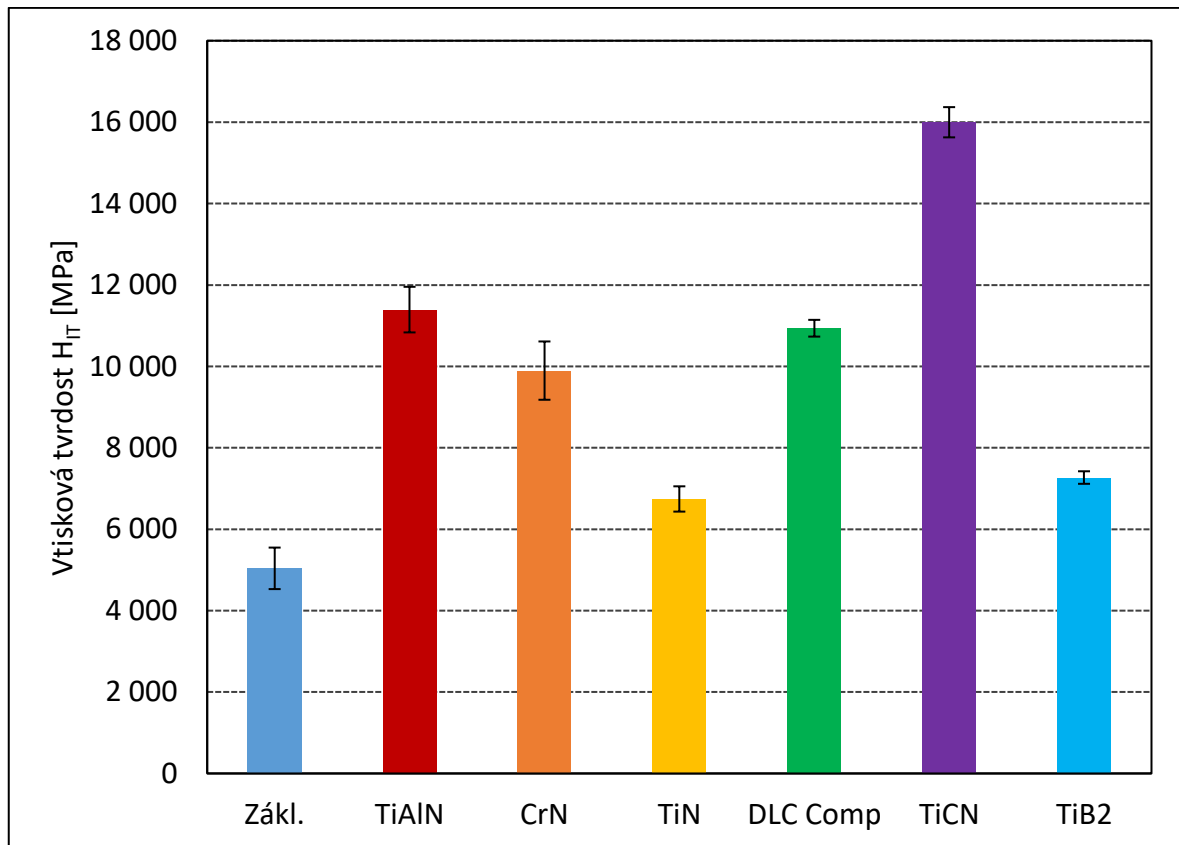
Tab. 4. Vickersova tvrdost pro ultra-nano-indentaci

	H _{VIT} [HV]						
Povlak	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	568	2 852	1 149	2 065	1 766	3 518	2 687
s	128	338	142	135	119	314	274

7.2 Vtisková tvrdost H_{IT}

7.2.1 Nano-indentaci test

Jak je vidět v Tab. 5. a na Obr. 27., tak nejvyšší vtiskovou tvrdost dosahuje TiCN 15 998 MPa, což je nárůst vůči základnímu materiálu o 217 %, který má 5 039 MPa. Jako druhý nejlepší povlak vychází TiAlN, který dosahuje nárustu 126 % a podobně vychází i DLC Comp. O trochu hůře je na tom povlak CrN s vyšší vtiskovou tvrdostí o 96 % než u základního materiálu. Nejnížší hodnota byla naměřena u povlaku TiN 6 743 MPa, kde je zlepšení pouze o 34 % a o trochu lépe vyšel povlak TiB₂.



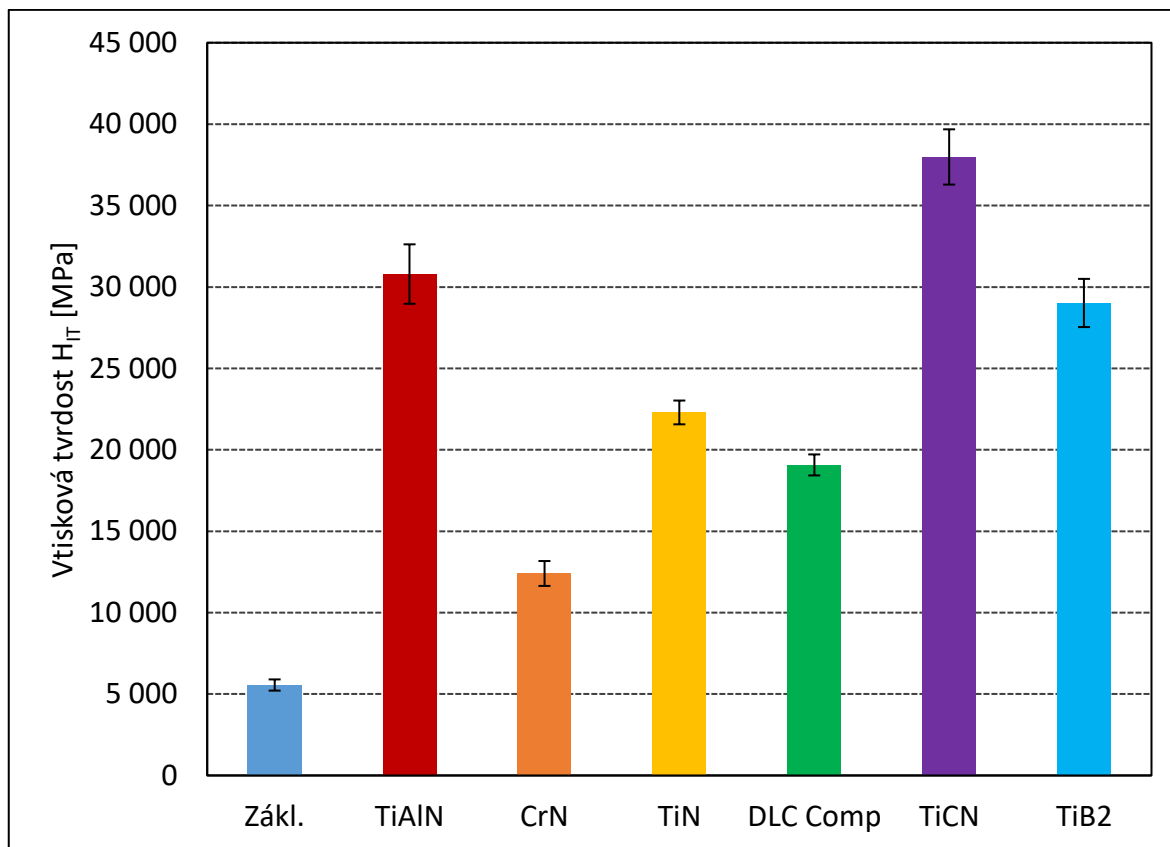
Obr. 27. Vtisková tvrdost pro nano-indentační test

Tab. 5. Vtisková tvrdost pro nano-indentační test

Povlak	H _{IT} [MPa]						
	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	5 039	11 395	9 897	6 743	10 937	15 998	7 269
s	1 020	1 120	1 433	621	412	742	308

7.2.2 Ultra-nano-indentační test

Pro ultra-nano-indentační test vtiskové tvrdosti jsou výsledky znázorněny na Obr. 28. a v Tab. 6., kde opět nejvyšší hodnotu má povlak TiCN 37 985 MPa, kde dochází k nárůstu 584 %. Ostatní povlaky mají jiné pořadí než u nano-indentačního testu, a nejnižší hodnotu zde má povlak CrN 12 405 MPa, ale i tak dosahuje lehce přes dvojnásobné zvětšení oproti základnímu materiálu, který má 5 555 MPa, přesněji více o 123 %. Druhý s nejnižší vtiskovou tvrdostí vyšel DLC Comp 19 072 MPa, kde je nárůst 243 %. Povlak CrN má o 58 % více, tedy o 301 % vyšší vtiskovou tvrdost. Jako druhý s nejvyšší vtiskovou tvrdostí je TiAlN 30 793 MPa s nárůstem o 454 % a povlak TiB₂ vyšel jen patrně méně než TiAlN.



Obr. 28. Vtisková tvrdost pro ultra-nano-indentaci

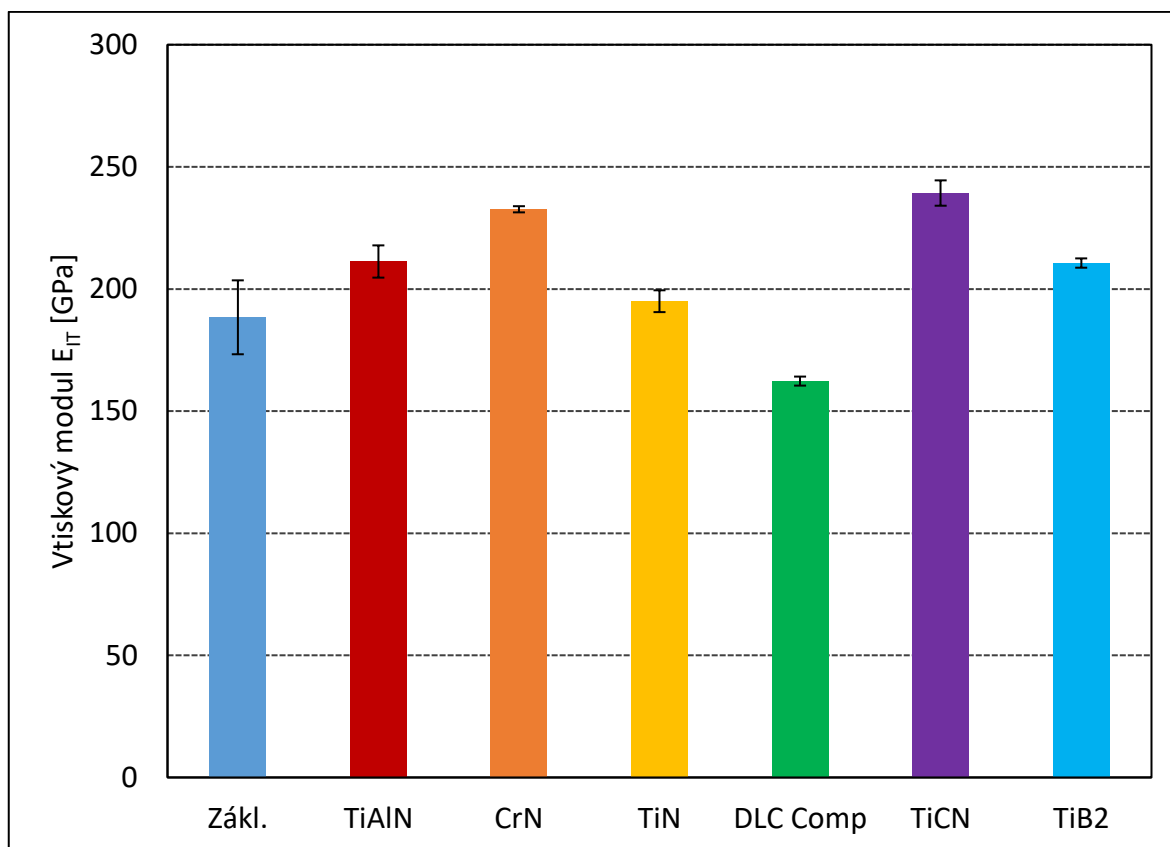
Tab. 6. Vtisková tvrdost pro ultra-nano-indentaci

Povlak	H _{IT} [MPa]						
	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	5 555	30 793	12 405	22 295	19 072	37 985	29 017
s	687	3 651	1 529	1 461	1 290	3 395	2 960

7.3 Vtiskový modul E_{IT}

7.3.1 Nano-indentaci test

Vtiskový modul pro nano-indentaci test je znázorněn na Obr. 29. a průměrné hodnoty jsou zapsány v Tab. 7. Lze vidět, že hodnoty se od sebe příliš neliší až na povlak DLC Comp, který je nejnižší o hodnotě 162 GPa, což je o 14 % méně než základní materiál 188 GPa a nejvyšší hodnotu má TiCN 239 GPa, s nárůstem o 27 %. Nejbližší TiCN je povlak CrN. Pvlaky TiAlN a TiB₂ mají stejný výsledek 211 GPa, dosahují o 12 % většího vtiskového modulu oproti základnímu materiálu. Zbývající povlak TiN vyšel skoro jako základní materiál, nárůst vtiskového modulu je pouze 4 %.



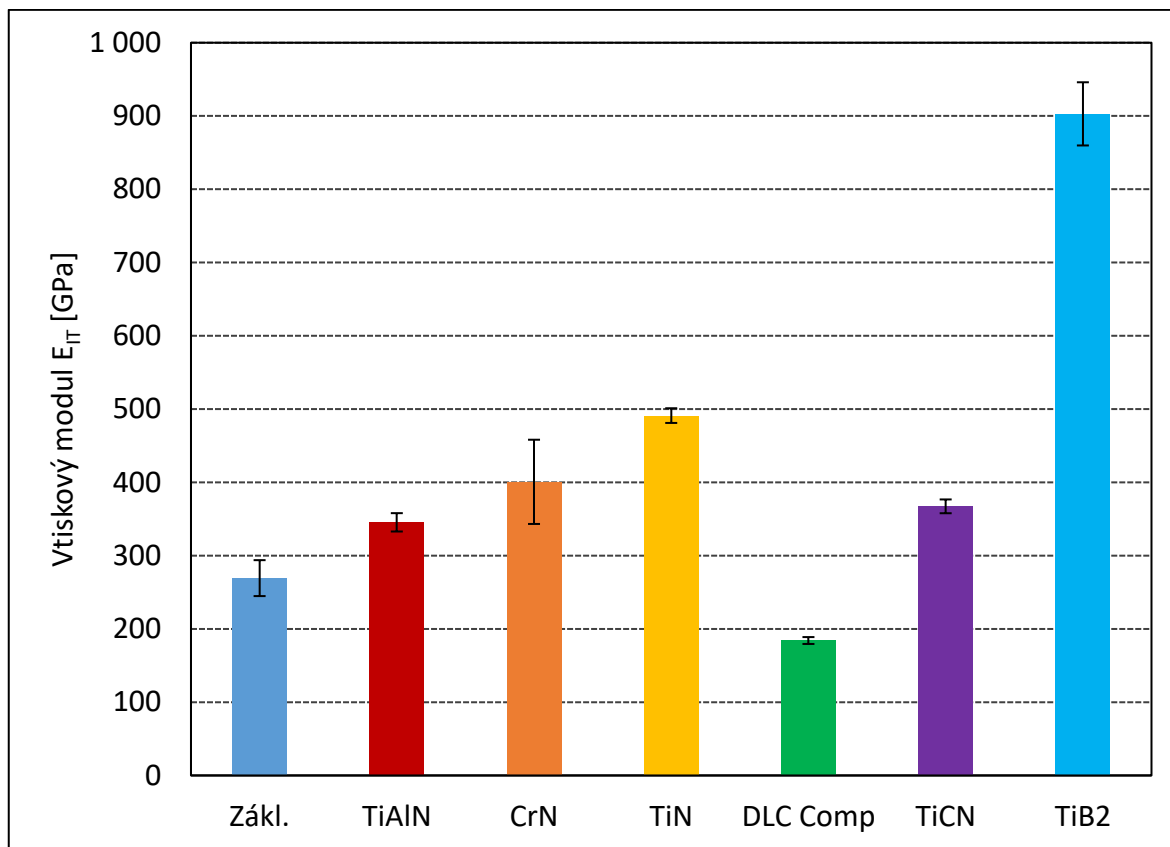
Obr. 29. Vtiskový modul pro nano-indentaci test

Tab. 7. Vtiskový modul pro nano-indentaci test

	E _{IT} [GPa]						
Povlak	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	188	211	233	195	162	239	211
s	30	13	3	9	4	10	4

7.3.2 Ultra-nano-indentaci test

Pro ultra-nano-indentaci test jsou výsledky shrnuty v Tab. 8. a graficky znázorněny na Obr. 30. Povlak DLC Comp má opět nejnižší hodnotu 184 GPa, což je o 32 % méně oproti základnímu materiálu 269 GPa. Oproti nano-indentaci testu zde povlak TiCN, se zvýšením o 36 %, nedosahuje nejvyšší hodnoty, ale povlak TiB₂ o hodnotě 903 GPa, s nárůstem o 236 %. Jako druhý povlak s nejvyšší vtiskovou tvrdostí je TiN 491 GPa, který vyšel o 82 % více. Následující je povlak CrN o nárůstu 49 % a pak TiCN 36 %. Povlak TiAlN je velmi podobný TiCN.



Obr. 30. Vtiskový modul pro ultra-nano-indentaci test

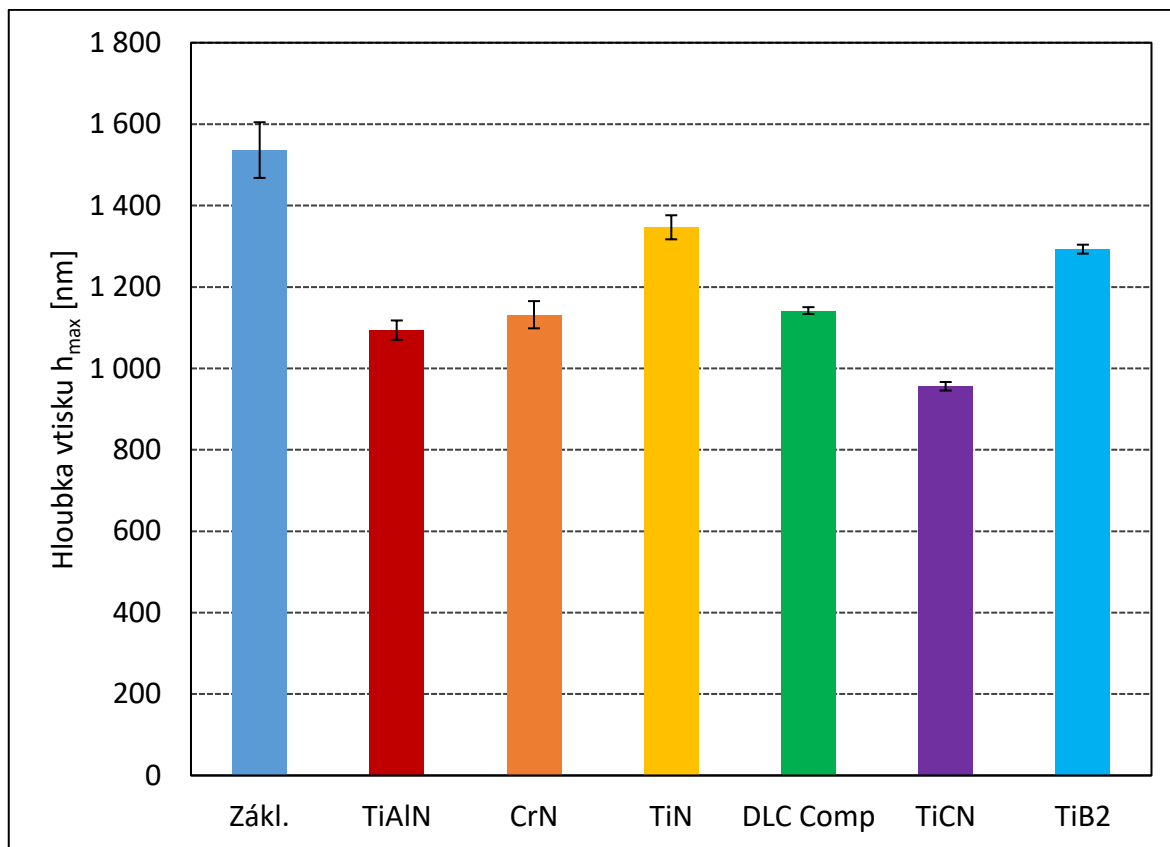
Tab. 8. Vtiskový modul pro ultra-nano-indentaci test

	E _{IT} [GPa]						
Povlak	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	269	345	401	491	184	367	903
s	49	25	115	20	9	19	86

7.4 Hloubka vtisku h_{\max}

7.4.1 Nano-indentaci test

Na Obr. 31. a v Tab. 9. lze vidět, že největší hloubku vtisku má základní materiál 1 536 nm. Z povlaků je to TiN o hodnotě 1 346 nm, podobně tomu je i u TiB₂, který má 1 293 nm. Velmi podobně vyšel povlak TiB₂ a nejnižší hodnotu má povlak TiCN 956 nm. Ostatní povlaky se víceméně od sebe moc neliší a dosahují okolo 1 100 nm hloubky vtisku.



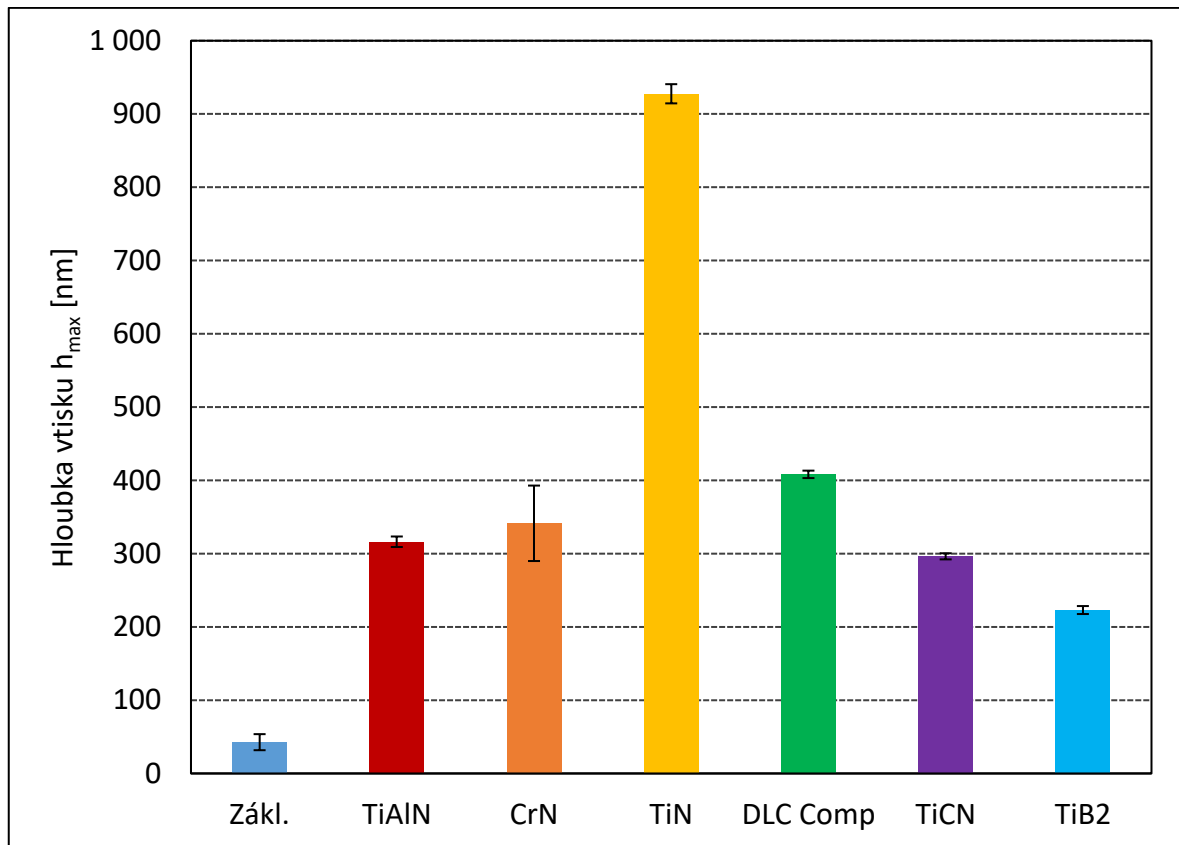
Obr. 31. Hloubka vtisku pro nano-indentaci test

Tab. 9. Hloubka vtisku pro nano-indentaci test

Povlak	h_{max} [nm]						
	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	1 536	1 094	1 132	1 347	1 142	956	1 293
s	137	48	67	59	17	21	22

7.4.2 Ultra-nano-indentaci test

Naměřené výsledky hloubky vtisku pro ultra-nano-indentaci test jsou znázorněny na Obr. 32. a v Tab. 10., kde lze vidět velmi malou hloubku vtisku základního materiálu 43 nm oproti povlakům, které se pohybují okolo 300 nm. Výjimkou je povlak TiN, kde hloubka vtisku je 928 nm. Jako druhý s nejvyšší hloubkou vtisku je DLC Comp 408 nm. Povlak CrN má 341 nm a povlak TiAlN má velmi podobný výsledek jako CrN. TiCN má ještě nižší hloubku a to 296 nm. Nejnižší hloubka vtisku z povlaků bylo naměřena u TiB₂ 223 nm.



Obr. 32. Hloubka vtisku pro ultra-nano-indentaci ní test

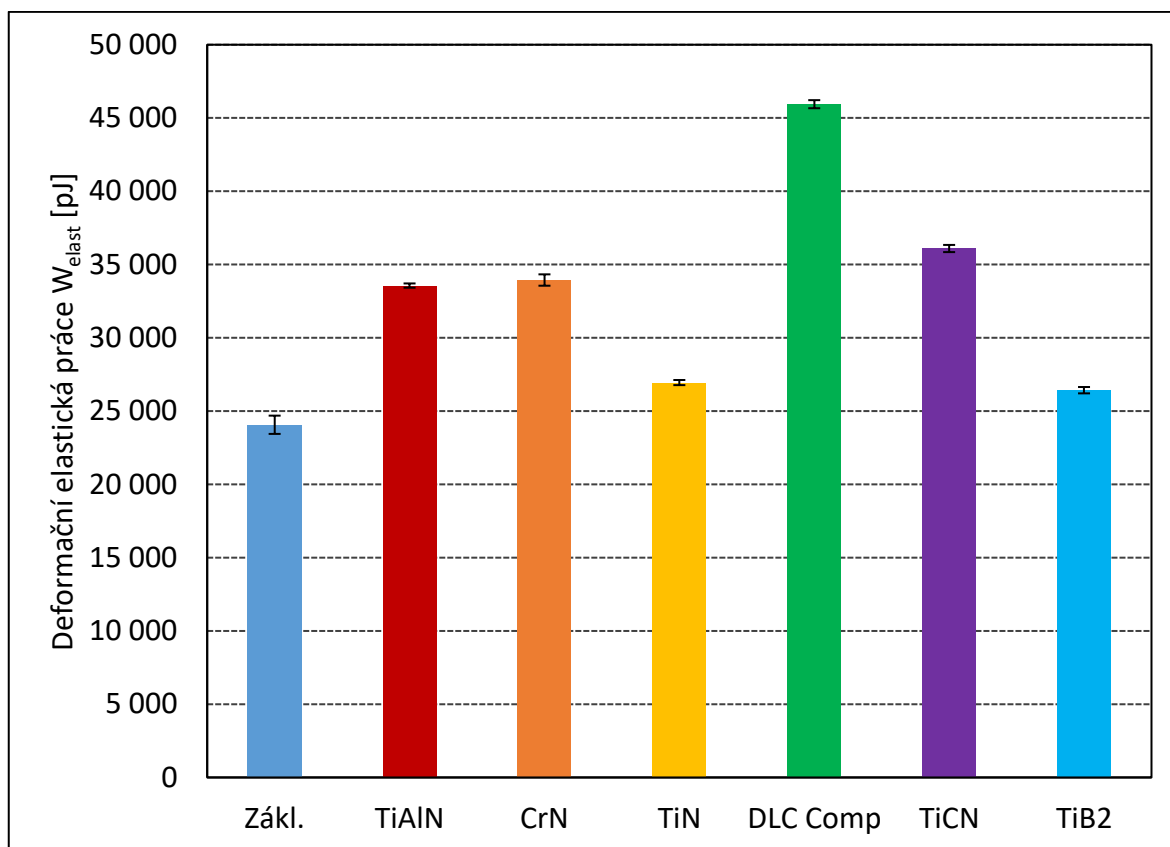
Tab. 10. Hloubka vtisku pro ultra-nano-indentaci ní test

Povlak	h_{\max} [nm]						
	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	43	316	341	928	408	296	223
s	22	14	103	26	10	8	11

7.5 Deformační elastická práce W_{elast}

7.5.1 Nano-indentaci ní test

Obr. 33. znázorňuje deformační elastickou práci pro nano-indentaci ní test, průměrné hodnoty jsou zapsány v Tab. 11. Lze vidět, že nejvyšší elastickou deformační práci dosahuje povlak DLC Comp 45 943 pJ, což je nárůst o 90 % vůči základnímu materiálu, který vyšel 24 067 pJ, a nejnižší z povlaků TiB₂ o hodnotě 26 427 pJ s nárůstem pouze o 10 %. Velmi podobně jako TiB₂ je i povlak TiN. Po DLC Comp nejvyšší deformační elastické práce dosáhl povlak TiCN 36 095 pJ s nárůstem o 49 %. Zbývající povlaky TiAlN a CrN se výrazně od sebe neliší a mají nárůst okolo 40 %.



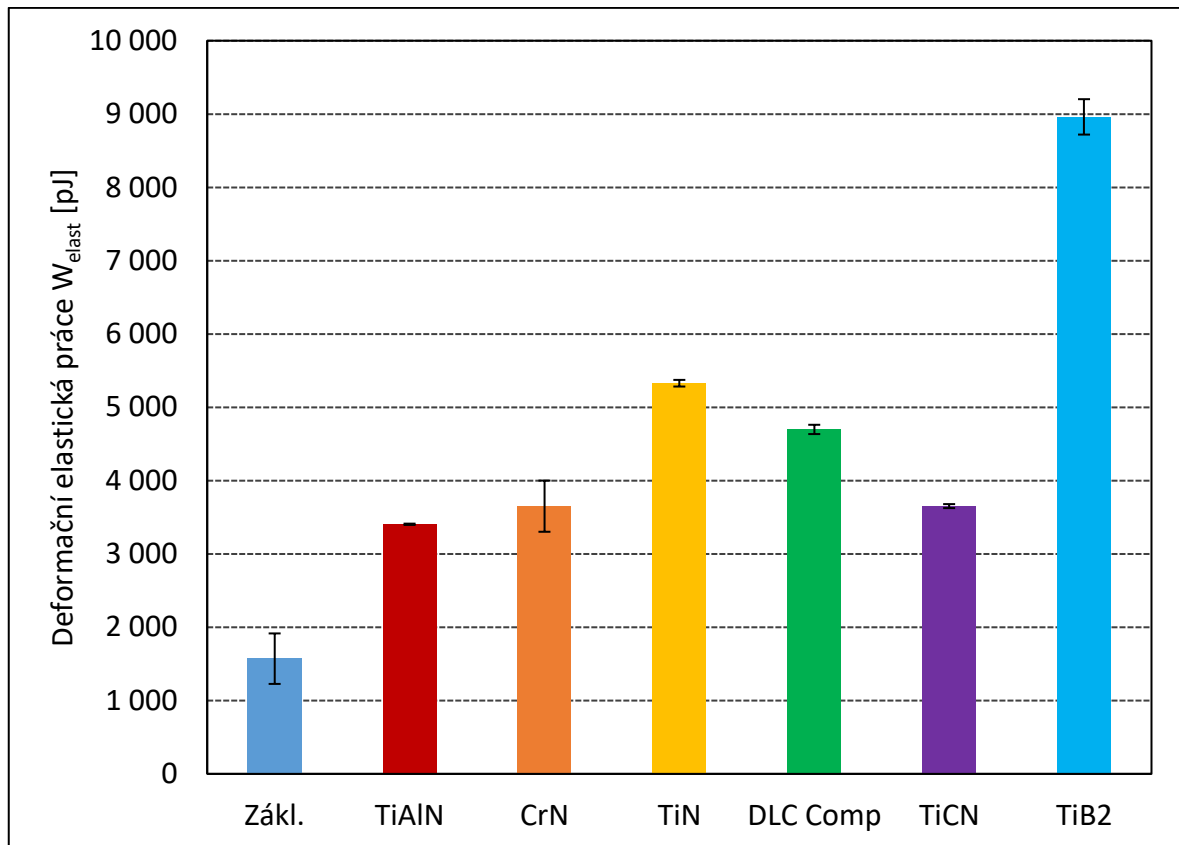
Obr. 33. Deformační elastická práce pro nano-indentaci test

Tab. 11. Deformační elastická práce pro nano-indentaci test

W_{elast} [pJ]							
Povlak	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	24 067	33 566	33 944	26 947	45 943	36 095	26 427
s	1 245	291	776	350	551	490	434

7.5.2 Ultra-nano-indentaci test

Pro ultra-nano-indentaci test deformační elastické práce, znázorněné na Obr. 34. a hodnoty zapsány v Tab. 12., vyšel povlak TiB₂ s nejvyšší hodnotou 8 961 pJ, která se od ostatních povlaků výrazně liší, jehož nárůst je 470 % od základního materiálu 1 571 pJ. Druhý největší je TiN, který má o 3 633 pJ méně a nárůst klesl o dvojnásobek na 239 %. Poté následuje DLC Comp s nárůstem o 199 %. S nejmenší hodnotou vyšel povlak TiAlN 3 404 pJ s nárůstem o 116 %, který se o moc neliší od povlaků CrN a TiCN, jež dosáhly zvýšení o 132 %.



Obr. 34. Deformační elastická práce pro ultra-nano-indentaci test

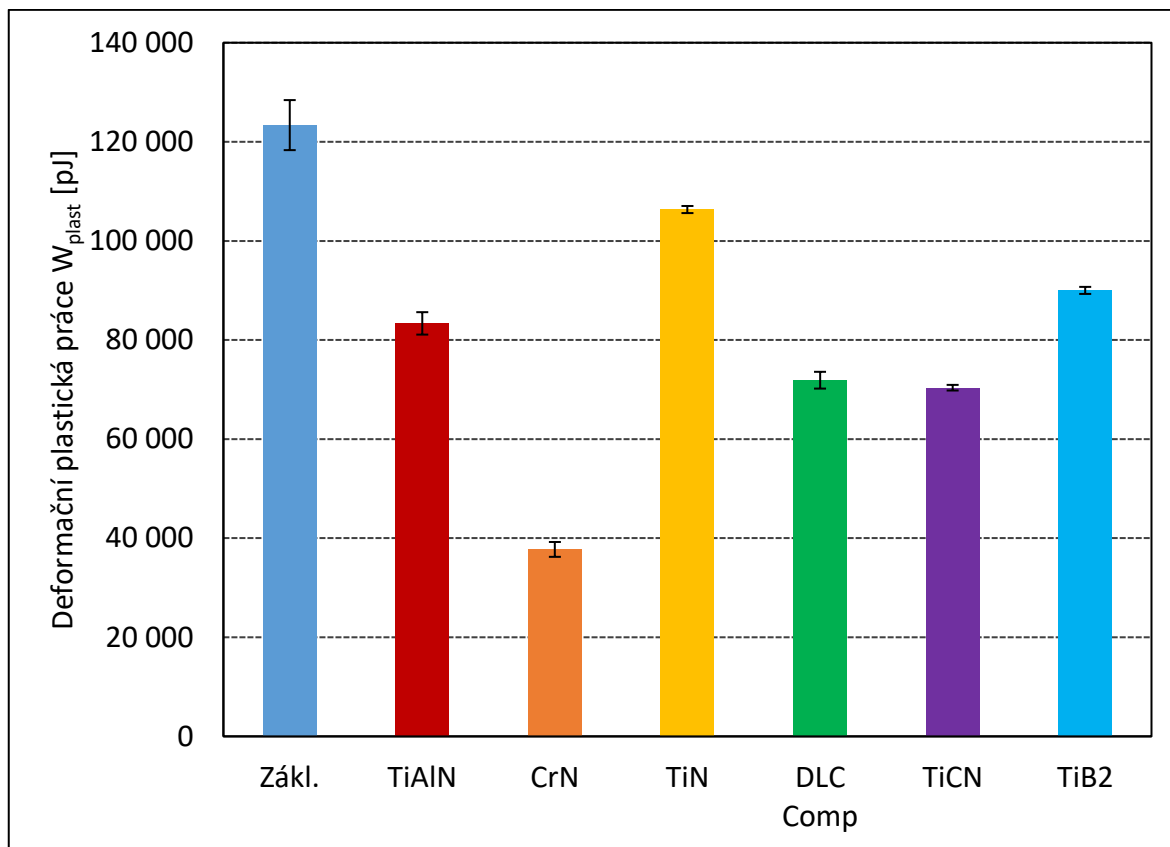
Tab. 12. Deformační elastická práce pro ultra-nano-indentaci test

W_{elast} [pJ]							
Povlak	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	1 571	3 404	3 651	5 328	4 698	3 652	8 961
s	689	18	698	91	127	54	483

7.6 Deformační plastická práce W_{plast}

7.6.1 Nano-indentaci test

Základní materiál vyšel 123 375 pJ, což je nejvyšší hodnota deformační plastické práce pro nano-indentaci test. Toto je znázorněno na Obr. 35. a v Tab. 13., kde lze vidět že nejnižší hodnotu má povlak CrN 37 736 pJ, což je celkem velký rozdíl od základního materiálu, kde pokles činí 71 %. Další největší pokles je u povlaků DLC Comp a TiCN, které dosahují skoro o 50 % méně. O 37 % méně klesl povlak TiAlN a TiB₂ o 32 %. Nejvyšší hodnotu z povlaků má TiN, která je mnohem blíže k základnímu materiálu o hodnotě 106 335 pJ, což je pokles pouze o 20 %.



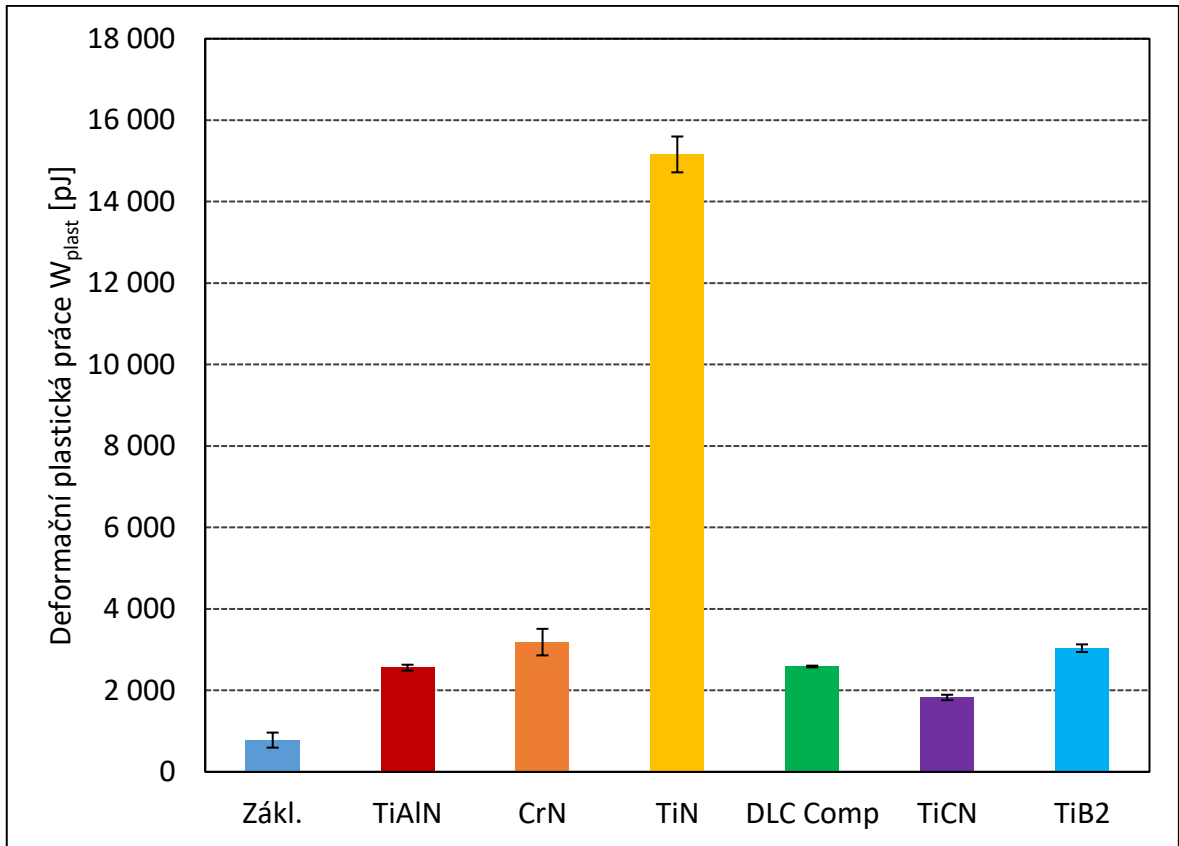
Obr. 35. Deformační plastická práce pro nano-indentaci

Tab. 13. Deformační plastická práce pro nano-indentaci

W _{plast} [pJ]							
Povlak	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	123 375	83 357	37 736	106 335	71 889	70 374	90 013
s	10 100	4 529	2 996	1 432	3 388	1 135	1 419

7.6.2 Ultra-nano-indentaci test

Pro ultra-nano-indentaci test stále vychází povlak TiN s nejvyšší hodnotou 15 159,42 pJ, což činí nárůst o 1 846 % oproti základnímu materiálu 779 pJ. Ostatní povlaky až na TiCN se pohybují okolo 2 500 až 3 000 pJ. Povlaky TiAlN a DLC Comp vyšly víceméně stejně s nárůstem okolo 230 %. U TiB₂ je nárůst o 290 % a CrN 309 %. Na povlaku TiCN byla naměřena nejnižší hodnota z povlaků 1 826,74 pJ, kde byl nárůst 135 %. Oproti nano-indentaci testu se zde změnila nejvýrazněji výsledky základního materiálu, jež z nejvyšší hodnoty klesl na nejnižší ze všech zkoumaných vzorků. Tyto údaje jsou znázorněny na Obr. 36. a uvedeny v Tab. 14.



Obr. 36. Deformační plastická práce pro ultra-nano-indentaci test

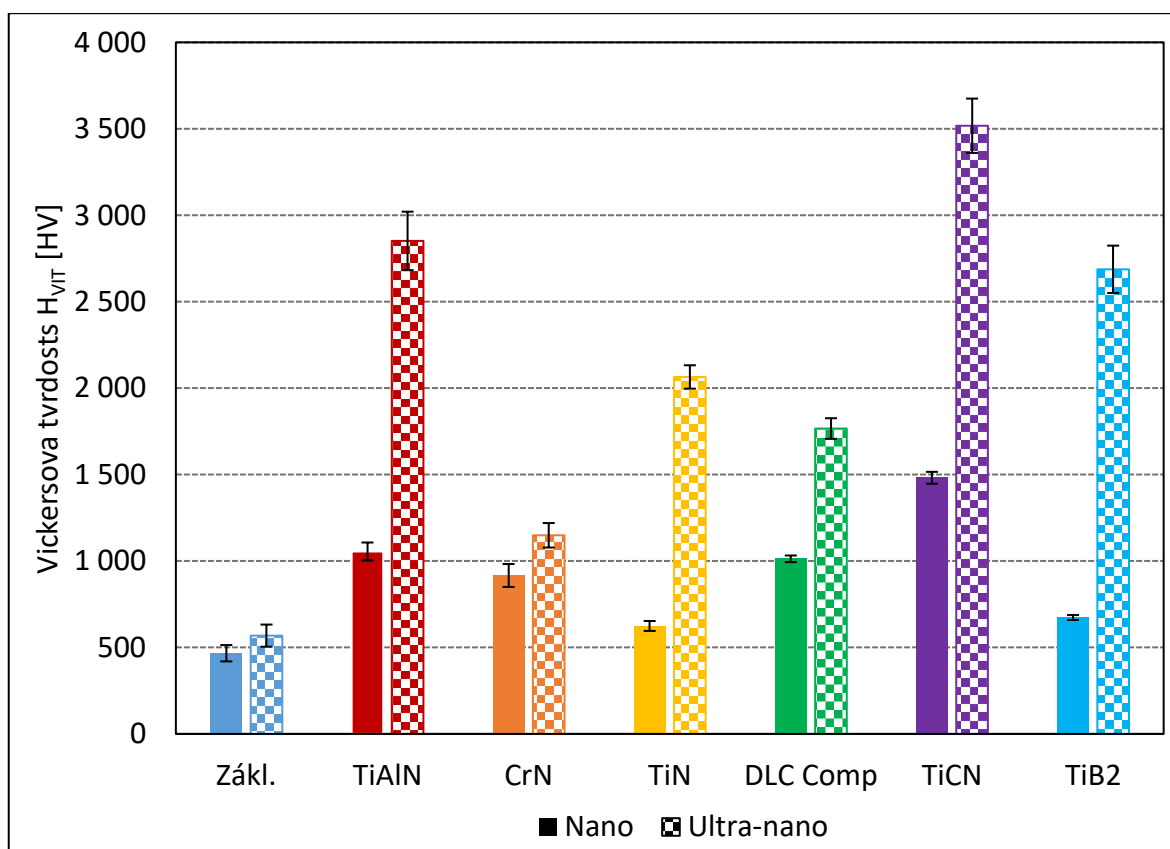
Tab. 14. Deformační plastická práce pro ultra-nano-indentaci test

W_{plast} [pJ]							
Povlak	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
\bar{x}	779	2 558	3 186	15 159	2 587	1 827	3 036
s	369	146	651	880	42	134	188

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Vzhledem k odlišným výsledkům nano a ultra-nano-indentčního testu, byly tyto dvě metody mezi sebou porovnány a v nadcházejících grafech znázorněny tak, že nano-indentční test je plnou barvou a ultra-nano-indentční test je šachovnicově vybarven. V grafech jsou znázorněny jak průměry, tak i jejich chybové úsečky. Pod grafy jsou poté příslušné tabulky s průměry a směrodatnými odchylkami.

Vickersova tvrdost znázorněna na Obr. 37. má v Tab. 15. pro porovnání i hodnoty Vickersovy tvrdosti udávány výrobcem. Pro nano-indentční test nevyšla ani jedna hodnota v rozmezí udávané výrobcem, ale při ultra-nano-indentčním testu se už hodnoty nachází buď v rozmezí nebo blízko, toto může být ovlivněno substrátem. V obou případech má nejvyšší Vickersovu tvrdost povlak TiCN. Při nano-indentčním testu měl nejnižší vtiskovou tvrdost z povlaků TiN a poté TiB₂. Při ultra-nano-indentčním testu tomu bylo jinak a nejnižší vtiskovou tvrdost má povlak CrN, a poté DLC Comp. Zcela nejnižší Vickersovu tvrdost ze všech vzorků vykazuje základní materiál, který se v obou testech o moc neliší. Je viditelné, že při menším zatížení Vickersova tvrdost roste.

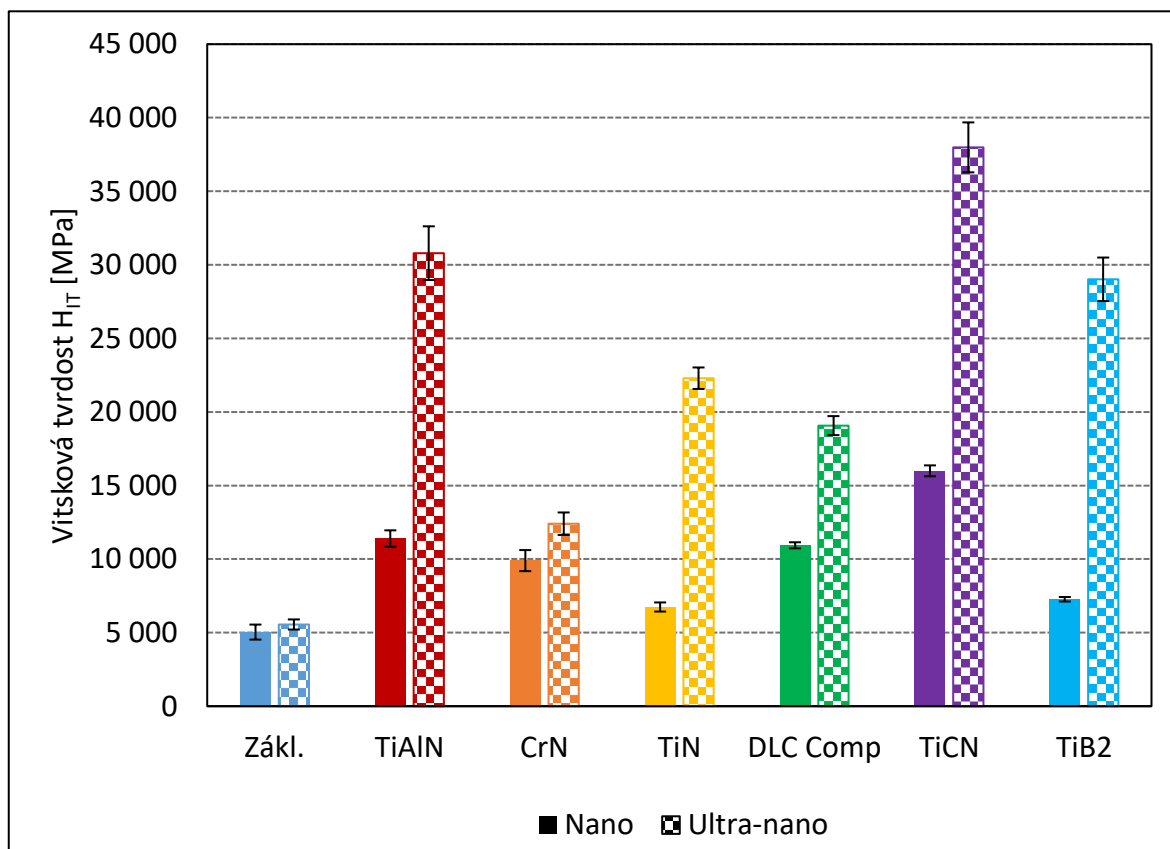


Obr. 37. Vickersova tvrdost

Tab. 15. Vickersova tvrdost

		H_{VIT} [HV]						
Povlak	Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂	
Výrobce		2 500 – 3 500	1 500 – 2 500	2 500	2 000 – 4 000	3 000	2 500 – 3 200	
Nano	\bar{x}	467	1 055	917	625	1 013	1 482	673
	s	94	104	133	57	38	69	29
Ultra-nano	\bar{x}	568	2 852	1 149	2 065	1 766	3 518	2 687
	s	128	338	142	135	119	314	274

Na Obr. 38. a Tab. 16. lze vidět, že povlak TiCN má v obou metodách nejvyšší hodnotu vtiskové tvrdosti, stejně jako u Vickersovy tvrdosti. Také vychází, že nejnižší hodnotu pro nano-indentanční test má povlak TiN a pak TiB₂, ale pro ultra-nano-indentanční test CrN a poté DLC Comp. Opět ze všech zkušebních vzorků má nejnižší vtiskovou tvrdost základní materiál, který vyšel velmi podobně v obou testech, liší se pouze o 500 MPa. Dále je viditelné, že při ultra-nano-indentančním testu, což znamená při menším zatížení dosahuje vtisková tvrdost vyšších hodnot, stejně jako u Vickersovy tvrdosti.

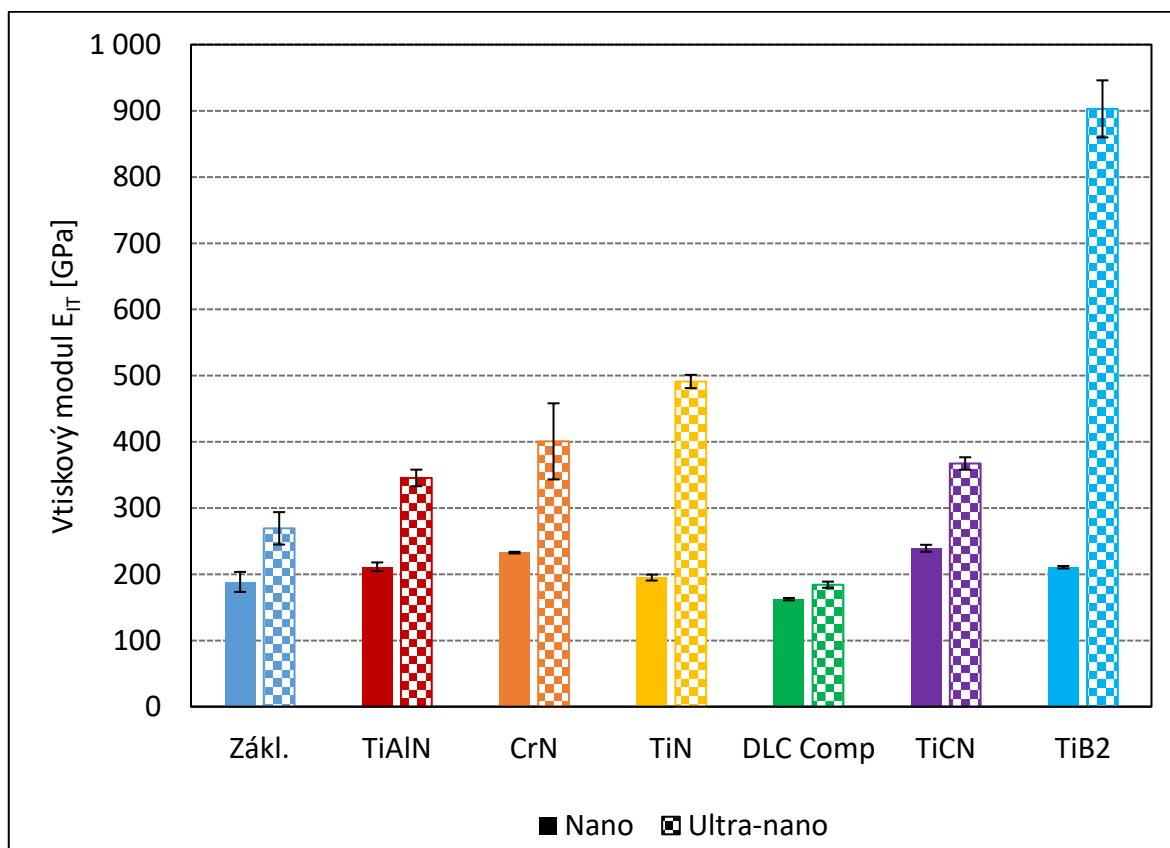


Obr. 38. Vtisková tvrdost

Tab. 16. Vtisková tvrdost

Povlak		H_{IT} [MPa]						
		Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
Nano	\bar{x}	5 039	11 395	9 897	6 743	10 937	15 998	7 269
	s	1 020	1 120	1 433	621	412	742	308
Ultra-nano	\bar{x}	5 555	30 793	12 405	22 295	19 072	37 985	29 017
	s	687	3 651	1 529	1 461	1 290	3 395	2 960

Vtiskový modul se u všech vzorků zvětšuje při nižším zatížení, ale u povlaku DLC Comp nedochází ke značnému rozdílu, jak lze vidět na Obr. 39. a v Tab. 17. Tento rozdíl je pouhých 20 GPa. K výrazné změně dochází u TiB₂, kde dochází ke zvýšení až o 700 GPa. Při nano-indentacním testu také není vtiskový modul výrazně odlišný od základního materiálu. Zatímco v ultra-nano-indentacním testu je rozdíl značnější, avšak povlak DLC Comp v obou případech má nižší hodnotu jak základní materiál.

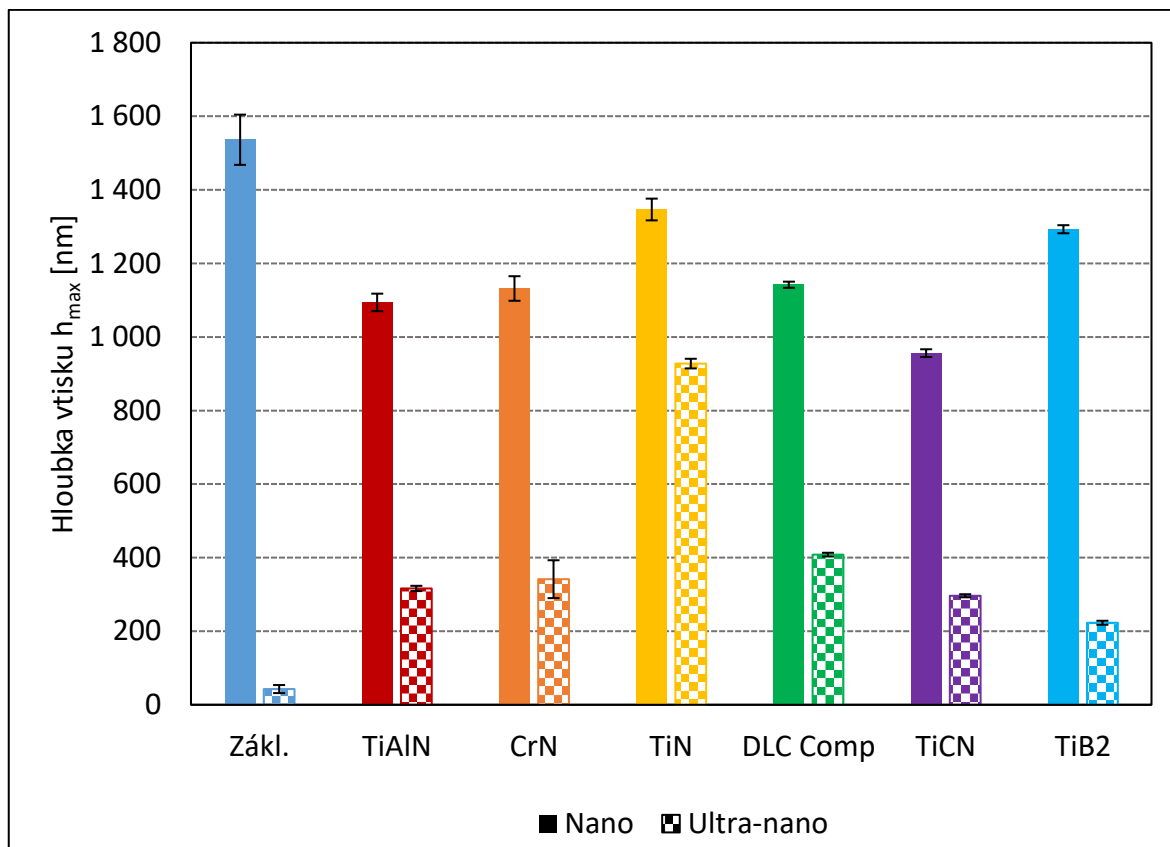


Obr. 39. Vtiskový modul

Tab. 17. Vtiskový modul

Povlak		E_{IT} [GPa]						
		Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
Nano	\bar{x}	188	211	233	195	162	239	211
	s	30	13	3	9	4	10	4
Ultra-nano	\bar{x}	269	345	401	491	184	367	903
	s	49	25	115	20	9	19	86

Tloušťka povlaku je výrobcem udávána v určitém rozmezí. U všech povlaků je minimální vrstva 1 000 nm, až na TiB₂, kde minimální tloušťka je 2 000 nm. Jak lze vidět v Tab. 18. a na Obr. 40., při nano-indentacním testu přesahují všechny hodnoty 1 000 nm, až na TiCN a TiB₂, kde sice u TiB₂ je vyšší hloubka vtisku jak 1 000 nm, ale minimální tloušťka povlaku je 2 000 nm. Z toho se může vyvodit, že ačkoliv je to pouze dolní hranice rozmezí tloušťky povlaku, může být nano-indentacní test nevhodný, pokud by bylo naneseno minimum udáváno výrobcem, protože indetor pronikne skrz povlak do základního materiálu a už neměří vlastnosti pouze povlaku, ale i materiálu. Při ultra-nano-indentacním testu je hloubka vtisku mnohem nižší a vždy pod hranicí minimální tloušťky povlaku. Pouze u TiN je hloubka vtisku pro ultra-nano-indentacní test irelevantně blízko hranici. Největší hloubky vtisku dosahuje pro nano-indentacní test základní materiál a z povlaků DLC Comp a nejnižší hloubku vtisku TiCN. Pro ultra-nano-indentacní test je nejvyšší již zmiňovaný TiN a nejnižší TiCN.

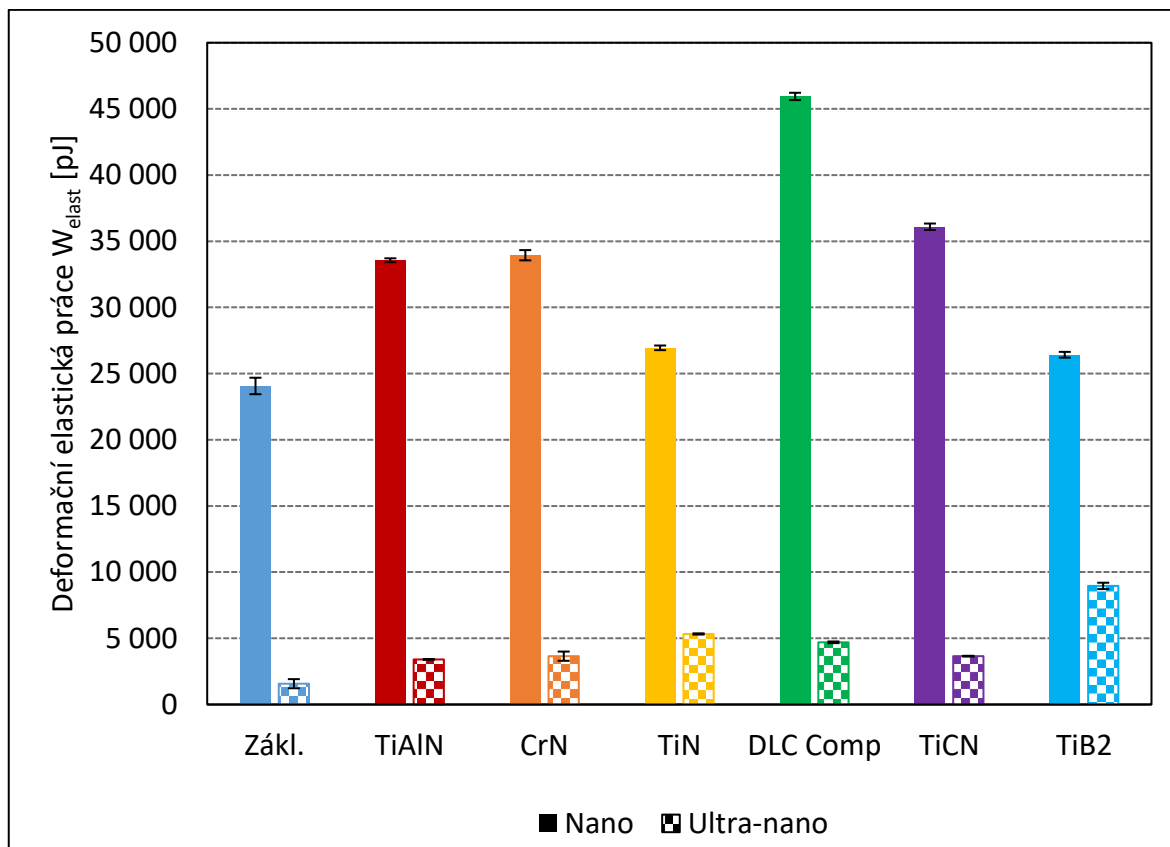


Obr. 40. Hloubka vtisku

Tab. 18. Hloubka vtisku

		h_{max} [nm]						
Povlak		Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
Nano	\bar{x}	1 536	1 094	1 132	1 347	1 142	956	1 293
	s	137	48	67	59	17	21	22
Ultra-nano	\bar{x}	43	316	341	928	408	296	223
	s	22	14	103	26	10	8	11

U deformační elasticke práce, která je uvedena na Obr. 41. a v Tab. 19., je zřetelný rozdíl mezi nano-indentacním testem, který vychází mnohonásobně vyšší než u ultra-nano-indentacního testu. Nejnížší hodnotu v obou testech elasticke práce má základní materiál, a v nano-indentacním testu mají podobné výsledky TiN a TiB₂. Naopak TiB₂ a po něm TiN vyšly s největší elasticke deformační prací pro ultra-nano-indentacní test. Při nano-indentacním testu má nejvyšší hodnotu DLC Comp.

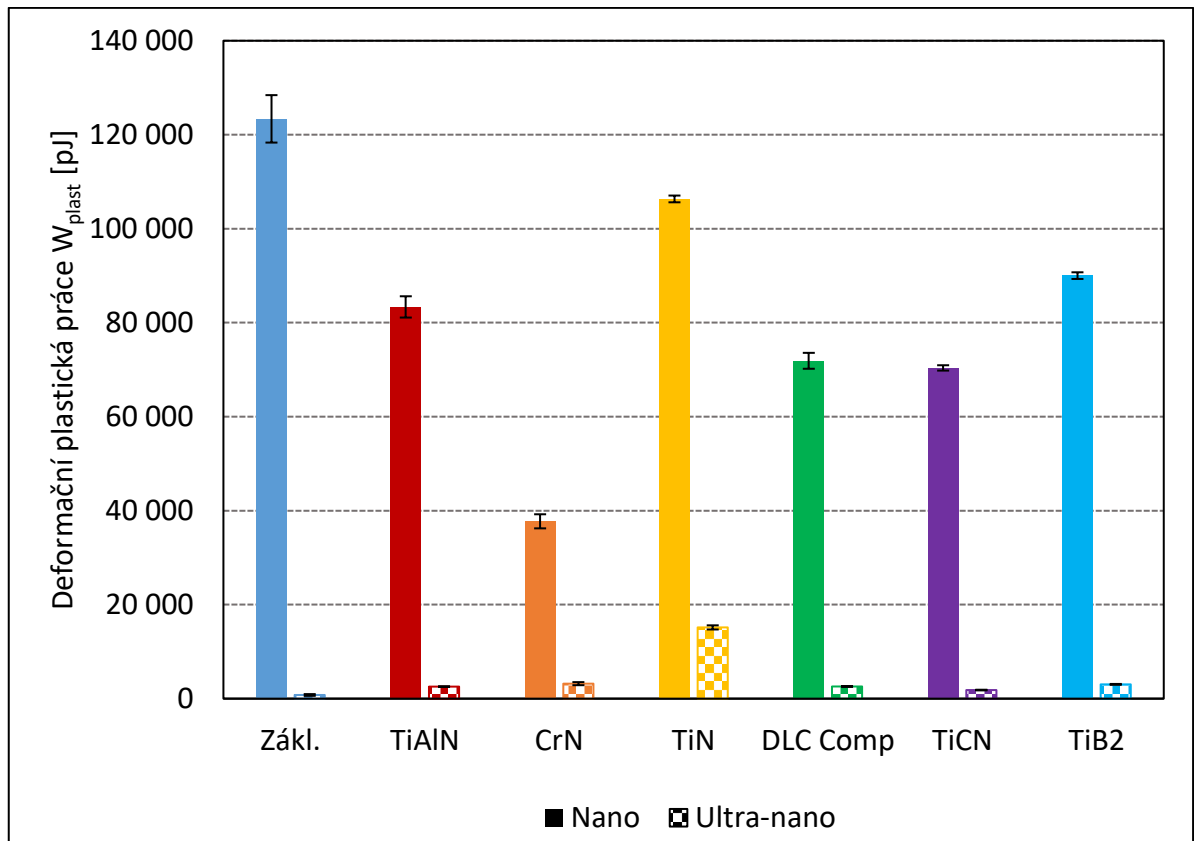


Obr. 41. Deformační elastická práce

Tab. 19. Deformační elastická práce

		$W_{\text{elast}} [\text{pJ}]$						
Povlak		Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
Nano	\bar{x}	24 067	33 566	33 944	26 947	45 943	36 095	26 427
	s	1 245	291	776	350	551	490	434
Ultra-nano	\bar{x}	1 571	3 404	3 651	5 328	4 698	3 652	8 961
	s	689	18	698	91	127	54	483

I deformační plastická práce je pro ultra-nano-indentaci test mnohonásobně nižší, jak lze vidět na Obr. 42 a v Tab. 20. Největší rozdíl vzniká u základního materiálu, kde pro nano-indentaci test má nejvyšší hodnotu deformační plastická práce, ale u ultra-nano-indentacím testu nejnižší. Rozdíl mezi výsledky je přes 120 000 pJ. Nejvyšší deformační plastickou práci pro povlaky má v obou metodách zkoušení TiN, nejnižší pro nano-indentaci test CrN a ultra-nano-indentaci test TiCN.



Obr. 42. Deformační plastická práce

Tab. 20. Deformační plastická práce

		$W_{\text{plast}} [\text{pJ}]$						
Povlak		Zákl.	TiAlN	CrN	TiN	DLC Comp	TiCN	TiB ₂
Nano	\bar{x}	123 375	83 357	37 736	106 335	71 889	70 374	90 013
	s	10 100	4 529	2 996	1 432	3 388	1 135	1 419
Ultra-nano	\bar{x}	779	2 558	3 186	15 159	2 587	1 827	3 036
	s	369	146	651	880	42	134	188

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá měřením mechanických vlastností povlaků s porovnáním se základním materiálem (1.2343). Na základní materiál byly nanесeny povlaky TiAlN, CrN, TiN, DLC Comp metodou PVD a TiB₂ metodou PACVD. Mechanické vlastnosti se zjišťovali instrumentovanou zkouškou tvrdosti DSI (dle normy ČSN EN ISO 14577) na přístroji firmy Anton-Paar. Prováděl se nano (250 mN) a ultra-nano-indentanční test (50 mN). Na každém vzorku proběhlo 10 měření, která se zprůměrovala a poté graficky znázornila a vyhodnotila.

Pomocí ultra-nano-indentančního testu se získaly přesnější hodnoty, než u nano-indentančního testu, u kterého mohly být výsledky ovlivněny základním materiálem z hlediska hloubky vtisku, protože by se zde neporovnávaly parametry pouze povlaků, ale určitého spojení povlaku se základním materiálem.

Z měření se zjistilo, že z hlediska vtiskové tvrdosti na tom byl nejlépe povlak TiCN a nejhůře CrN, který i tak vykazoval větší tvrdost než základní materiál. Podobně tomu bylo i s výsledky Vickersovy tvrdosti. Dle vtiskového modulu dosáhl největší hodnoty TiB₂, který dosáhl vysokých hodnot také u tvrdosti. Z toho lze usoudit, že nejlepší mechanické vlastnosti má povlak TiB₂.

Jde vidět, že povlakování v dutinách formy má veliký význam, protože mnohem více vydrží, a nepotřebuje tak častou údržbu. To rapidně zvýší výkonost forem a sníží náklady na celkovou údržbu. Výsledky bakalářské práce potvrzují, proč se povlakování v dnešní době tolik využívá a také rozvíjí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOBČÍK, Ladislav a kol. *Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů*. Díl 1. 2. opr. vyd. Brno: Uniplast, 1999, 134 s.
- [2] BOBČÍK, Ladislav a kol. *Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů*. Díl 2. 1. vyd. Brno: Uniplast, 1999, 214 s.
- [3] PTÁČEK, Luděk, a kol. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1 – 1. díl*. 4. vyd. Praha: SCIENTIA, 2007. ISBN 978-80-96960-26-5.
- [6] Meusburger. [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: https://www.meusburger.com/CS/CZ/media/DOC_INF_1-2343-ESU_IN.pdf
- [7] Bogner. [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: http://www.bogner.cz/files/files/Materialovy_list_1.2343.pdf
- [8] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3 – 2. díl Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 2. vyd. Praha: SCIENTIA, 2005. ISBN 80-7183-336-3.
- [9] BOUZAKIS, Konstantinos-Dionysios, Emmanouil BOUZAKIS, Nikolaos MICHAELIDIS, Dirk BIERMANN a Rachid M'SAOUBI. *Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization*. CIRP Annals [online]. 2012, 61(2), 703-723 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612002053>
- [10] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů, teorie a praxe*. 1. vyd. Praha: Grada, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [11] *Současnost a trendy povlakování technologií PVD* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2003 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>
- [12] HUMÁR, Antonín. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia VUT, 2003 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf

- [13] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [14] KŘÍŽ, Antonín. *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam – materiálový výzkum, 2005 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
- [15] Ionbond. *CVD technologie* [online]. Ionbond [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.ionbond.com/cz/technologie/cvd/>
- [16] ČVUT. *Metody depozice povlaků a tenkých vrstev* [online]. ČVUT [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_7.pdf
- [17] HOREJŠ, Slavomír. *Povlakování nástrojů metodou PACVD* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2003 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-nastroju-metodou-pacvd.html>
- [18] LUKOVIVC, Imrich. *Konstrukční materiály a technologie*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. 273 s.
- [19] PTÁČEK, Luděk, a kol. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [20] BALTÁ CALLEJA, F. J. a Stojko Christov FAKIROV. *Microhardness of polymers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, xii, 237 s. ISBN 0-521-64218-3.
- [21] ČSN EN ISO 14577-1. *Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – Část 1: Zkušební metoda*. Leden 2016. 44 s.
- [22] VÚHŽ. *PVD/PACVD/CVD* [online]. 2017 VÚHŽ [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.vuhz.cz/images/povlaky/pdf/prospekt-povlakovna-brozura.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Al	Hliník.
B	Bór.
Bi	Bismut.
C	Uhlík.
C_{IT} [%]	Vtiskové tečení.
Co	Kobalt.
Cr	Chróm.
CrN	Nitrid chromu.
Cu	Měď.
CVD	Chemická depozice par.
ČSN	Česká státní norma.
DLC	Diamantu podobné vrstvy.
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti.
E_{IT} [GPa]	Vtiskový modul.
EN	Evropská norma.
F [N]	Zatížení.
Fe	Železo.
Fe ₃ C	Karbid železa.
HB	Tvrlost podle Brinella.
H_{IT} [MPa]	Vtisková tvrdost.
HM	Tvrlost podle Martense.
HR	Tvrlost podle Rockwella.
HV	Tvrlost podle Vickerse.
H_{VIT} [HV]	Vickersova tvrdost.

ISO	Mezinárodní norma.
La	Lanthanidy.
Mn	Mangan.
Mo	Molybden.
Nb	Niob.
Ni	Nikl.
η_{IT} [%]	Koeficient zpětné deformace.
P	Fosfor.
PA-CVD	Chemická depozice par pomocí plazmatu.
Pb	Olovo.
PE	Polyethylen.
PP	Polypropylen.
PVD	Fyzikální depozice par.
R_e [MPa]	Mez kluzu.
R_{IT} [%]	Vtisková relaxace.
R_m [MPa]	Pevnost v tahu.
S	Síra.
Se	Selen.
Si	Křemík.
Te	Telur.
Ti	Titan.
TiAlN	Nitrid hliníku titanu.
TiB ₂	Diborid titanu.
TiCN	Karbid-nitrid titanu.
TiN	Nitrid titanu.
V	Vanad.

W	Wolfram.
W_{elast} [pJ]	Elastická deformační práce.
W_{plast} [pJ]	Plastická deformační práce.
W_{total} [pJ]	Celková deformační práce.
Zr	Zirkonium.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdělení kovových materiálů [4]</i>	14
<i>Obr. 2. Rovnovážný diagram železo-uhlík [3]</i>	16
<i>Obr. 3. Značení ocelí [5]</i>	17
<i>Obr. 4. Princip metod PVD a CVD [14]</i>	25
<i>Obr. 5. Napařování (vlevo) a naprašování (vpravo) [12]</i>	27
<i>Obr. 6. Iontová implantace [12]</i>	28
<i>Obr. 7. Princip povlakovacího zařízení pro metodu CVD [12]</i>	30
<i>Obr. 8. Princip zkoušky podle Brinella [18]</i>	33
<i>Obr. 9. Princip zkoušky podle Rockwella [5]</i>	34
<i>Obr. 10. Princip zkoušky podle Vickerse [18]</i>	35
<i>Obr. 11. Schématické znázornění zkušebního postupu [21]</i>	36
<i>Obr. 12. Vyjádření vtiskového tečení [21]</i>	38
<i>Obr. 13. Vyjádření vtiskové relaxace [21]</i>	39
<i>Obr. 14. Znázornění práce vnikacího procesu [21]</i>	40
<i>Obr. 15. Indentační tester firmy Anton-Paar</i>	43
<i>Obr. 16. Tvarová dutina formy</i>	44
<i>Obr. 17. Schéma měření</i>	44
<i>Obr. 18. Povlakovací teploty firmy VÚHŽ [22]</i>	45
<i>Obr. 19. Povlak TiAlN</i>	46
<i>Obr. 20. Povlak CrN</i>	47
<i>Obr. 21. Povlak TiN</i>	47
<i>Obr. 22. Povlak DLC Comp</i>	48
<i>Obr. 23. Povlak TiCN</i>	48
<i>Obr. 24. Povlak TiB₂</i>	49
<i>Obr. 25. Vickersova tvrdost pro nano-indentální test</i>	51
<i>Obr. 26. Vickersova tvrdost pro ultra-nano-indentální test</i>	52
<i>Obr. 27. Vtisková tvrdost pro nano-indentální test</i>	53
<i>Obr. 28. Vtisková tvrdost pro ultra-nano-indentální test</i>	54
<i>Obr. 29. Vtiskový modul pro nano-indentální test</i>	55
<i>Obr. 30. Vtiskový modul pro ultra-nano-indentální test</i>	56
<i>Obr. 31. Hloubka vtisku pro nano-indentální test</i>	57
<i>Obr. 32. Hloubka vtisku pro ultra-nano-indentální test</i>	58

<i>Obr. 33. Deformační elastická práce pro nano-indentací test</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 34. Deformační elastická práce pro ultra-nano-indentací test</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 35. Deformační plastická práce pro nano-indentací test</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 36. Deformační plastická práce pro ultra-nano-indentací test</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 37. Vickersova tvrdost</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 38. Vtisková tvrdost</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 39. Vtiskový modul</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 40. Hloubka vtisku</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 41. Deformační elastická práce.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 42. Deformační plastická práce</i>	<i>69</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Mezní obsahy legovací prvků [5]</i>	18
<i>Tab. 2. Složení oceli 1.2343 [7]</i>	24
<i>Tab. 3. Vickersova tvrdost pro nano-indentační test</i>	51
<i>Tab. 4. Vickersova tvrdost pro ultra-nano-indentační test</i>	52
<i>Tab. 5. Vtisková tvrdost pro nano-indentační test</i>	53
<i>Tab. 6. Vtisková tvrdost pro ultra-nano-indentační test</i>	54
<i>Tab. 7. Vtiskový modul pro nano-indentační test</i>	55
<i>Tab. 8. Vtiskový modul pro ultra-nano-indentační test</i>	56
<i>Tab. 9. Hloubka vtisku pro nano-indentační test</i>	57
<i>Tab. 10. Hloubka vtisku pro ultra-nano-indentační test</i>	58
<i>Tab. 11. Deformační elastická práce pro nano-indentační test</i>	59
<i>Tab. 12. Deformační elastická práce pro ultra-nano-indentační test</i>	60
<i>Tab. 13. Deformační plastická práce pro nano-indentační test</i>	61
<i>Tab. 14. Deformační plastická práce pro ultra-nano-indentační test</i>	62
<i>Tab. 15. Vickersova tvrdost</i>	64
<i>Tab. 16. Vtisková tvrdost</i>	65
<i>Tab. 17. Vtiskový modul</i>	66
<i>Tab. 18. Hloubka vtisku</i>	67
<i>Tab. 19. Deformační elastická práce</i>	68
<i>Tab. 20. Deformační plastická práce</i>	69

SEZNAM PŘÍLOH

P I CD Disk