

Měření mikrotvrdosti povrchů mechanických částí forem

Bc. Jaromír Novotný

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaromír Novotný**

Osobní číslo: **T13532**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření mikrotvrdosti povrchů mechanických částí forem**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních vzorků pro experiment
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. David Maňas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **30. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2015**

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: Bc. Jaromír Novotný

Obor: Výrobní inženýrství

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ 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, považuji 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 25. 4. 2015

Novotný Jaromír

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

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

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

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

²² *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 díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

³¹ *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 užit 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 přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

V diplomové práci se zabývám porovnáváním mechanických vlastností u vybraných typů povlaků se základním materiálem. V teoretické části jsou popsány metody měření tvrdosti, mikrotvrdosti a povlakování. Praktická část se zabývá jednotlivým měřením povlaků, které byly následně zpracovány a vyhodnoceny v podobě grafů a slovního vyjádření.

Klíčová slova: Mikrotvrdost, tvrdost, povlakování

ABSTRACT

In master thesis I deal with comparison of mechanical characteristics at chosen types of coatings with basic material. In theoretical part the methods of measurement of hardness, micro-hardness and coating are described. Practical part deals with particular measurement of coatings, which were afterwards processed and interpreted in form of graphs and word formulation.

Keywords: micro-hardness, hardness, coating

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce, doc. Ing. Davidovi Maňasovi, Ph. D., za odborné vedení, poskytnuté rady a především za čas, který mi věnoval. Dále chci poděkovat lidem, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TVRDOST	12
1.1 STATICKE ZKOUSKY TVRDOSTI.....	12
1.1.1 Zkouška vrypem.....	12
1.1.2 Zkouška podle Brinella	14
1.1.3 Zkouška kuželem	15
1.1.4 Zkouška podle Vickerse	16
1.1.5 Zkouška podle Rockwella.....	18
1.2 DYNAMICKÉ ZKOUSKY TVRDOSTI.....	19
1.2.1 Zkouška vtiskem kuličky nebo jiného tělesa rázem.....	19
1.2.2 Metoda pružného odrazu	20
1.2.3 Metoda měření tvrdosti kýváním	21
2 MIKROTVRDOST	23
2.1 MIKROTVRDOST	24
2.2 ZKOUSKA MIKROTVRDOSTI DLE VICKERSE	24
2.2.1 Podstata zkoušky	25
2.2.2 Zkušební těleso.....	26
2.2.3 Provedení zkoušky	26
2.3 ZKOUSKA MIKROTVRDOSTI DLE KNOOPA.....	27
2.3.1 Podstata zkoušky	27
2.3.2 Zkušební těleso.....	28
2.3.3 Provedení zkoušky	28
2.4 ZKOUSKA MIKROTVRDOSTI DLE BERKOVIČE.....	29
2.5 INSTRUMENTOVANÁ VNIKAJÍCÍ ZKOUSKA TVRDOSTI.....	31
3 VSTŘIKOVACÍ FORMY	34
3.1 FUNKČNÍ SYSTÉMY FOREM	34
3.1.1 Vyhazování výstřiků	34
3.1.2 Temperování forem	35
3.1.3 Odvzdušnění forem	37
3.1.4 Formy na výstřiky se závity	37
3.1.5 Boční posuvné čelisti forem.....	38
3.1.6 Oddělování vtokových zbytků od výstřiků ve formě.....	38
3.1.7 Rámy forem a jejich jednotlivé díly.....	39
3.2 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PŘI VÝROBĚ FOREM	43
3.2.1 Konstrukční oceli	44
3.2.2 Cementační oceli	45
3.2.3 Kalitelné oceli	46
3.2.4 Antikorozní oceli.....	47
3.2.5 Slitiny mědi	47
3.2.6 Slitiny hliníku.....	48
4 POVLAKOVÁNÍ	49

4.1	TECHNOLOGIE POVLAKOVÁNÍ	49
4.1.1	PVD.....	49
4.1.2	PACVD	50
4.2	DRUHY POVLAKŮ	51
4.2.1	PACVD 1	51
4.2.2	PVD 1.....	52
4.2.3	PVD 2.....	53
4.2.4	PVD 3.....	53
4.2.5	PVD 4.....	54
II	PRAKTICKÁ ČÁST	56
5	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	57
6	NAMĚŘENÉ HODNOTY MIKROTVRDOTI.....	58
6.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI APLIKOVANÉM ZATÍŽENÍ 10 mN.....	59
6.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI APLIKOVANÉM ZATÍŽENÍ 50 mN	65
6.3	NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI APLIKOVANÉM ZATÍŽENÍ 250 mN	71
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	77
	ZÁVĚR	80
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	81
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ	85
	SEZNAM TABULEK.....	87

ÚVOD

Tvrдость je jedna z mechanických vlastností, která má mimořádnou důležitost hlavně pro kovové materiály. Je to z toho důvodu, že ze všech vlastností materiálu ji můžeme nejrychleji a nejlevněji zjistit, a to i na předmětech nejmenších rozměrů. Z tvrdosti často vyvozujeme i další mechanické vlastnosti, jako jsou například pevnost v tahu, obrábělnost apod. Tvrдость kovových technických materiálů lze ovlivnit tepelným, případně chemicko – tepelným zpracováním. Nevýhodou velmi tvrdého materiálu je křehkost. Zkoušky se provádějí buď na zkušebních vzorcích, nebo rovnou na hotových výrobcích.

Různé metody měření tvrdosti využívají různých přístupů. Například u Brinellovy zkoušky má výsledná hodnota tvrdosti charakter napětí a je závislá na velikosti působící síly. Jiné metody využívají částečnou přeměnu kinetické energie na elastickou deformaci. Množství nespotřebované energie je pak mírou tvrdosti zkoušeného materiálu.

Zkoušky tvrdosti patří mezi zkoušky nedestruktivní, i když při nich vzniká lokální trvalá deformace (vryp, vtisk). Tvrдость není fyzikálně definována, protože je závislá na mnoha faktorech.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TVRDOST

Tvrlost definujeme jako odpor materiálu proti vniknutí cizího tělesa. Tento princip využívá většina přístrojů pro měření tvrdosti. Výsledné hodnoty se uvádějí bez jednotek, nebo, pokud jsou odvozeny ze vztahu mezi tlakovou silou a plochou vtisku, přiřazujeme jim jednotku MPA. Tento způsob může vést k omylům (záměna tvrdosti za pevnost), proto je vhodnější uvádět tvrdost jako nepojmenované číslo, pouze uvedeme způsob měření nebo stupnici. Pro tvrdost používáme značku H. Nejdůležitější používané zkoušky tvrdosti rozdělujeme na zkoušky vrypové, vtiskové, odrazové a kyvadlové. [1]

Zkouška tvrdosti se vždy provádí na povrchu předmětu. Při zkoušce, která nejčastěji vychází ze vtlačování cizího tělesa do zkoušeného materiálu vzniká ve velmi malém objemu materiálu prostorová napjatost, při které dochází ke kluzům v kluzných rovinách namáhaných krystalů. Tvrlost se vyhodnocuje pomocí deformace za působení konstantní síly nebo podle síly při stálé deformaci materiálu. Čím menší má materiál odpor proti těmto deformacím, tím menší zatížení je třeba k docílení požadované deformace a tím má zkušební těleso menší tvrdost. Jsou-li v základní struktuře kovu nějaké překážky, které brání vzniku kluzů, bude potřeba vynaložit větší síly pro deformaci a tvrdost bude větší. Zkoušky tvrdosti probíhají v relativně malém čase a dají se provést rovnou bez další úpravy povrchu předmětu. Za pomoci přepočtů lze z nich získat i jiné mechanické hodnoty, například pevnost. Tento způsob platí v první řadě pro tvrdost získanou vnikacími metodami, která má vztah k mezi kluzu materiálu. [2]

Zkušební metody k měření tvrdosti probíhají již přes 200 let a dosud se nepodařilo nalézt společnou koncepci tvrdosti. U jednoho a toho samého kovu lze určit tolik tvrdostí, kolik je možno použít měřících metod k jejich určení. [2]

Podle velikosti a druhu použité síly členíme zkoušky tvrdosti na dvě hlavní skupiny:

- statické zkoušky tvrdosti,
- dynamické zkoušky tvrdosti. [2]

1.1 Statické zkoušky tvrdosti

1.1.1 Zkouška vrypem

Tato zkouška se řadí mezi nejstarší způsoby měření tvrdosti materiálu a její základ byl převzat z mineralogie, kde se k určování tvrdosti používá Mohseova stupnice tvrdosti.

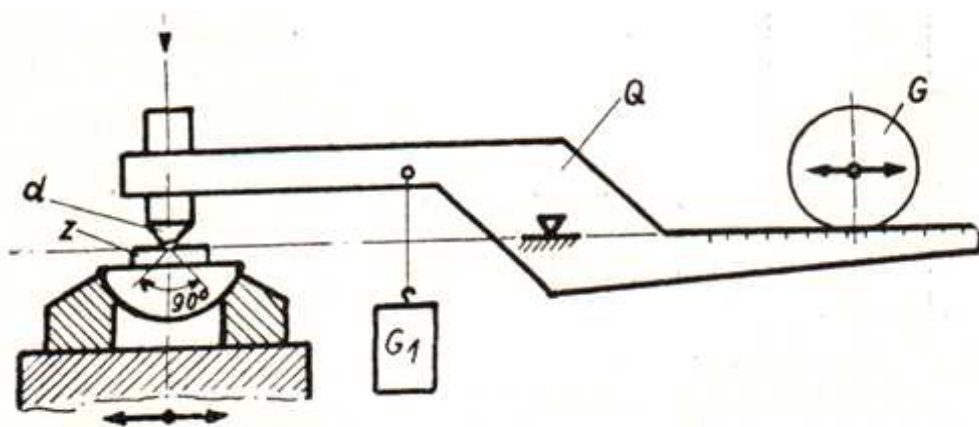
Do této stupnice se řadí 10 nerostů. Každý následný nerost je schopen zanechat do všech předcházejících nerostů vryp. Seznam těchto nerostů můžeme nalézt v Tab. 1. [3]

Tab. 1. Sestavení nerostů podle Mohseovy stupnice tvrdosti. [3]

1. mastek	6. živec
2. sůl kamenná	7. křemen
3. vápenec	8. topas
4. kazivec	9. korund
5. apatit	10. diamant

Jednotlivé stupnice jsou navzájem neúměrné, stupnice tvrdosti příliš hrubé, proto se tvrdost kovů a slitin při zkoušce vyhodnocuje jinak, a to podle šířky vrypu. [3]

Tento druh tvrdosti určíme za pomoci Martensova přístroje, jehož schéma můžeme nalézt na Obr. 1. Zkušební vzorek je broušený diamant (d), který je připevněn na dvojramenné páce (Q). Hrot diamantu má tvar kužele o vrcholovém úhlu 90° a posuvné závaží (G) je umístěno na druhém rameni páky. Zkoušený vzorek (Z) se umístí na stůl s kulovým uložením v podstavci tak aby byl zajištěn pohyb stolu v podélném směru. Diamant je postupně namáhán, aby se utvořil při pohybu stolu vryp o šířce 0,01 mm. Je nutné zvolit vyhovující zatížení a interpolací naměřených pěti hodnot vypočítat vhodné zatížení. [3]



Obr. 1. Martensův přístroj k vrypové zkoušce tvrdosti, d - diamant, Z - vzorek, G - posuvné závaží. [3]

1.1.2 Zkouška podle Brinella

Tato zkouška patří ke zkouškám tvrdosti na principu vtiskovém. Vtiskovaným tělískem je v tomto případě kulička o průměru D , na kterou působí zatížení P , kterým je kulička vtlačována do povrchu zkoušeného materiálu. Po odlehčení materiálu se změří průměr vtisku d a z něho se určí tvrdost. Při této zkoušce hraji velkou roli tvárné vlastnosti zkoušeného materiálu (k), velikosti kuličky (θ) a rychlosti (v), jakými je kulička vtlačována do zkoušeného materiálu.

$$H_B = f(k, \theta, v) \quad (1)$$

Tvrdost podle Brinella H_B je vyjádřena jako poměr zatížení P k povrchu vtisku F :

$$H_B = \frac{P}{F} [\text{kg} / \text{mm}^2] \quad (2)$$

kde F značí povrch kulového vrchlíku vytlačeného použitou kuličkou.

$$F = \pi D t = \frac{\pi D^2}{2} - \frac{\pi D}{2} \sqrt{D^2 - d^2} = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (3)$$

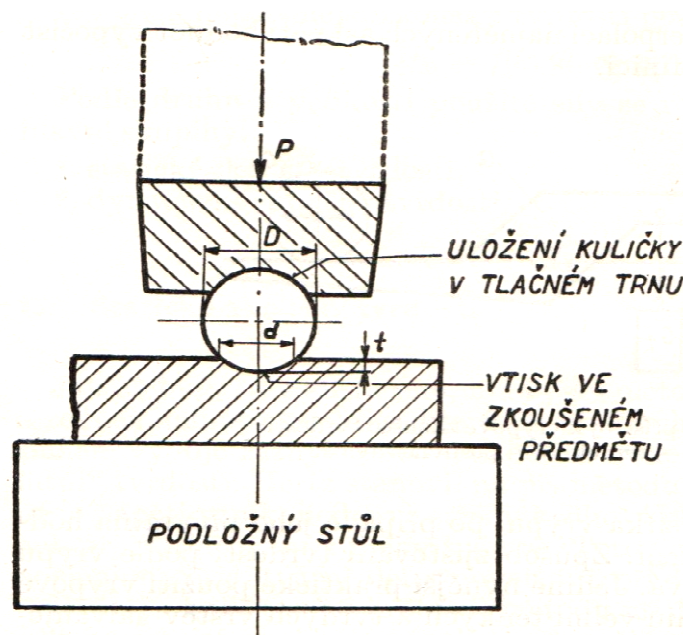
Po dosazení:

$$H_B = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (4)$$

kde P značí zkušební zatížení v kg, F povrch vylačovaného důlku v mm^2 , t hloubku důlku v mm, D průměr použité kuličky v mm, d průměr vylačovaného důlku v mm. Tvrdost podle Brinella je udávána v kg/mm^2 , obvykle se rozměr tvrdosti vynechává. V praxi se nepoužívají zdlouhavé a složité výpočty a tvrdost si najdeme v tabulkách, které jsou sestaveny pro normálové zatížení P , průměry kuliček D a různé poloměry vtisku. [3]

Princip Brinellovy zkoušky můžeme nalézt na Obr. 2. Zkouška zanechává ve zkoušeném materiálu trvale důlek, takže tvrdost může být kontrolována i později. V místě styku vtlačování kuličky do zkoušeného materiálu vzniká deformace. Deformaci ovlivňují pružné a tvárné vlastnosti materiálu a jeho schopnosti plastického toku a zpevňování. Na zmíněné děje má vliv napětí v místě styku kuličky se zkoušeným povrchem a velikost jejího tření (μ) při vtlačování. Do uvedeného vztahu lze tedy přidat další charakteristický parametr pro průběh zkoušky: [3]

$$H_B = f(k, \phi, v, \mu) \quad (5)$$



Obr. 2. Způsob vtlačování kuličky do zkoušeného materiálu. [3]

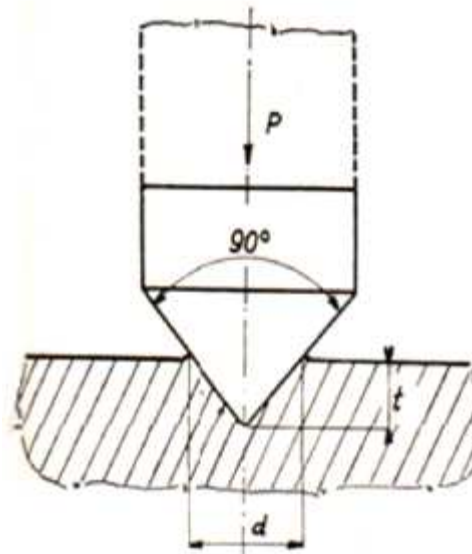
1.1.3 Zkouška kuželem

Kulička kvůli svému geometrickému tvaru dává při různých zatíženích odlišné geometrické vtisky. Z tohoto důvodu Ludwik nahradil při zkouškách tvrdosti kuličku kuželem o úhlu 90° , jak můžeme vidět na Obr. 3. Výsledky tvrdosti nejsou v tomto případě závislé na zatížení. Měří se průměr vtisku a velikost tvrdosti se vypočítá ze zatížení děleného plochou průměru vtisku. Metoda určování tvrdosti podle Ludwika se v praxi neujala. Na podobném principu navrhnul zkoušku tvrdosti Kubasov. Jeho výzkum týkající se tvárné deformace při zkoušce tvrdosti kuželem, odhalil vztahy tvrdosti k ostatním mechanickým vlastnostem materiálu. [3]

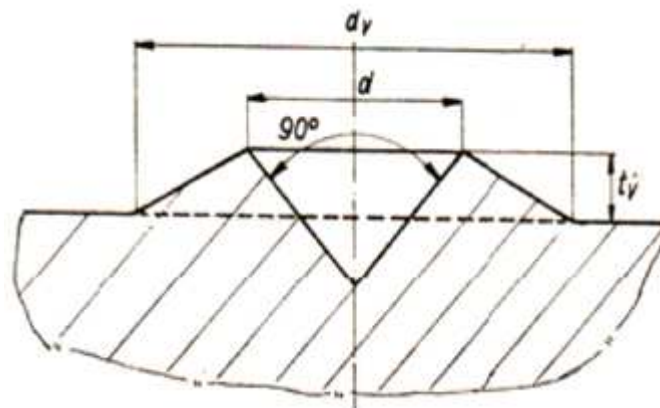
Při vtlačování diamantu do zkoušeného materiálu je v okolí styku materiál pružně i trvale deformován. Po ukončení vtlačování diamantu zůstane trvalá deformace, která má za následek převýšení t_v , které tvoří val kolem místa vtisku Obr. 4. Velikost již zmíněného valu může sloužit k přibližnému určení meze průtažnosti. Jeho průměr d_v , se určí obroušením vzniklého převýšení. Kubasův vztah k určení meze průtažnosti:

$$\sigma_{Kt} = \frac{4P}{\pi d_v^2}, \quad (6)$$

kde P je síla, kterou je kužel vlačován do zkoušeného materiálu. Tato zkouška je poměrně málo přesná a závisí na kvalitě povrchu zkoušeného materiálu. [3]



Obr. 3. Schéma zkoušky tvrdosti podle Ludwika. [3]



Obr. 4. Stanovení převýšení materiálu v okolí vtisku diamantového kužele. [3]

1.1.4 Zkouška podle Vickerse

V Evropě je tato zkouška známá podle tvrdoměru od firmy Vickers a v USA pod názvem Diamond pyramid hardness test. Nástrojem je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136° Obr. 5, tím pádem vznikají stejné čtyřhranné vtisky. Zmiňovaný úhel je volen tak, aby vzniklé tření neovlivňovalo správné výsledky a také z toho důvodu, aby se výsledná tvrdost příliš nelišila od tvrdosti podle Brinella. Po skončení vtisku do

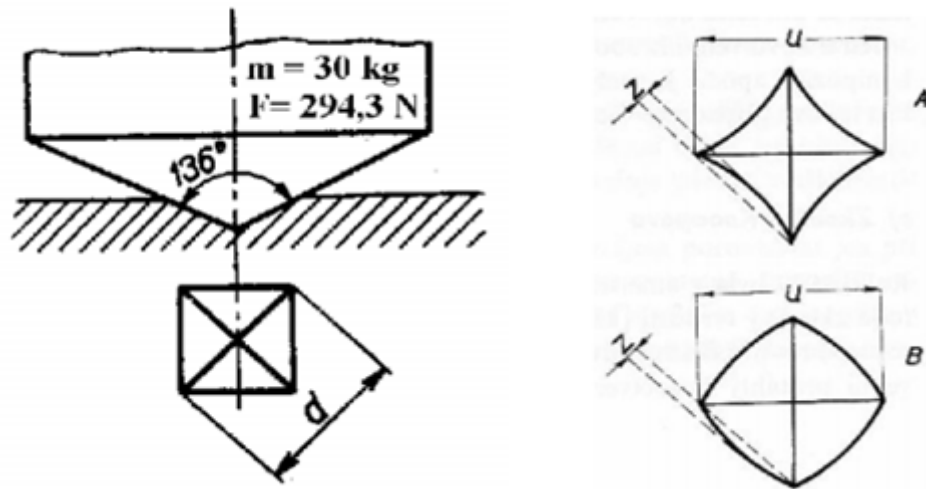
zkoušeného materiálu se měří jeho úhlopříčka. Výsledná hodnota je pak dosazena do vzta-
hu

$$HV = 0,189 \frac{F}{u^2} \quad (7)$$

F – zátěžující síla [N], u – průměrná hodnota úhlopříčky [mm] [4]

Dle normy ČSN 42 0374 jsou obvyklá zatížení 9,8; 29,4; 49; 98; 294 a 490 N. Vickersova zkouška je ze všech zmiňovaných metod jediná, která splňuje všechny ideální požadavky. Jednotná stupnice udává tvrdost od nejměkčích kovů až po nejtvrďší kalené ocele. Hodnoty tvrdosti jsou nezávislé na velikosti zatížení. I když jsou zatížení jiná než dříve používané (30 kp), je potřeba zatížení zmínit společně s naměřenou hodnotou tvrdosti, např. HV10-zatížení 10 kp. [4]

Následkem různého zpevnění při hranách jehlanu a uprostřed ploch nemusí být obtisk přesně čtvercový, poněvadž strany mohou být duté u měkkých materiálů A, nebo vypouklé z pevných materiálů B Obr. 5. [4]



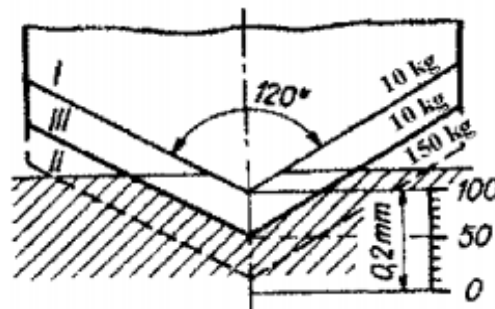
Obr. 5. Schéma zkoušky dle Vickerse a deformace vtisku. [4]

Velká výhoda této metody je, že naměřené hodnoty tvrdosti jsou velice přesné. Vytvořené vtisky jsou velice malé, takže se ani kvalitně obrobena plocha příliš nepoškozuje. Nevýhodou malého vtisku u hrubozrnných nebo homogenních kovů je, že nedostaneme jednoznačné výsledky. Další nevýhoda této metody je použití pouze povrchu, který má určitou drsnost opracované plochy. [4]

1.1.5 Zkouška podle Rockwella

Rockwellova zkouška vychází ze základní myšlenky Ludwikovy zkoušky, která nahrazuje kuličku ocelovým kuželem. Rockwell však použil diamantový kužel s podstatně menším zatížením než Ludwik (9,8-49 kN). Tření při vnikání kuželu do materiálu je závislé na vrcholovém úhlu používaného kuželu. Čím větší je jeho vrcholový úhel, tím menší je tření, proto Rockwell zvolil diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a zaoblení s poloměrem 0,2 mm. [4]

Tato zkouška se nejčastěji používá pro sériovou kontrolu zušlechťovaných, kalených nebo jinak tepelně zpracovaných ocelí. Hloubka vtisku se měří tak, že při zatížení 98 N se nastaví hloubkoměr na hodnotu nula a zatíží se hlavní silou, proto se nevyžaduje upravený povrch. Po vrácení hodnoty na původních 98 N se odpočítá hloubka vtisku. Kdyby se odpočítávalo při plném namáhání, tvrdost by byla menší nejen o pružné deformace vtisku, ale také o pružné deformace stojanu stroje, podložky apod. [4]



Obr. 6. Princip měření HRC tvrdosti. [4]

Při použití kuželového indentoru je celková měřitelná hloubka 0,2 mm. Tato hloubka je rozložena na 100 dílků. V případě, že se hrot po odlehčení na 10 N vrátí do původní nulové polohy Obr. 6, je tvrdost materiálu rovna tvrdosti diamantu. [4]

Nejměkčí kov, který lze zkoušet touto metodou má pevnost v tahu 80 MPa. Metodu HRC lze použít od minimální tvrdosti HRC 20. Doporučuje se však používat až od HRC 30, protože při malých tvrdostech jsou naměřené tvrdosti nepřesné. Pro měkčí materiály se používají ocelové kuličky s menším namáháním namísto diamantového kuželu. [4]

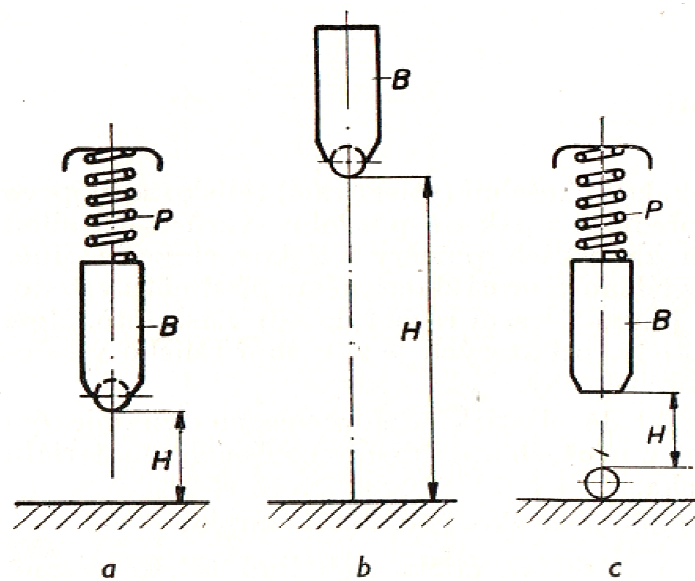
U nejtvrděších materiálů, jako jsou slinuté karbidy, dojde při namáhání 1471 N k poškození diamantového indentoru, proto se u nejtvrděších materiálů používá namáhání pouze 588 N. [4]

1.2 Dynamické zkoušky tvrdosti

1.2.1 Zkouška vtiskem kuličky nebo jiného tělesa rázem

Ráz je vyvolán pružinou, která vymrští kuličku na povrch zkoušeného materiálu, nebo volným pádem, kde kulička dopadá na zkoušený materiál. V dalším případě je kulička, na kterou je veden ráz, umístěna v klidu na povrchu zkoušeného materiálu. [3]

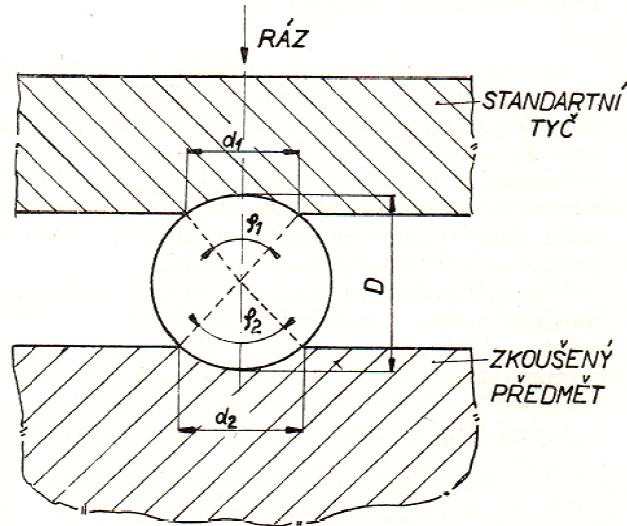
Princip těchto dynamických zkoušek tvrdosti je znázorněn na Obr. 7. V případě (a) je kulička upevněna v beranu (B) o určité hmotnosti a současně s ním je vymrštěna pružinou (P) na povrch zkoušeného materiálu. Další způsob (b) uvádí ráz, který vyvodí kulička spojená s beranem (B) při volném pádu z dané výšky H na zkoušený materiál. V posledním případě (c) je ráz vyvolán na klidně ležící kuličku beranem (B), vymrštěním pružiny (P). [3]



Obr. 7. Schéma tří způsobů vtiskování kuličky do zkoušeného předmětu rázem. [3]

Zařízení, která se používají v této skupině jsou Kladivo Baumannovo a kladívko Poldiny hutí. Prvně zmiňované zařízení pracuje na principu, který je znázorněný na Obr. 8. Vtisk je způsoben pružinou, která je před nárazem pomalu stlačována. Po určitém zatížení se pružina uvolní a vymrští beran proti nástavci s upevněnou kuličkou. Kulička je vtiskována stálou energií do zkoušeného materiálu. [3]

Na odlišném principu pracuje kladívko Poldiny hutí. Rázu se v přístroji docílíje současným vtiskem do zkoušeného materiálu a standardní tyče. Vtisk vtlačený do obou materiálů je prováděn jednou kuličkou, která je umístěna uprostřed Obr. 8. [3]



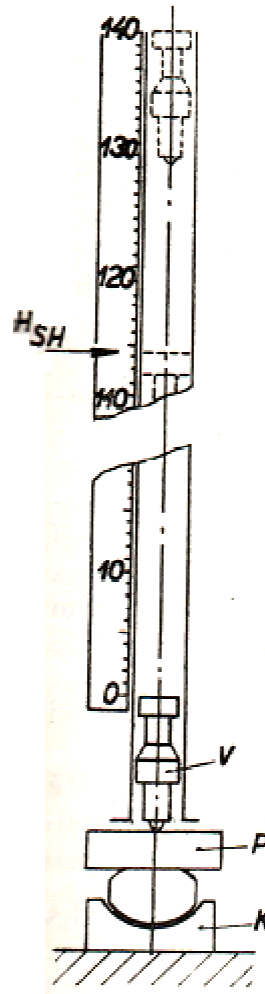
Obr. 8. Princip měření tvrdosti kladívkem Poldiny hutí. [3]

1.2.2 Metoda pružného odrazu

Tato metoda je založena na principu měření tvrdosti na základě pružného odrazu standardního tělesa, které spuštěno z určité výšky na zkoušený povrch materiálu. Těleso o hmotnosti G padá z výšky H , přičemž se dosáhne energie v rázu, která je určena vztahem $E_1 = H \cdot G$. Menší část energie se zužitkuje na nevratnou trvalou deformaci a zbytek energie se projeví odrazem standardního tělesa. Dopadová energie má u různých materiálů různý poměr trvalé a pružné deformace a tím se zvyšuje i tvrdost. Součet pružné a trvalé deformace je konstantní. [3]

Pro vyhodnocování této metody se používá přístroj Skleroskop Shoreho. Přístroj je složen ze skleněné kalibrované trubky, ve které se pohybuje válcové těleso (V) o hmotnosti 2,5 g, které je na konci zakončeno kulovitě broušeným diamantem, jak můžeme vidět na Obr. 9. Za trubkou se nachází stupnice, která znázorňuje empiricky stupně tvrdosti podle Shoreho. Dílek $H_{SH} = 100$ odpovídá výšce odrazu tělesa od uhlíkové oceli. Stupnice je zvětšena o dalších 40 dílků. Těleso padá volně z výšky $10'' = 254$ mm. Gumový balónek odsaje z trubice vzduch a vzniklým přetlakem se těleso nadzvedne do nejvyšší polohy, kde se přichytí v čelistech. Druhým zmáčknutím balónku čelisti pustí těleso, které volně dopadne na zkoušený předmět a následným nárazem odskočí. Zkušební těleso je nastaveno

nejčastěji pomocí pružiny. Odečtení výšky odrazu zajišťuje nejčastěji lupa, posuvná podél stupnice přístroje. K přesnému měření je potřeba jistá zručnost pracovníka. [3]



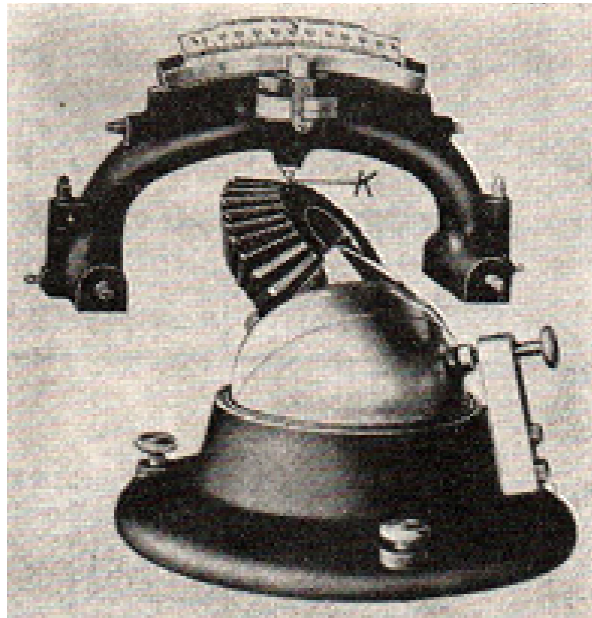
Obr. 9. Schéma
Shoreho skleroskopu. [3]

1.2.3 Metoda měření tvrdosti kýváním

Tato metoda určuje tvrdost na Herbertově kyvadle obsahující ocelovou kuličku. Pomocí kuličky kyvadlo dosedne na zkušební těleso a po celou dobu zkoušky je vtlačováno hmotností kyvadla do povrchu zkušebního materiálu. Vlivem kývání se na povrchu vytvoří důlek, který se rozšiřuje a získává různé tvary podle druhu zkoušeného materiálu. Měkký kov má hluboký a velmi krátký důlek, kdežto tvrdý kov má mělký a široký důlek. [3] Na Obr. 10 můžeme vidět Herbertovo kyvadlo při zkoušce tvrdosti kuželového ozubeného kola, které je uchyceno v kulovém držáku. Kyvadlo je složeno z litého třmene

váhy 2 nebo 4 kg, na koncích zpevněného. V těžišti třmene je upevněna ocelová kulička (K) o průměru 1 mm. Těžiště lze nastavit do určité vzdálenosti (0,1 mm) pod střed kuličky pomocí stavěcího šroubu. Na třmeni je stupnice rozdělená na 100 dílků. [3]

Při zkoušce se měří časová nebo úhlová tvrdost. Přístroj pro měření časové tvrdosti se uvede do rovnováhy a nepatrnými úderý se třmen rozkýve tak, aby výkyv odpovídal 10 dílkům. Doba 10 kyvů se měří stopkami a následně z tabulek zjistíme tvrdost. První čtyři kyvy se nepočítají, protože deformace při nich není ještě ukončena. Třmen pro měření úhlové tvrdosti se na zkoušeném tělese postaví do vodováhy. Poté se třmen vykloní tak, aby bublina přešla na nulu stupnice a nechala se vykývnout, při tom se měří velikost prvního výkyvu. Výsledná hodnota se považuje za úhlovou tvrdost. [3]



Obr. 10. Herbertovo kyvadlo při zkoušce tvrdosti ozubeného kola. [3]

2 MIKROTVRDOST

Zkoušky tvrdosti se dají rozdělit podle mnoha hledisek. Podle principu můžeme rozeznat zkoušky vrypové, vnikací, odrazové a nárazové, podle rychlosti zatěžovací síly statické a dynamické, dále rozeznáváme zkoušky makro a mikrotvrdomosti. [5]

Nejpoužívanější jsou statické zkoušky tvrdosti. Jsou charakteristické tím, že vnikací těleso je zatlačováno do povrchu zkoušeného materiálu pravidelně se zvyšující silou až do požadovaného zatížení, které je pak po určitou dobu udržováno na konstantní úrovni. Nej-používanější metody měření tvrdosti jsou statické podle Brinella, Rockwella, a Knoopa. V technické praxi se nejčastěji pro kovové materiály používají zkoušky vnikací podle Vickersa. Hlavním společným znakem výše zmiňovaných metod je vtlačování vnikacího tělesa o přesně definovaném tvaru a síle do povrchu zkoušeného materiálu. [5]

Během zkoušky vznikne na povrchu zkoušeného tělesa trvalý vtisk následkem plastických deformací kolem vtiskového tělesa. Po odlehčení se tvar vtisku mění a jeho velikost je míra odporu materiálu proti vniknutí cizího tělesa. Výsledná tvrdost je velikost trvalé deformace v relaci působící zatěžovací síle. Vnikací těleso přitom nesmí podlehnout plastickým deformacím a proto musí mít co nejvyšší tvrdost, modul a mez pevnosti. [5]

Tvrdost nemůžeme považovat jako jednoznačnou definovanou fyzikální veličinu, protože výsledky měření jsou závislé na mnoha vlivech, např. na:

- elastické vlastnosti měřeného materiálu (modul pružnosti v tahu a ve smyku)
- plastické vlastnosti zkoušeného materiálu (mez kluzu a charakteru deformačního zpevnování)
- velikost zatěžovací síly působící na vnikající těleso [5]

Tvrdost úplně totožného kovu může mít odlišnou tvrdost v závislosti na:

- velikosti zrna (jemnozrnné materiály vykazují vyšší tvrdost v důsledku vyššího odporu zrn vůči vnikání cizího tělesa)
- teplotě (vlivem teplotní roztažnosti jsou vazby mezi atomy méně pevné)
- množství cizích příměsí (heterogenní příměsí snižují schopnost materiálu se plasticky deformovat)
- vnitřním pnutím (způsobené tvářením za studena, nerovnoměrným ochlazením-součástí atd.) [5]

2.1 Mikrotvrдость

Měření tvrdosti je provedeno vtlačení diamantového tělesa tvaru Vickersova nebo Knoopova jehlanu do povrchu zkoušeného materiálu silami o velikosti od 0,09807 N do 9,807 N. Ostatní zkoušky tvrdosti podle Vickerse jsou zatěžovány silami mezi 10 a 1200 N. Prvně použité síly menší než 10 N se datují do roku 1932, kdy byly tyto zkoušky provedeny v National Physical Laboratory ve velké Británii. [5]

Při měření tvrdosti přesnost měření klesá, z důvodu klesání aplikovaných sil. Navíc s klesající zátěžovou silou do oblasti mikrotvrdsti není Vickersova tvrdost nezávislá na velikosti aplikovaného zatížení. [5]

Vtisky při zkoušení mikrotvrdsti jsou malé, proto je tato metoda vhodná k použití pro:

- menší nebo úzké součásti
- měření malých tvrdostí
- měření mikrotvrdsti strukturních složek a fází
- klasifikace vrstev po chemicko-tepelném zpracování
- měření tvrdosti pro velmi tenké kovy a jiné anorganické povlaky
- klasifikace svařovaných spojů
- pro klasifikaci oduhličujících procesů
- studování difúzních pochodů
- měření křehkých materiálů
- atd. [5]

2.2 Zkouška mikrotvrdsti dle Vickerse

Zkouška dle Vickerse je prováděna podle evropské normy ČSN EN ISO 6507-1, a to pro tři odlišné oblasti zatížení (Tab. 2). [5]

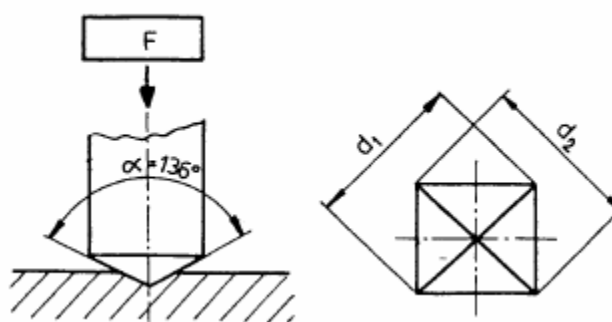
Tab. 2. Oblasti zatížení pro kovové materiály [5]

Oblast zkušebního zatížení, F (N)	Symbol tvrdosti	Předchozí označení (ISO 6507-1:1982)
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Hodnoty, které jsou uvedeny v evropské normě, jsou počítány se zatížením v kilogramech. V současné době jsou tyto normy ponechány v kilogramech, avšak při následující revizi se bude uvažovat o výhodnosti zaokrouhlených hodnot zkušebního zatížení a následných důsledků na stupnici tvrdosti. Zkušební zatížení při měření tvrdosti dle Vickerse je tedy v kilogramech, ale zatěžovací síla je udávána v Newtonech. [5]

2.2.1 Podstata zkoušky

Při zkoušení tvrdosti dle Vickerse se používá vnikací diamantový nástroj, který má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° . Mezi protilehlými stěnami je nástroj vtlačován do povrchu zkoušeného tělesa. Po odlehčení zkušebního tělesa se změří úhlopříčka vtisku, který zanechal nástroj Obr. 11.



Obr. 11. Podstata zkoušky tvrdosti dle Vickerse.

Dále je tvrdost vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku kde uvažujeme, že má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° .

HV tvrdost dle Vickerse

HV konstanta * zkoušební zatížení / plocha povrchu vtisku

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (8)$$

d aritmetický průměr délek úhlopříček d_1, d_2 , v mm

F zkoušební zatížení, v N [5]

2.2.2 Zkoušební těleso

Při malém zatížení a při mikrotvrdosti je potřeba co nejpřesnější měření úhlopříček vtisku. Povrch zkoušebního vzorku musí být hladký, rovný, bez okují, mastnot a cizích tělísek. Zkoušební vzorek se připravuje jako metalografický výbrus, to znamená, že povrch vzorku nesmí být tepelně ani deformačně ovlivněn. Příprava se nejčastěji provádí broušením za mokra, leštěním na diamantových pastách a případně elektroleštěním. Dle příslušného materiálu se volí vhodná metoda přípravy vzorku. Tloušťka vrstvy nebo zkoušebního tělesa musí být 1,5 krát větší než délka úhlopříčky vtisku. [5]

2.2.3 Provedení zkoušky

Aby se během zkoušky nepohnulo zkoušebního těleso, musí být uloženo na tuhé podložce. Vnikací nástroj se vtlačuje do povrchu zkoušeného tělesa zkoušebním zatížením, které působí kolmo na jeho povrch (Tab. 3). Počáteční doba zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí být menší než 2 sekundy a větší než 8 sekund. Tato doba u zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti s malým zatížením nesmí přesáhnout 10 sekund a zároveň rychlost 0,2 mm/s. V rozmezí 10 až 15 sekund musí být dosaženo plného zkoušebního zatížení. [5]

Jednotlivé vtisky musejí být poskládány tak, aby nebyla porušena podmínka, která tvrdí, že vzdálenost středů dvou sousedících vtisků musí být 3 krát větší než průměrné hodnoty vtisku a 6 krát větší v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Střed každého vtisku od okraje zkoušebního vzorku musí mít vzdálenost 2,5 krát větší jak průměrné hodnoty vtisku a 3 krát větší v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. [5]

Tab. 3. Zkušební zatížení [5]

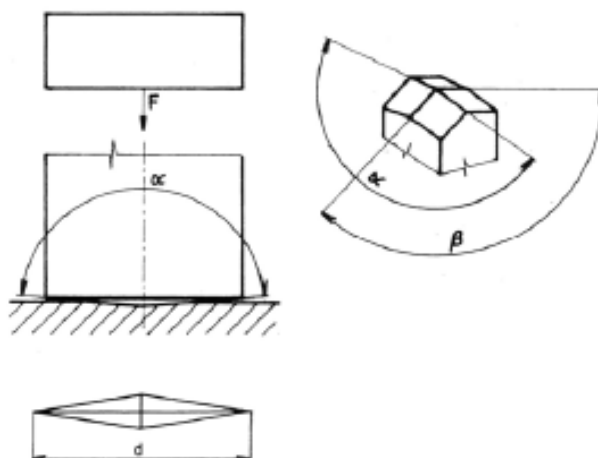
Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2942
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

2.3 Zkouška mikrotvrdosti dle Knoop

Zkouška dle Knoop pro kovové materiály je prováděna podle mezinárodní normy ČSN ISO 4545 se zkušebním zatížením do 9,807 N. [5]

2.3.1 Podstata zkoušky

Při zkoušení tvrdosti dle Knoop se používá diamantový vnikací nástroj, který má tvar jehlanu s kosočtvercovou základnou s předepsanými úhly protilehlých stran vtlačováno do povrchu zkoušeného tělesa. Po odlehčení zkušebního zatížení F se změří delší úhlopříčka vtisku Obr. 12. [5]



Obr. 12. Podstata zkoušky tvrdosti dle Knoop. [5]

Tvrdoost je dále vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku, kde uvažujeme, že má tvar jehlanu s kosočtvercovou základnou a vrcholovými úhly rovnající se úhlům vnikajícího nástroje.

HK tvrdost dle Knoop

HK konstanta * zkušební zatížení / plocha povrchu vtisku

$$HK = 0,102 \cdot \frac{F}{d^2 \cdot c} = 0,102 \cdot \frac{F}{0,07028 \cdot d^2} = 1,451 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (9)$$

d délka delší úhlopříčky, v mm

F zkušební zatížení, v N

$$\text{Konstanta vnikajícího nástroje... } c = \frac{\tan \beta / 2}{2 \cdot \tan \alpha / 20} = 0,07028 \quad [5] \quad (10)$$

2.3.2 Zkušební těleso

Podobně jako u měření tvrdosti dle Vickerse je potřeba co nejpřesnější měření delší úhlopříčky vtisku. Povrch zkušební vzorku musí být hladký, rovný, bez okují, mastnot a cizích tělísek. Zkušební vzorek se připravuje jako metalografický výbrus, to znamená, že povrch vzorku nesmí být tepelně ani deformačně ovlivněn. Příprava se nejčastěji provádí broušením za mokra, leštěním na diamantových pastách a případně elektroleštěním. Dle příslušného materiálu se volí vhodná metoda přípravy vzorku. [5]

2.3.3 Provedení zkoušky

Stejně jako u předchozí zkoušky tvrdosti je potřeba, aby se během zkoušky nepohnulo zkušební těleso, musí být tím pádem uloženo na tuhé podložce. Vnikací nástroj se vtlačuje do povrchu zkoušeného tělesa zkušebním zatížením, které působí kolmo na jeho povrch (Tab. 4). Počáteční doba zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí přesáhnout hodnotu 10 sekund. Přibližovací rychlost vnikajícího tělesa musí být mezi 15 $\mu\text{m/s}$ až 70 μm . V rozmezí 10 až 15 sekund musí být dosaženo plného zkušebního zatížení. [5]

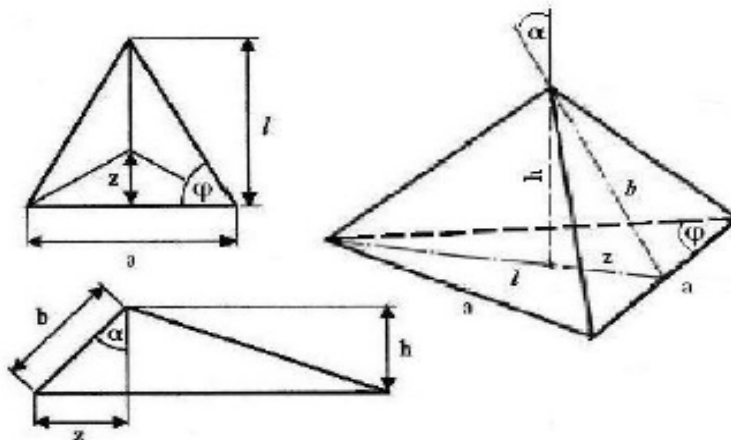
Jednotlivé vtisky musejí být poskládány tak, aby nebyla porušena podmínka, která tvrdí, že vzdálenost středů dvou sousedících vtisků musí být 3 krát větší než kratší úhlopříčky vtisku a 6 krát větší v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Střed každého vtisku od okraje zkušební vzorku musí mít vzdálenost 2,5 krát větší jak kratší úhlopříčky vtisku a 3 krát větší v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. [5]

Tab. 4. Zkušební zatížení [5]

Zkouška tvrdosti dle Knoop	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HK 0,01	0,09807
HK 0,02	0,1961
HK 0,025	0,2452
HK 0,05	0,4903
HK0,1	0,9807
HK 0,2	1,961
HK 0,3	2,942
HK 0,5	4,903
HK 1	9,807

2.4 Zkouška mikrotvrdosti dle Berkoviče

Při zkoušení tvrdosti dle Berkoviče se používá vnikací diamantový nástroj, který má tvar pravidelného tříbokého jehlanu. Tato zkouška pracuje na stejném principu a průběhu jako zkouška tvrdosti dle Vickerse. Důležitým faktorem pro výrobu nového vtiskovacího nástroje byly problémy vyrobít čtyřboký jehlan a dodržení správných podmínek geometrické rozbíhavosti hran, která u třístěnného odpadá. Díky svému jednoduššímu tvaru je jehlan během svého zatížení méně citlivý na nárazy a špatnou manipulaci. V současnosti se v nanoindentačních zkouškách nejčastěji využívá Berkovičův vnikací jehlan. Berkovičův vnikací jehlan byl původně navržen tak, aby byly plochy stěn jehlanu stejné k jeho výšce jako v případě Vickersova jehlanu. V pozdější době, s rozšířením koncepce tvrdosti jako poměru síly a projekční plochy vtisku, byl vyroben modifikovaný Berkovičův jehlan. [6]



Obr. 13. Schéma pravidelného tříbokého jehlanu - Berkovičův jehlan. [6]

Tab. 5. Některé důležité vztahy a relace u třístěnného jehlanu [6]

$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2l}{\alpha}; \quad \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{2z}{\alpha}; \quad \sin \alpha = \frac{z}{b}; \quad \cos \alpha = \frac{h}{b}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{z}{h};$
<p>Vyjádření A_S pomocí l:</p> $A_3 = \frac{3}{2}ab = \frac{3}{2} \cdot \frac{2l}{\operatorname{tg} \varphi} \cdot \frac{z}{\sin \alpha} = 3 \cdot \frac{l}{\operatorname{tg} \varphi} \cdot \frac{2l}{\operatorname{tg} \varphi} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{\sin \alpha} = 3l^2 \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{\operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{l^2}{\sin \alpha}$
<p>Vyjádření A_S pomocí h:</p> $A_3 = \frac{3}{2}ab = \frac{3}{2} \cdot \frac{2z}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \cdot \frac{h}{\cos \alpha} = \frac{3}{2} \cdot \frac{2h \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \cdot \frac{h}{\cos \alpha} = 3\sqrt{3} \cdot h^3 \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha}$
<p>Vyjádření A_p pomocí h:</p> $A_p = \frac{1}{2}a \cdot l = \frac{1}{4}a^2 \operatorname{tg} \varphi = h^2 \cdot \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}} = 3\sqrt{3} \cdot h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha$
$\frac{A_S}{h^2} = 3\sqrt{3} \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha}; \quad \frac{A_p}{h^2} = 3\sqrt{3} \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha; \quad \frac{A_S}{A_p} = \frac{1}{\sin \alpha}$

Úhel, který je svírá výškou modifikovaného Berkovičova jehlanu se stěnou jehlanu je $65,27^\circ$, což souhlasí s podmínkou stejného poměru projekční plochy ku hloubce vtisku jako má Vickersův jehlan. Podrobněji znázorněný Berkovičův jehlan můžeme vidět na Obr. 13 a geometrické relace v Tab. 5. [6]

Hodnota mikrotvrdosti pro Berkovičův indentor s úhlem $65,03^\circ$, vyjádřena jako poměr velikosti zatížení a plochy je:

$$H_{CH} = 1570 \cdot \frac{W}{l^2} \quad (11)$$

W..... velikost zatížení jehlanu, v kg

l výška trojúhelníku změřená na vtisku

Index CH je z původního značení mikrotvrdosti, protože ve starší literatuře je zkouška známa jako zkouška mikrotvrdosti podle Chruščova a Berkoviče. [6]

2.5 Instrumentovaná vnikající zkouška tvrdosti

Hlavní příčinou pro vznik nové indentační techniky byla snaha zjistit mechanické vlastnosti tenkých vrstev. Klasické zkoušky mikrotvrdosti nebyly schopné vyvodit takové zatížení, aby neovlivnily indentací substrát, na kterém je vrstva nanášena. Požadavkem bylo, aby celková hloubka vtisku byla rovna 10% z celkové hloubky vrstvy. Rozměry vytvořeného vtisku podle daných požadavků nebylo možné přesně změřit klasickým mikroskopem. Musely se změřit elektronovým mikroskopem, což prodlužovalo a znesnadňovalo práci, tím pádem se určování mikrotvrdosti stávalo nepohodlným. [6]

Metoda DSI, která je u nás známá pod pojmem Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti má své počátky v sedmdesátých letech 20 století. Vylepšení analýzy a shromáždění dat provedli na počátku osmdesátých let až Oliver a Pharr. Principem této metody je, že měřicí přístroj zachytí každou změnu hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu v závislosti na nárůstu nebo poklesu zatížení během zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Charakteristická indentační křivka zatížení-hloubka vtisku vzniká grafickým zpracováním dat. Pomocí měřicího přístroje, který je napojen do PC, jsou průběhy zkoušek hned zaznamenány společně s vyhodnocením materiálových parametrů. [6]

Hodnota tvrdosti se obecně vyjadřuje jako podíl maximální velikosti síly F_{\max} a zbytkové kontaktní plochy vtisku A_s .

$$H = \frac{F_{\max}}{A_s} \quad (12)$$

Vickersovo číslo tvrdosti pro Vickersův indertor dostaneme jako:

$$VHN = \frac{F_{\max}}{A_s} = \frac{1}{g} \cdot \frac{2F_{\max} \sin \alpha}{d^2} \quad (13)$$

A_s styčná plocha vtisku

g gravitační zrychlení

F_{\max} maximální síla, v Newtonech

$\alpha = 68^\circ$ poloviční úhel který svírají protilehlé stěny indentoru

d aritmetický průměr ze dvou na sebe kolmých měření velikosti úhlopříčky vtisku v milimetrech [6]

Na principu metody DSI bylo možné stanovit tvrdost jako funkci okamžité hloubky vtisku. Tuhle funkci využívá Martensova tvrdost HM , která bývá často nazývána jako univerzální tvrdost HU . [6]

$$HM = \frac{F}{A_s(h)} = \frac{F}{26,43 \cdot h^2} \quad (14)$$

Mezi HM a HU lze však stanovit rozdíl. Martensovu tvrdost můžeme brát jako funkci hloubky vtisku tedy

$$HM = f(h), \quad (15)$$

kdežto univerzální tvrdost lze chápat jako tvrdost při maximálním zatížení a tomu odpovídající maximální hloubku vtisku, tedy:

$$HU = \frac{F_{\max}}{A_s} = \frac{F_{\max}}{26,43 \cdot h_{\max}^2} \quad (16)$$

HU zahrnuje elastickou i plastickou odezvu materiálu na působící zatížení. Definuje se také jako plastická tvrdost, která charakterizuje plastickou deformaci materiálu jako:

$$H_{pl} = \frac{F_{\max}}{A_s} = \frac{F_{\max}}{26,43 \cdot h_p^2} \quad (17)$$

h_p průsečík tečny sestavené k odlehčovací křivce v F_{\max} s osou hloubky vtisku
 h_p lze vyjádřit jako:

$$h_p = h_{\max} - \frac{F_{\max}}{dF/dh} \quad (18)$$

h_m maximální hloubka vtisku při F_{\max} [6]

Ve velké míře se používá vtisková tvrdost H_{IT} , která stejně jako H_{pl} je mírou odporu k trvalé deformaci nebo poškození a je definována jako:

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A_p} = \frac{F_{\max}}{24,50 \cdot h_p^2} \quad (19)$$

A_p průmět kontaktní plochy indentoru ve vzdálenosti h_p od hrotu

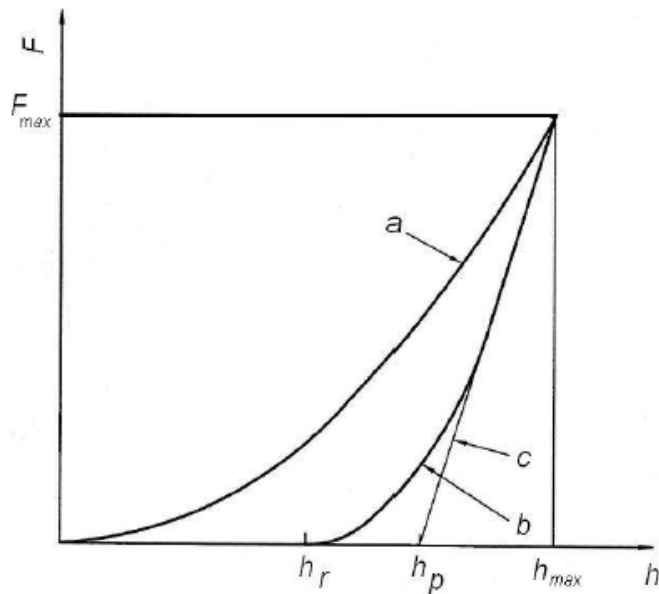
h_p hloubka kontaktu vnikacího tělesa se zkušebním tělesem při F_{\max} [6]

Plastickou hloubku lze vyjádřit jako:

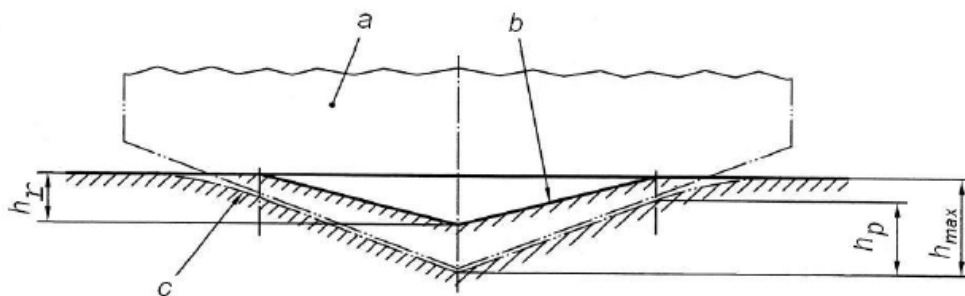
$$h_p = h_{\max} - \varepsilon \frac{F}{dF/dh} = h_{\max} - \varepsilon(h_{\max} - h_r) \quad (20)$$

ε závisí na geometrii použitého indentoru [6]

Ve skutečnosti je h_r speciálním případem h_p , protože pro válcový indentor je $\varepsilon = 1$. Pro rotační paraboloid a Vickersův indentor je $\varepsilon = 3/4$ a pro kuželový indentor je $\varepsilon = 0,73$. Na Obr. 14 a 15 jsou znázorněny použité symboly. [6]



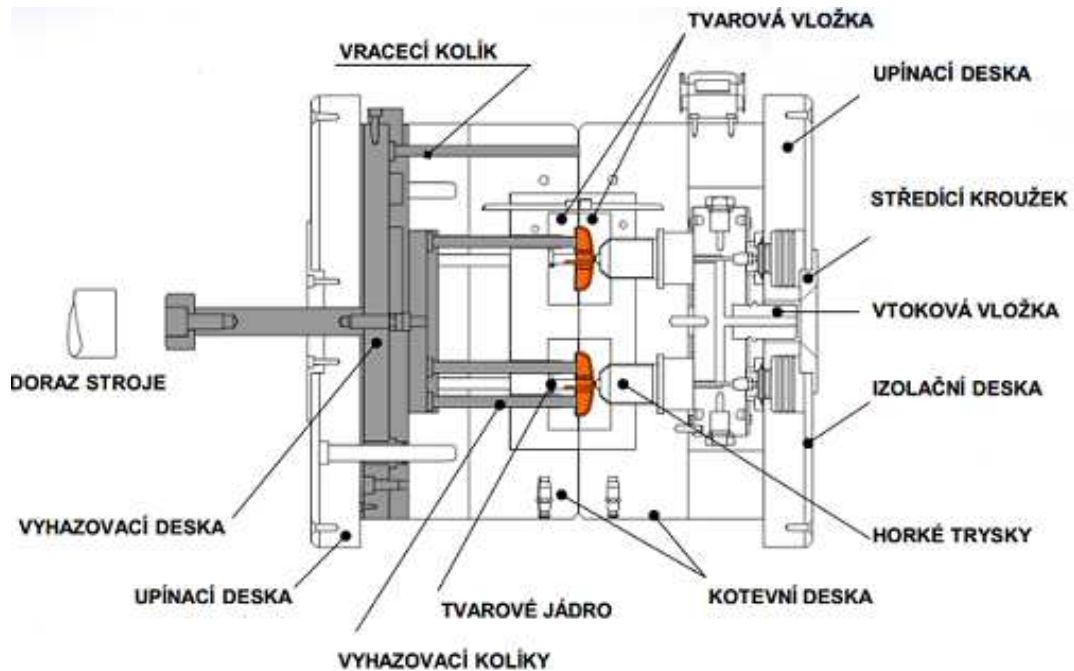
Obr. 14. Schématické znázornění indentační křivky, a) zátěžová křivka; b) odlehčovací křivka; c) tečna ke křivce b v F_{\max} . [6]



Obr. 15. Schématické znázornění příčného řezu vtisku. a) indentor; b) povrch zbytkového plastického vtisku ve zkušební tělese; c) povrch zkušební tělesa při maximální hloubce vtisku a maximálním zkušebním zatížení. [6]

3 VSTŘIKOVACÍ FORMY

Vstřikovací forma je nástroj, který je v průběhu vstřikování naplňován roztaveným plastem. Nástroj se upíná do vstřikovacího stroje, který taveninu dopraví do dutiny formy. Forma se skládá z mnoha částí, z nichž každá splňuje požadovanou funkci. Výrobní technologii především ovlivňuje použitý materiál, vstřikovací stroj a zaformovaný výstřik. [7]



Obr. 16. Schéma a popis vstřikovací formy. [8]

3.1 Funkční systémy forem

K nejdůležitějším funkčním systémům patří vyhazování výstřiku, temperace formy, odvzdušnění a dostatečně tuhé rámy forem. Ve zvláštních případech formu doplňují posuvné boční čelisti, způsob vyhazování výstřiků se závity, ostříhování jejich vtokových zbytků a pod. [10]

3.1.1 Vyhazování výstřiků

Vyhazování výstřiků z formy je činnost, při které se z dutiny nebo z tvárníku otevřené formy vytlačí nebo vysune hotový výstřik. Slouží k tomu vyhazovací zařízení, které je součástí formy a svojí funkcí zajišťuje automatický výrobní cyklus. [10]

Dvě fáze:

- dopředný pohyb, vlastní vyhazování

- zpětný pohyb, návrat vyhazovacího systému do původní polohy [10]

Pro kvalitní vyhazování výstřiku je potřeba hladkého povrchu a úkosovitosti jejich stěn ve směru vyhazování. Úkosy nesmějí být menší než 30°. Výstřik musí být vysouván rovnoměrně, aby nedošlo k jeho přičení, a tím vzniku trvalé deformace nebo jinému poškození. Umístění, tvar a rozložení vyhazovačů může být různé. Dají se použít k vytváření funkční dutiny nebo také jako část tvárníku. U hlubokých tvarů nesmíme zapomenout počítat s jejich zavzdušněním. [10]

Skoro vždy zůstávají na výstřiku stopy od vyhazovacích kolíků, proto se výstřik podle možnosti opraví, nebo se vyhazovače umístí na stranu, kde stopy nebudou vadit. Můžeme změnit i vyhazovací způsob, tím se ale změní zaformování výstřiku a celá koncepce formy. Vyhazuje se krom výstřiků i vtokový zbytek. Vtokový zbytek se při vhodném uspořádání může od výstřiku záměrně oddělit. [10]

Vyhazovací systém se vyvine:

- narážecím kolíkem o traverzu vstřikovacího stroje (kolík je axiálně seřiditelný)
- hydraulickým nebo pneumatickým zařízením (měkké vyhazování)
- ručním vyhazováním nejrůznějšími mechanismy (pro jednoduché a zkušební formy) [10]

Zpětný pohyb se zajišťuje:

- vratnými kolíky
- pružinami vždy v kombinaci s jiným systémem
- speciálním mechanickým, hydraulickým nebo vzduchovým zařízením [10]

3.1.2 Temperování forem

Slouží k udržení stálého teplotního režimu formy. Cílem je zachovat všechny technologické požadavky na výrobu při dosažení optimálně krátkého pracovního cyklu vstřikování. Děje se to následkem ochlazování, případně vyhříváním celé formy nebo jen její části. [10]

Při vstřikování se přivádí roztavený polymer do formy, který se ochlazuje na teplotu vhodnou pro vyjmutí výstřiku. Plnění tvarové dutiny tedy ovlivňuje temperance a zároveň zajišťuje správné tuhnutí a chladnutí plastu. Forma se při každém vstřiku ohřívá. Všechny další výstřiky je třeba zase vyrobit při stanovené teplotě, proto je důležité abychom přebytečné teplo během pracovního cyklu odvedly temperanční soustavou formy. [10]

Mnohé plasty jsou zpracovány při vyšší teplotě formy (100-120°C). V tomto případě jsou tepelné ztráty formy větší, než její ohřátí taveninou a musí se ohřívat. Při zahájení výroby je potřeba nejdříve formu vyhřát na pracovní teplotu, jinak by nebyla zaručena dostatečná kvalita výstřiku. [10]

Proto má temperance za úkol:

- zajistit rovnoměrnou teplotu formy na optimální výši po celém povrchu její dutiny
- odvést teplo z dutiny formy naplněné taveninou, tak aby měl pracovní cyklus ekonomickou délku [10]

Jestliže má forma požadovanou hmotnost a dobře řešený temperační systém, zvětší se její rozměrová i tepelná stabilita a sníží se nebezpečí deformace, při vysokých vstřikovacích tlacích. [10]

Nerovnoměrné rozložení teplot formy způsobilo změnu rozměrových a zejména tvarových úchylek výstřiku. Záměrně se někdy odlišně temperují různé části formy, aby se zamezili tvarové deformace způsobené anizotropií smrštění plastu. V Tab. 6 jsou uvedeny požadované teploty formy při zpracování plastů za dané teploty taveniny. [10]

Tab. 6. Teploty formy a taveniny při zpracování plastů. [10]

Termoplast	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]
ABS	190-250	50-85
PA 6	230-290	40-120
PC	280-320	85-120
PE-HD	180-270	20-60
PE-LD	180-270	20-60
PMMA	200-250	50-80
POM	180-220	50-120
PP	170-280	20-100
PS	180-260	55-80
PVC tvrdé	190-220	30-60
SAN	200-260	50-85
PSU	340-400	120-160
PEEK	380-430	160-220
LCP	310-360	65-95

3.1.3 Odvzdušnění forem

Odvzdušnění tvarových dutin forem nepatří k převládajícím problémům při navrhování forem. Jeho důležitost vyplyne při zkoušení hotového nástroje, kde odvzdušnění může mít za následek nekvalitní vzhled výstřiku, nebo jeho nízkých mechanických vlastností. Zhotovit odvzdušnění je někdy snadné a jindy je však jeho vyřešení složité. Znalost některých zákonitostí při plnění formy může pracovníkům ušetřit mnoho starostí. [10]

3.1.4 Formy na výstřiky se závity

Tuto výrobu doprovází řada problémů, především v oblasti odformování a vyhazování. Řeší se složitost formy, nebo její zvýšená pracnost při vyšroubování výstřiku ze závitového trnu. Pokud je to možné, doporučuje se proto vyhýbat závitům u výstřiků a spojení nahradit pružnými systémy. [10]

Vyrobené profily plastových závitů by neměli být jemné a ostré. Z pevnostních důvodů by měli mít velký nosný profil, bez ostrých hran, aby se vyvarovalo vrubovému účinku dílů. Z toho důvodu se závity vyrábějí většího průměru, s vyšším stoupáním jako mají oblé, trapézové závity. Vhodné jsou přerušované závity, které jsou dobře odformovatelné. [10]

Vyrábějí se výstřiky se závity:

- vnějšími
- vnitřními [10]

v malých sériích ve formách:

- jednodílných čelist'ových
- dvoudílných čelist'ových rozevíracích i výměnných
- se závitovými jádry výměnnými
- s pevným stíracím závitovým trnem
- rozpínacích trnech nebo vložkách [10]

V sériové výrobě se používá automatická produkce s poměrně složitými formami s automatickým vytáčením a dokonalým vyhazováním. [10]

Způsob vytáčení výstřiku ze závitového trnu se řeší pomocí:

- šroubu a matice s velkým stoupáním, ovládané pohybem formy

- ozubené tyče s ozubeným kolem, ovládané otvíráním a uzavíráním formy
- ozubené tyče s ozubeným kolem, ovládané hydraulickým válcem
- přídatným elektromotorem
- jiným vytáčivým uspořádáním [10]

Při konstrukci formy je potřeba omezit rotační pohyb mezi výstřikem a závitovým trnem. U nerotačním tvarů to není potřeba. Nejpoužívanější způsob zamezení protočení výstřiku je vytvoření tvarových zářezů po obvodě. U součástí kde to není možné, se zvolí nástřik bočním vtokem, kterým se výstřik zajistí proti otáčení. [10]

3.1.5 Boční posuvné čelisti forem

Výstřiky s bočními otvory, výstupky nebo různými zahlobenými, které leží kolmo na osu formy, se vytvářejí s pohyblivými čelisti. Pro ovládání těchto forem se používají mechanické, pneumatické nebo hydraulické prvky. [10]

Pohyblivé čelisti mohou upevnit jádra, formovat tvarové části výstřiku, které nelze jiným způsobem zaformovat. Čelisti se dělí na vnitřní nebo vnější, s pohybem kolmým, nebo různými úhly k ose formy. [10]

Čelisti jsou upevněny na pohyblivé části formy. Pohyb se ovládá šikmými nebo lomenými kolíky, případně hydraulickými nebo pneumatickými tahači. Mechanické šikmé, válcové nebo lomené kolíky při své funkci používají otevírací a uzavírací pohyb vstřikovacího stroje s formou. Otvíráním a uzavíráním formy je možné změnit vytáčecí pohyb šroubu a matice v přímočarý pohyb bočních částí. Ten způsob se ale moc nepoužívá. V přitisklé poloze během vstřikování je potřeba čelisti pevně uzamknout. Čelist se uzamkne tak, že je opřena svou zkosenou částí o opěrnou lištu formy. Správná poloha se zajišťuje pomocí pružiny a kolíku i dalšími způsoby. [10]

Počet rozměrů nevázaných formou roste zvětšujícím počtem pohyblivých čelistí i počtem dělicích rovin. Tuto skutečnost musíme brát v úvahu při lícování a tolerování výstřiku i formy. [10]

3.1.6 Oddělování vtokových zbytků od výstřiků ve formě

Technologičnost výrobku i vysokou produktivitu jeho výroby vyžadují podmínky ekonomického řízení. Jedna z podmínek zvýšení automatizace vstřikování je oddělení vtokových zbytků přímo z formy, tím pádem se odstraní jejich dodatečné opracování. [10]

Součástí fáze pracovního cyklu představovaného otevíráním formy, případě vyhazováním výstřiků, je oddělování vtokových zbytků od výstřiků. Jeho funkce však neobsahuje prodloužení pracovního cyklu a potřebné zařízení nemá podstatně zvýšit složitost formy.

Taková činnost se řeší:

- vhodnou konstrukcí vtokového systému
- přídatným mechanickým zařízením formy [10]

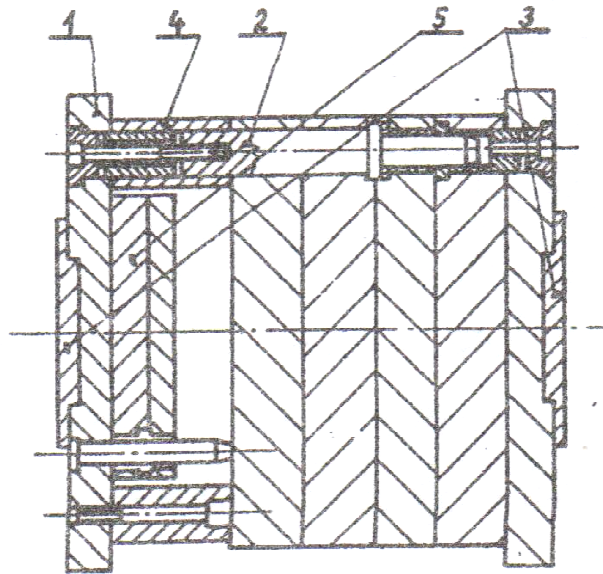
Forma vybavená vyhřívanými vtokovými soustavami se u většiny případů řeší tím, že vyhřívaná tryska zasahuje až k samotnému výstřiku. Tímto způsobem vznikne výrobek bez zbytku, nebo jen s malou stopou po vtoku. Proto je systém oddělování vtokových zbytků aktuální hlavně u forem, které mají studenou vtokovou soustavu. Nově se k oddělování vtokového zbytku používá laser. [10]

3.1.7 Rámy forem a jejich jednotlivé díly

Rám formy je skupina vzájemně spojených desek se středícím, vodícím a spojovacím příslušenstvím. Spojené desky fungují jako nosič tvarových dutin a vtoků, vypracovaných přímo v deskách, nebo ve speciálních vložkách. Rám se skládá z dalších funkčních celků, které pak tvoří kompletní formu s danou funkcí. [10]

Dále rám musí umožnit:

- správné upevnění na vstřikovacím stroji
- dokonalé a bezpečné upnutí na stroji
- přesné vedení pohyblivých dílů formy
- snadné upevnění tvarových vložek a dalších funkčních dílů
- vhodné umístění temperačního a vyhazovacího systému [10]

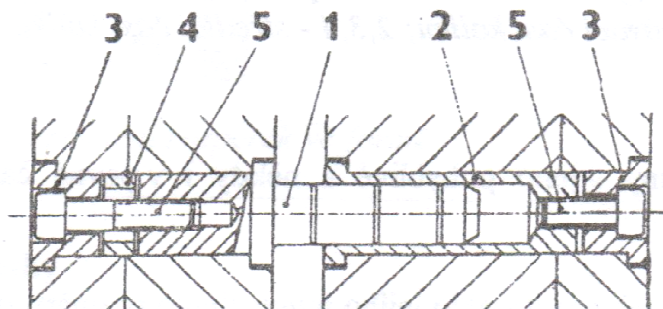


Obr. 17. Nejdůležitější díly rámu formy. [10]

1 - rám, 2 - vodící a spojovací části, 3 - středící kroužky, 4 - rozpěrky, 5 - vyhadzovací desky

1) Vodící a spojovací součásti

Rám formy je složen z jednotlivých desek a dalších dílů v pevnou a pohyblivou část. Tyto části jsou vedeny, ustředěny a spojeny pomocí vodících pouzder, kolíků a dalších součástí. Na Obr. 18 je uveden způsob spojení, které se nejčastěji používají. Výhoda tohoto způsobu je, že spojení jednotlivých desek rámu i vlastního vedení obou částí je vyřešeno tak, že zabírá málo místa. Tím je lepší variabilita a lépe jde vytvořit dokonalejší temperace a vhodné umístění funkčních dílů. [10]



Obr. 18. Vodící a spojovací součásti. [10]

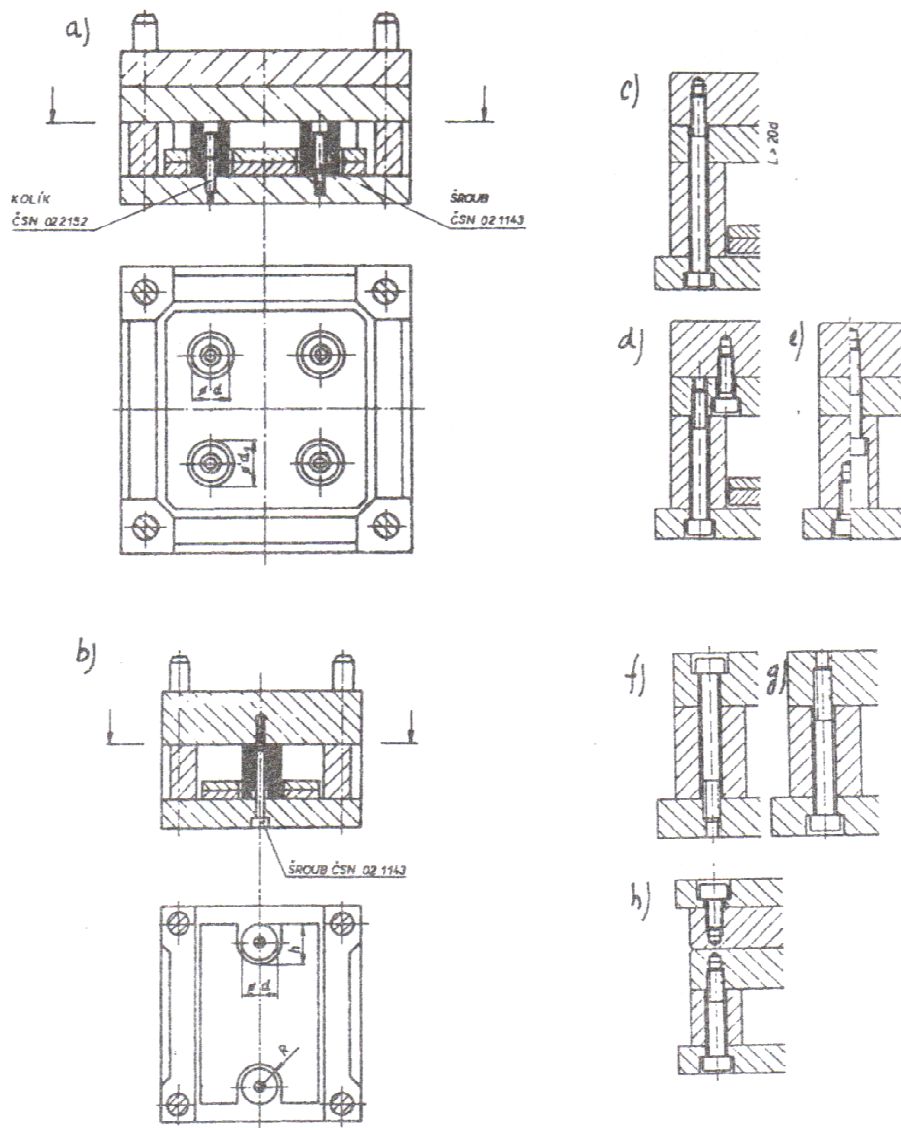
1 - vodící kolík, 2 - vodící pouzdro se závitem, 3 - podložka, 4 - středící trubka, 5 - šroub

2) Rozpěrky

Doplňují rám formy v pohyblivé i v pevné části. Jsou potřebné z toho důvodu, že:

- zvětšují stavební výšku
- vytváří ve formě prostor pro umístění vyhazovacích desek
- zmenšují stykovou plochu mezi funkční a upínací částí formy
- u forem s vyhřívanými tryskami vytváří prostor pro vytápěné rozvodné bloky [10]

Rozpěrky mají kruhový nebo i jiný výrobně jednoduchý průřez. Rozměry a umístění je vybráno tak, aby byla dostatečná tuhost rámu a průhyb desek minimální. Na Obr. 19 můžeme vidět různé způsoby rozmístění a upevnění rozpěrek v rámu formy. [10]



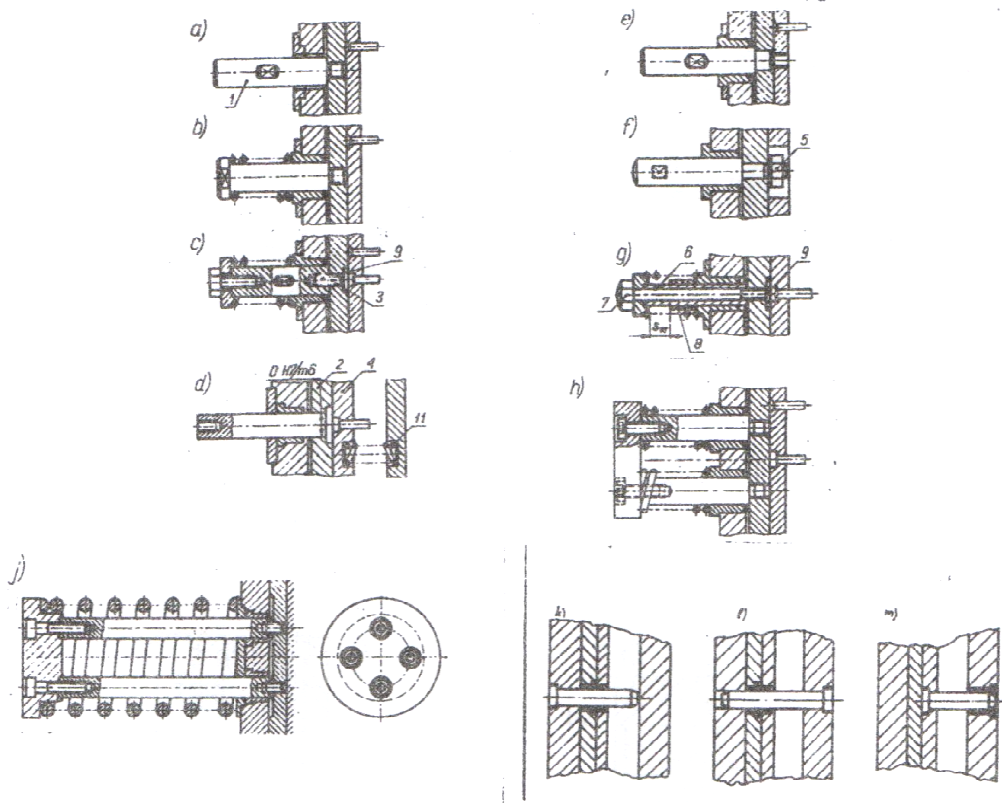
Obr. 19. Způsoby upevnění rozpěrek ve formě. [10]

3) Vyhazovací desky

Používají se pro ukotvení, vedení, ovládání a zajištění vyhazovačů v pracovním i zpětném pohybu. Používají se ve složení jako deska kotevní a opěrná. [10]

Vyhazovací desky, hlavně kotevní deska, můžou mít svoje vlastní vedení. Pro malé vyhazovací desky stačí vedení dvěma vodícími kolíky. U větších se používají čtyři kolíky. Aby se zabránilo jejich křížení, musí být rozmístění symetrické. [10]

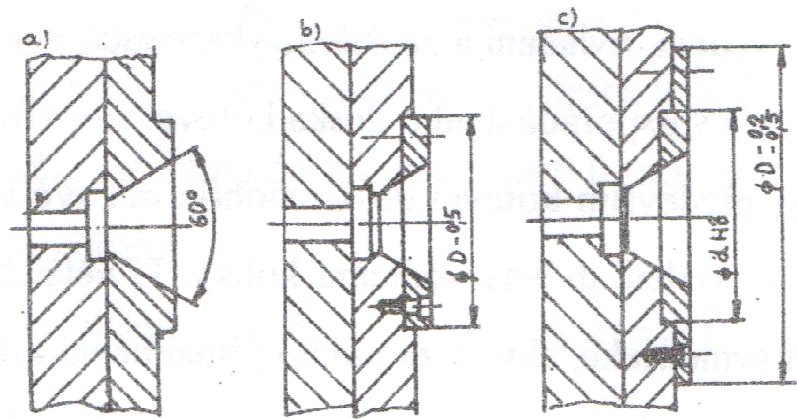
Pokud má forma dostatečně tuhé vyhazovače, lze použít vyhazovací desky bez vedení. Ve zvláštních případech jsou vedeny ovládacím čepem vyhazovače v rámu formy. Taková uspořádání jsou na Obr. 20. Podle konstrukce v rámu a podle zatížení vyhazovačů při vyjímání výstřiků se volí velikost a tloušťka desek. [10]



Obr. 20. Vedení vyhazovacích desek. [10]

4) Středící kroužky

Používají se k ustředění formy na stroj, ale také proti jejímu sklouznutí z desky stroje při manipulaci. Z tohoto důvodu jsou u obou polovin formy středící kroužky. Velikosti průměru jsou přiřazeny k jednotlivým typům vstřikovacích strojů. Kroužky i jejich upevnění na rámu formy jsou znázorněny na Obr. 21. [10]



Obr. 21. Různé uspořádání středících kroužků. [10]

3.2 Materiály používané při výrobě forem

Formy jsou velice nákladné nástroje složené z pomocných a funkčních dílů. Během výroby výstřiků se od nich očekává požadovaná kvalita, životnost a nízké pořizovací náklady. Hlavním činitelem pro splnění těchto podmínek je materiál forem, který je ovlivňován provozními podmínkami výroby, určené:

- druhem vstřikovacího plastu
- přesností a jakostí výstřiku
- podmínkami vstřikování
- vstřikovacím strojem [10]

Pro výrobu forem se používají materiály, které splňují provozní požadavky. Jejich široký výběr byl zmenšen na úzký sortiment jakostí i rozměrů. Přednost se dává materiálům univerzálních typů s širokým rozsahem užitných vlastností.

Mezi takové druhy patří:

- oceli vhodných jakostí
- neželezné slitiny kovů (Cu, Al...)
- ostatní materiály (izolační, tepelně nevodivé...) [10]

Oceli jsou nejpoužívanější materiály pro výrobu forem. Mají dobré pevnosti a další mechanické vlastnosti a těžko se dají nahradit. Na kvalitu forem má vliv celková dimenze jednotlivých dílů, tepelné zpracování i způsob zacházení s formou. [10]

I dalším materiálům je potřeba se věnovat. Některé jejich fyzikální i další vlastnosti jsou stanoveny pro speciální použití pro různé díly forem. [10]

3.2.1 Konstrukční oceli

Na výrobu forem se nejčastěji používají oceli konstrukční třídy 11. Slouží pro výrobu méně náročných a namáhavých dílů. Jsou to hlavně oceli 11373, 11523, 11600. Tyto oceli zůstávají v přírodním, nebo normalizačně žíhaném stavu. Jejich Přehled je uveden v Tab. 7. [10]

Tab. 7. Přehled a použití ocelí. [10]

Užití	ČSN	Zpracování	Poznámka
Rozpěrky	11 373	dobrá obrobiteľnosť	pevnost 370 - 450 MPa
	11 375		pevnost 370 - 450 MPa
	11 500		pevnost 500 - 620 MPa
	11 600		pevnost 600 - 720 MPa
Dorazy	11 600	dobrá obrobiteľnosť	pevnost 600 - 720 MPa
	11 700		pevnost 600 - 720 MPa
Desky	11 373	dobrá obrobiteľnosť	málo namáhané
	11 375		málo namáhané
	11 500		středně namáhané
	11 600		značně namáhané
Šrouby	11 109	výborná obrobiteľnosť	málo namáhané
Šroubení	11 600	dobrá obrobiteľnosť	značně namáhané

U desek, které vyžadují vyšší pevnost, se používají konstrukční oceli uhlíkové ušlechtilé 12 060, 12 050. Používají se v přírodním stavu, nebo zušlechtilé až na hodnotu 850 MPa. [10]

Tab. 8. Přehled a použití uhlíkové ušlechtilé oceli. [10]

Užití	ČSN	Zpracování	Použitelnost
Tvárnice	12 050	povrchové kalení	rozměrové díly
Játro	12 060	povrchové kalení	houževnatost
Rámy	12 061	povrchové kalení	houževnatost

3.2.2 Cementační oceli

Tato skupina ocelí má malou pevnost v žhávém stavu a naopak dobrou obrobitelnost, tvářitelnost a malou náchylnost k praskání při kalení. Proto se nejčastěji používají na tvárnice, vyráběné vtačováním za studena. Cementační vrstvou se zvyšuje pevnost a tvrdost, která se zakalí až na tvrdost přes 700 HV. [10]

Nejdůležitější vlastností cementačních ocelí je kalitelnost a prokalitelnost, která určuje pevnost jádra po tepelném zpracování. Jestli-že jádro není dost pevné, může se snadno promáchnout. Větší tloušťka cementační vrstvy zvětšuje deformace při kalení. [10]

Nejčastěji se používá chrommanganová ocel 19 487, určená ke kalení v oleji. Tento typ ocele má střední prokalitelnost, vysokou houževnatost a dobrou odolnost cementované vrstvy proti opotřebením. Dobrá obrobitelnost ve stavu žíhaném na měkko i lešitelná. Pro náročnější aplikace je tato ocel vyráběna i v přetaveném stavu. [10]

Ocel 19 486 má stejně vlastnosti jako předchozí, akorát má nižší obsah uhlíku a pevnost jádra. [10]

Pro vtačování se používá nástrojová uhlíková ocel 19 015. Výborně tvářitelná za studena, houževnatá a velmi dobře opracovatelná a lešitelná. Kalení probíhá ve vodě a vykazuje značné deformace. Má malou pevnost jádra po tepelném zpracování. [10]

Pro méně složité díly se cementační nástrojové oceli nahrazují ocelí 12 010, 12 020 nebo legovanými 14 220, 14 221. [10]

Tab. 9. Přehled a použití cementační oceli. [10]

Užití	ČSN	Zpracování	Použitelnost
Funkční díly	12 010	cementování	vtačování
Pouzdra	14 220	cementování	dobrá obrobitelnost i lešitelnost
Kolíky	19 486	cementování	dobrá lešitelnost
	19 487	cementování	dobrá lešitelnost

3.2.3 Kalitelné oceli

Tyto oceli s malou prokalitelností se využívají spíše na málo výkonné formy jednodušších tvarů a pomocných dílů forem. Například při kalení ve vodě se prokaluje pouze menší povrchová vrstva a jádro zůstává měkké. U ocelí 19 083, 19 191 popřípadě 12 060 jsou deformace při kalení jisté. Takzvané legované oceli se zvýšenou prokalitelností se používají pro rozměrnější formy s vyšší trvanlivostí. Tyto oceli se vyznačují menšími deformacemi při kalení. Zejména jsou to oceli manganové 19 312 nebo 19 314. Tyto dvě oceli mají dobrou obrobiteľnost i houževnatost a větší prokalitelnost. Dále pak ocel křemíková 19 452 má oproti předešlým typům oceli lepší obrobiteľnost a větší houževnatost. K tomuto typu se dá také přiřadit ocel chromová 19 421 a wolframová 19 732. Největší využití mají ve výrobě vyhazovačů. Již zmíněné legované oceli se mohou kalit na vzduchu i v oleji a v tomto směru tvoří významnou skupinu ledeburitické chromové oceli 19 436, 19 437, 19 572, 19 573, 19 574. Nejpoužívanější je 19 436. Má vysokou prokalitelnost i odolnost proti opotřebením, ale zato sníženou houževnatost a zhoršenou obrobiteľnost. [9]

Pro střední a velké funkční části forem se používají oceli 19 662, 19 663, 19 665 a 19 652. Nahrazují cementační oceli pro nižší deformaci při kalení a možnost jejich nitridace pro zvýšení životnosti. Pro součásti s fotochemickým dezénem se používá ocel 19 663. Mají velmi dobrou leštitelnost. Pro součásti s vysokým leskem se používají oceli s větším obsahem niklu (4-5%), například oceli 19 642 a 19 665. [9]

Do skupiny ocelí se zvýšenou houževnatostí a malými deformacemi při kalení patří také chrommolybdenovanadová ocel 19 550. Tato ocel dobře snáší zvýšené provozní teploty. Při popouštění si udržuje tvrdost 53 HRc a proto jí lze nitridovat. Zvýší se tím otěruvzdornost a je vhodná jako univerzální ocel pro různé provozní namáhání. [9]

Do moderních výkonných typů patří chrommolybdenvanadová ocel PN 19 572, která se používá pro práci za studena i za tepla. Má dobrou odolnost proti opotřebením, dobrou stálost rozměru při kalení a velkou prokalitelnost. Nevýhodou je že má malou houževnatost, zhoršenou opracovatelnost i ve stavu žíhaném na měkko. Nejčastěji se používá na exponované části forem. Lepších vlastností dosahuje ocel 19 581, především z hlediska abrazivního opotřebením. Houževnatost i obrobiteľnost je však dobrá. [9]

3.2.4 Antikorozi oceli

Používají se na tvarové části forem, které zpracovávají chemicky agresivní plasty (PVC apod.). Do této skupiny patří nástrojová nerezavějící chromová ocel 17 029, která je určena ke kalení v oleji. Vyznačuje se velkou prokalitelností, zvýšenou odolností proti korozi a dobrou stálostí rozměru při kalení. V kaleném a popouštěném stavu se projevuje zvýšená odolnost proti korozi. Nelze použít v tepelně nezpracovaném stavu. Tvrdost po kalení není moc vysoká a proti abrazivnímu opotřebení není moc výhodná. [9]

V zahraničí se vyrábějí modernější typy antikorozi oceli, které mají zvýšený obsah chromu a molybdenu. Jsou výkonnější z hlediska odolnosti proti korozi i opotřebení. [9]

Tvarové části se upravují chromováním. Zvyšuje se tak tvrdost, lesk i ochrana povrchu, při zpracovávání abrazivního a chemicky agresivního plastu. Úprava se provede po předchozím tepelném zpracování. Na tvrdý dobře vyleštěný povrch se nanáší tvrdochrom ve vrstvě 20 až 30 μm . [9]

3.2.5 Slitiny mědi

V dnešní době se stále více začínají používat slitiny mědi. Používají se pro chladicí trny tenkých tvárnků, tvarové vložky, vytáčecí matice a šrouby, vyhazovací kolíky, vodící a středící pouzdra, různá vedení apod. Mají některé výhody oproti ocelím.

Jsou to hlavně:

- dobrá tepelná vodivost
- dobrá chemická odolnost
- dobré kluzné vlastnosti

Využitím těchto vlastností dosáhneme:

- zkrácení pracovního cyklu vstřikování
- vyšší jakostí výstřiku
- vyšší funkční bezpečnosti [9]

Jedna z nejdůležitějších vlastností je velká tepelná vodivost, která je oproti ocelím zhruba 4 krát větší. U ocelových forem je chladicí čas okolo 70% celého cyklu. Jeho zkrácením o 20 až 50% za pomoci slitin Cu, docílíme zkrácení celého pracovního cyklu a tím i snížení ceny výstřiku. Výhodnější technologické časy nám zvyšují kvalitu struktury plastu, dosahují lepší jakosti povrchu a přesnější geometrii tvaru. Největší nevýhoda Cu slitin je

špatná opracovatelnost elektroerosivními metodami. Jednoduší je zase třískové opracování. Cu slitiny se také vyznačují nízkým koeficientem tření, to je vhodné pro pohyblivé díly a snadnější odformování s větší pracovní bezpečností. [9]

Čistá měď se používá poměrně málo. Je vhodná pro zhotovení elektrod pro elektroerosivní opracování. Pro funkční díly se používají různé druhy slitin mědi s dalšími kovy. Výběr optimální slitiny bude záležet na tom, která kritéria budou upřednostněna:

- Slitiny CuSiNi jsou výhodné svojí tepelnou vodivostí, ale mají zato nízké mechanické vlastnosti
- slitiny CuAlFe, CuAlFeMn, CuAlFeCo, CuAlFeNi mají špatnou tepelnou vodivost, dobrou chemickou odolnost, nízký koeficient tření a vysokou pevnost v tlaku (700 MPa) [9]

3.2.6 Slitiny hliníku

Formy ze slitin hliníku a dalších kovů mají své speciální využití. Mají menší pevnost a odolnost proti opotřebení než oceli. Zato mají dobrou tepelnou vodivost, korozi-vzdornost. [9]

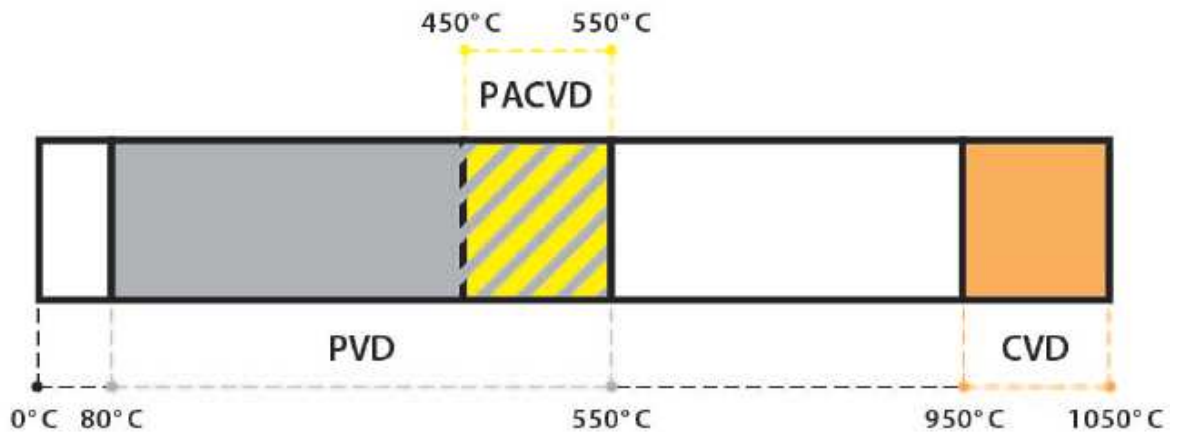
Nejčastěji se používají na formy pro strukturní pěny. Je zde potřeba intenzivní chladicí účinek, dobrá chemická odolnost proti korozi i dalším činitelům, které zasahují během vstřikování plastů s nadouvadlem. Jejich vstřikovací tlaky jsou 10 krát menší oproti formám na vstřikování kompaktních plastů a proto nevyžadují tak velkou pevnost. [9]

Nejvíce se osvědčila pro výrobu funkčních dílů válcová slitina 424203.6 (Al-CuMg), která má vysokou tvrdost po vytvrzení. Odlévané materiály se už moc nepoužívají. U nich je těžké dosáhnout hladkého a bezporézního povrchu. Poréznost se nejvíce projevuje u materiálu i temperačních kanálů. Z toho důvodu se do takových odlitků přidávají měděné chladicí trubky. [9]

4 POVLAKOVÁNÍ

4.1 Technologie povlakování

Podle principu se povlakování dělí do tří hlavních skupin: PVD, CVD a PACVD. V mé práci se budeme zabývat metodami PVD a PACVD. [11]



Obr. 22. Povlakovací teploty. [11]

4.1.1 PVD

Je to metoda, která se používá pro výrobu tvrdých povlaků na bázi kovů pomocí částečně ionizovaných par kovu a jejich reakcí s některými plyny, tím vznikne na základním materiálu tenká vrstva s definovaným složením. Metody nejčastěji používané jsou napráškování a obloukové napařování. U napráškování se částečně ionizovaná pára vytváří bombardováním kovových terčů energetickými ionty pracovního plynu. Při obloukovém napařování se využívá opakující se obloukový výboj, který odpařuje materiál z kovového terče. Všechny procesy PVD pracují při podmínkách vysokého vakua. [13]

K povlakování u metody PVD se používá velké množství nástrojů a komponent s vrstvami karbidů, nitridů a karbonitridu kovů, jako jsou Ti, Cr, Zr nebo slitin AlCr, AlTi a TiSi. Tyto povlaky se používají pro obráběcí a tvářecí nástroje, mechanické součástky a zdravotní nástroje, které využívají dobrých mechanických vlastností a vzhledu jednotlivých povlaků. [13]

Teplota u metody PVD se pohybuje mezi 250 °C a 450 °C. Ve zvláštních případech mohou být PVD povlaky v závislosti na druhu základního materiálu a aplikaci nanášeny pod teplotou 70 °C nebo naopak až při teplotě 600 °C. [13]

Tyto povlaky se mohou použít jako monovrstva, multivrstva nebo gradientní vrstva.

Nejnovější řady povlaků mají nanostrukturální a supermřížkové variace vícevrstvých povlaků, které poskytují lepší vlastnosti. Strukturu povlaků lze optimalizovat vzhledem k požadovaným vlastnostem, jako je adheze, tření, tvrdost atd. Druh povlaku je vybírán vždy podle náročnosti aplikace. [13]

Tloušťky vrstev se pohybují mezi 2-5 μm , ale mohou být tenké i jen několik set nanometrů nebo silné až 15 nebo více μm . [13]

Materiály určené k povlakování mohou být neželezné kovy, oceli, karbidy wolframu nebo pokovené plasty. Na základní materiál je možnost nanesení PVD povlaku omezena pouze stabilitou materiálu při nanášecí teplotě a jeho elektrickou vodivostí. [13]

4.1.2 PACVD

Je to povlakování nástrojů při mnohem nižších teplotách než u technologie CVD. Plazmou podporovaná CVD technologie umožňuje snížit teplotu, která je potřebná pro vznik vrstvy na povrchu základního materiálu na 470-530 $^{\circ}\text{C}$. Nástroje se povlakuji až po finálním zušlechtnění na požadovanou tvrdost a během povlakování nedochází k rozměrovým změnám. Tato metoda je vhodná i pro povlakování dutin. PACVD povlaky mají extrémně nízký koeficient tření (až 0,1). [12]



Obr. 23. Povlak PACVD splňuje lépe požadavky než původně využívaný CVD. [12]

Výhody metody PACVD

- Vrstvy PACVD zvyšují několikanásobně životnost nástrojů.

- Umožňuje provádět nitridaci a povlakování v jednom procesu.
- Nepotřebuje vysoké vakuum, takže odplynění zařízení je snazší a kratší.
- Zařízení PACVD nepotřebuje rotační části. Povlakované díly nerotují. V důsledku nucené cirkulace plynu v povlakovací komoře se vylučuje homogenní povlak i na velmi složitých nástrojích s dutinami. [12]

Umožňuje povlakování rozměrných a těžkých kusů až do hmotnosti 1 250 kg. [12]

Výhody nástrojů povlakovaných PACVD

Tvrdé PACVD povlaky se používají pro optimalizaci povrchových vlastností kovových nástrojů a konstrukčních součástí. Díky modifikovanému povrchu se zvyšuje jejich životnost. Pro použití možnosti nástroje povlakovat technologií PACVD jednoznačně hovoří konečné vlastnosti povlakovaných součástí:

- několikanásobné zvýšení životnosti;
- nízký koeficient tření;
- výborné tribologické vlastnosti;
- snížené opotřebení;
- žádné změny v mikrostruktuře a rozměrech;
- možnost povlakování dutin;
- snížení spotřeby mazadel a separátorů;
- zvýšení odolnosti proti tepelné únavě;
- snížení přilnavosti hliníků, mědi a jiných barevných kovů na povrch nástroje. [12]

4.2 Druhy povlaků

4.2.1 PACVD 1

Je tvrdší než povlaky PVD 4 a PVD 2 a má velice hladký povrch, který zajišťuje nízké tření na povrchu, lepší odvod třísky a výbornou odolnost proti opotřebení. Mimo jiné povlak zabraňuje vzniku nárůstků na řezné hraně díky nízké slučitelnosti chemických látek k hliníku. Substrát je nelegovaný a jemnozrný, s možností broušení ostrých hran a má velmi hladký povrch, a výbornou odolnost proti tepelné deformaci. [15]

Aplikace PACVD 1

- Tlakové lití barevných kovů - jádra, vložky, formy, licí komory
- Formy pro vstřikování plastů
- Povlakování mlecích válců
- Povlakování průchozích a neprůchozích dutin
- Povlakování tvarově složitých dílů s úzkými zářezy [11]

4.2.2 PVD 1

Povlak je speciálně navržený povlak s komplexní multivrstvovou strukturou vyráběný obloukovou technologií. Povlak PVD 1 si udržuje vysokou houževnatost a odolnost vůči opotřebení i přes svoji vysokou tvrdost. Tyto vlastnosti jsou naprosto nezbytné pro velké množství aplikací jakou je např. přerušovaný řez, kde vznikají nízké teploty na řezné hraně. Použití PVD 1 povlaků přináší výrazně zvýšení životnosti ve srovnání se standardním povlakem PVD 4. Při tváření PVD 1 povlaky výrazně snižují opotřebení a problémy s nalepováním materiálu, např. u tváření nerezových ocelí. [14]

Aplikace PVD 1

Obrábění

Vynikající pro frézování, soustružení, vrtání a řezné nástroje na opracování vysoko a nízko legovaných ocelí. Vysoký řezný výkon tam, kde na řezné hraně vznikají nižší teploty během obrábění. Vhodný pro obrábění těžko obrobitelných ocelových slitin. [14]

Tváření

Vhodný pro tažení, ražení, stříhání a jiné rázové práce pro vysoko a nízko legované oceli. Rozsáhlá oblast aplikace pro tváření kovů a jiných neželezných materiálů za studena. [14]

Vlastnosti povlaku

- Vysoká tvrdost
- Dobrá adheze
- Dobrá odolnost proti opotřebení
- Zvýšená houževnatost
- Nízký koeficient tření
- Vysoká termální konduktivita [11]

4.2.3 PVD 2

Nahrazuje vrstvy PVD 4 a PVD 1. Využívání vrstev PVD 2 vychází z hodnocení jejich základních vlastností a požadavků průmyslu. Historicky nejstarší vrstvy PVD 4 dosahují tvrdosti HV do 23 GPa a jejich maximální pracovní teplota je 600 °C. Požadavek na velkou abrazivní odolnost vedl k vývoji tvrdých vrstev PVD 1 s tvrdostí HV až 35 GPa, ale bohužel s pracovní teplotou jen do 450 °C. Vrstvy PVD 2 dosahují tvrdosti HV až 33 GPa a mají vysokou pracovní teplotu, která někdy přesahuje 800 °C. Tímto vrstvy PVD 2 splnily nejdůležitější požadavky průmyslových aplikací a vysokou abrazivní odolnost a chemickou stabilitu za vysokých teplot. [16]

Aplikace PVD 2

- Povlakování ořezávacích matic [11]

4.2.4 PVD 3

Povlaky představují nejlepší volbu pro aplikace, kde je důležitá abraze, koroze a oxidační odolnost. PVD 3 vykazují vynikající vlastnosti pro smyk při omezeném mazání. Vysoká tvrdost společně s velmi nízkou křehkostí umožňují vytváření i tlustších vrstev PVD 3 povlaku s velmi dobrou adhezí. Tato vlastnost přináší povlaku široké uplatnění a dodatečnou zvýšenou ochranu před opotřebením. [14]

Aplikace PVD 3

Obrábění

Frézování, soustružení, vrtání a řezné nástroje pro obrábění neželezných materiálů, obzvláště slitiny na bázi Ti a Cu. [14]

Tváření

Tažné, vystřihovací a děrovací nástroje na neželezné materiály, obzvláště slitiny na bázi Ti a Cu, vstřikování plastů, hliníku a odlévání hořčíku. [14]

Zpracování plastů

Nástroje pod vlivem adhezního a korozního opotřebením, např. agresivní a těžko filtrační materiály. [14]

Vlastnosti povlaku

- Nízké pnutí
- Dobrá adheze
- Dobrá korozní odolnost
- Nízký koeficient tření vůči oceli
- Vysoká teplotní stabilita na vzduchu
- Možnosti povlakování tlustších vrstev [11]

4.2.5 PVD 4

Povlaky na bázi PVD 4 patří kvůli svým vyrovnaným vlastnostem k nejběžněji používaným povlakům. Povlak vykazuje nízkou reakci s kovovými materiály a tím zabraňuje opotřebení nástrojů způsobené nalepováním. V současnosti je PVD 4 stále jedním z nejpoužívanějších povlaků pro řezné nástroje. Zlatá barva povlaku v kombinaci s vysoce abrazivní odolností umožňuje využití tohoto povlaku i pro účely povlakování forem, střížných nástrojů a dekorativní povlakování. Vysoká chemická stabilita povlaků je také vhodná pro využití v potravinářském a chemickém průmyslu. Vzhledem ke své univerzálnosti je PVD 4 povlakem s vysokým výkonem a širokým uplatněním. [14]

Aplikace PVD 4

Obrábění

Obrábění materiálů na bázi železa, běžně používaný pro odvalovací frézy, vrtání a výroba závitů při nízkých a středních rychlostech. [14]

Medicínské aplikace

Implantáty, protézy a chirurgické nástroje [14]

Dekorativní povlakování

Hodinářství, propagační předměty apod. [14]

Formy

Nástroje pro tváření kovů a vstřikování plastů [14]

Vlastnosti povlaku

- Vysoká tvrdost
- Dobrá adheze

- Dobrá chemická stabilita
- Zvýšená houževnatost
- Biokompatibilita
- Relativně nízká termální konduktivita [11]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo porovnání mechanických vlastností u vybraných typů povlaků se základním materiálem. Vybrané typy povlaků byly připraveny technologií PVD a PACVD. Základní materiál byla použita ocel 41 9552. Měření mechanických vlastností povlaků bylo realizováno instrumentovanou zkouškou mikrotvrdoosti při aplikovaných zatíženích 10 mN, 50 mn a 250 mN. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cílem diplomové práce bylo:

- Vypracování literární studie na dané téma
- Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část
- Provedení experimentu
- Vyhodnocení naměřených výsledků

6 NAMĚŘENÉ HODNOTY MIKROTVRDOSTI

Pro experimentální část byla vybrána ocel 19 552, na kterou bylo nanášeno 5 různých typů povlaků technologií PVD a PACVD. Ocel 19 552 se běžně používá na výrobu tvarových dutin vstřikovacích forem. Měření mikrotvrdoměru bylo provedeno na nanotvrdoměru Nano-indentation Tester (NHT2) – Opx/Cpx, CSM Instruments (Switzerland) dle normy CSN EN ISO 14577-1.

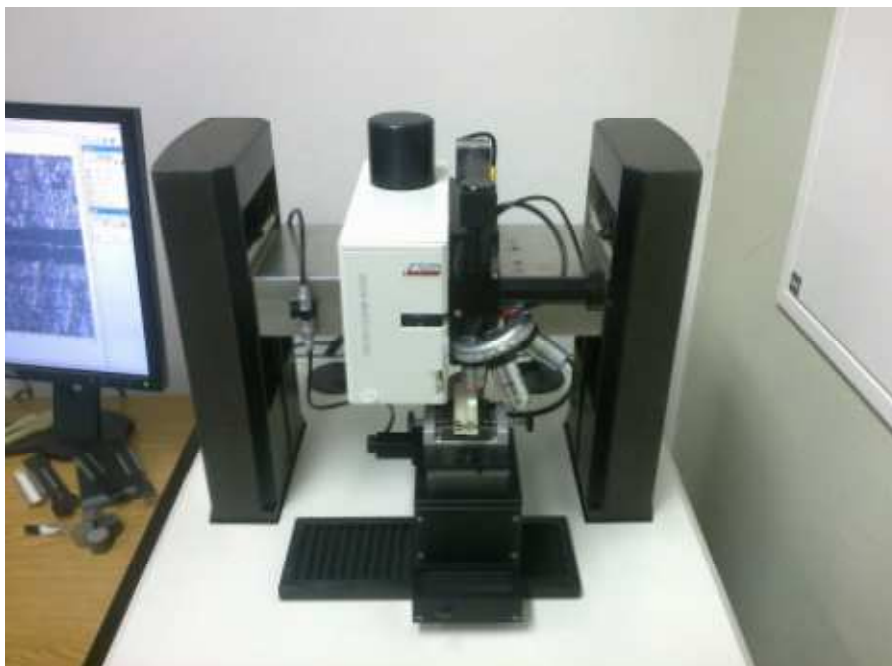
Zvolené parametry zkoušky:

- aplikované zatížení - 10 mN, 50 mN a 250 mN,
- výdrž na maximálním zatížení - 10 s,
- zatěžující a odtěžující rychlost - 20 mN/min (pro 10 mN), 100 mN/min (pro 50 mN) a 500 mN/min (pro 250 mN),
- Poissonovo číslo - 0,3.

Jako indentor byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° (Vickersův indentor). Měření bylo provedeno metodou DSI (Depth Sensing Indentation) a následné vyhodnocení mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.

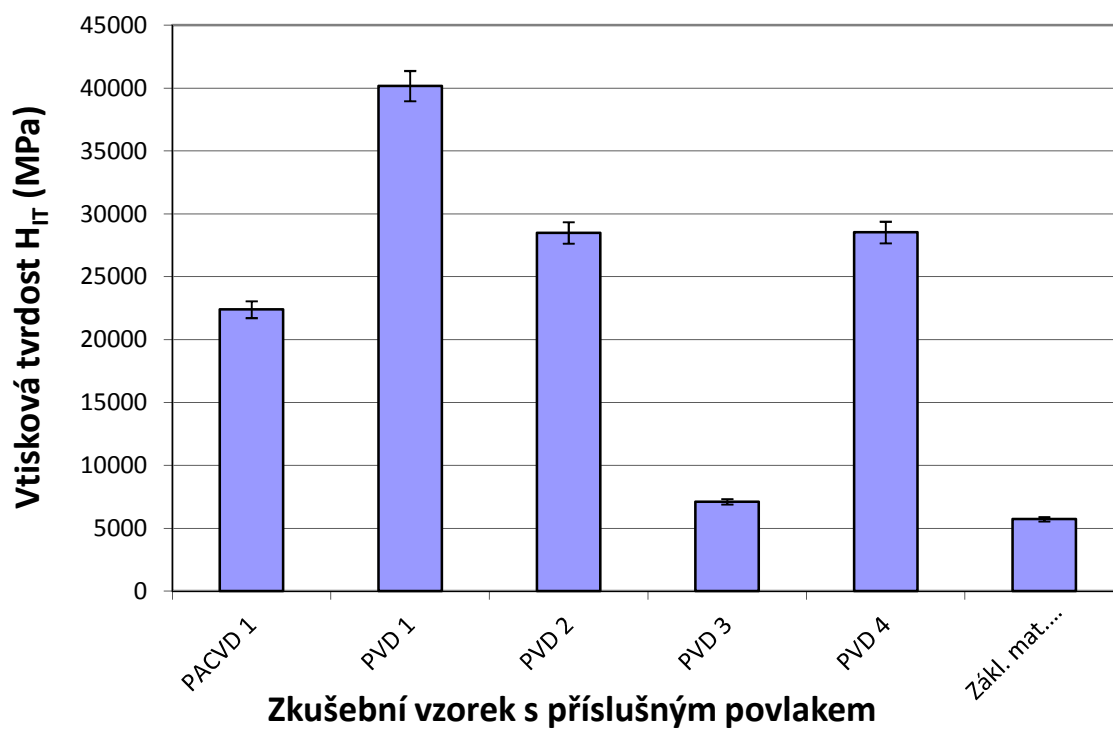
Pro měření byly stanoveny následující parametry:

- H_{IT} – vtisková tvrdost (MPa)
- E_{IT} – vtiskový modul pružnosti (GPa)
- C_{IT} – vtiskové tečení (%)
- W_{total} – celková deformační práce (pJ)
- W_{pl} – plastická deformační práce (pJ)
- η_{IT} – elastická část deformační práce (%)



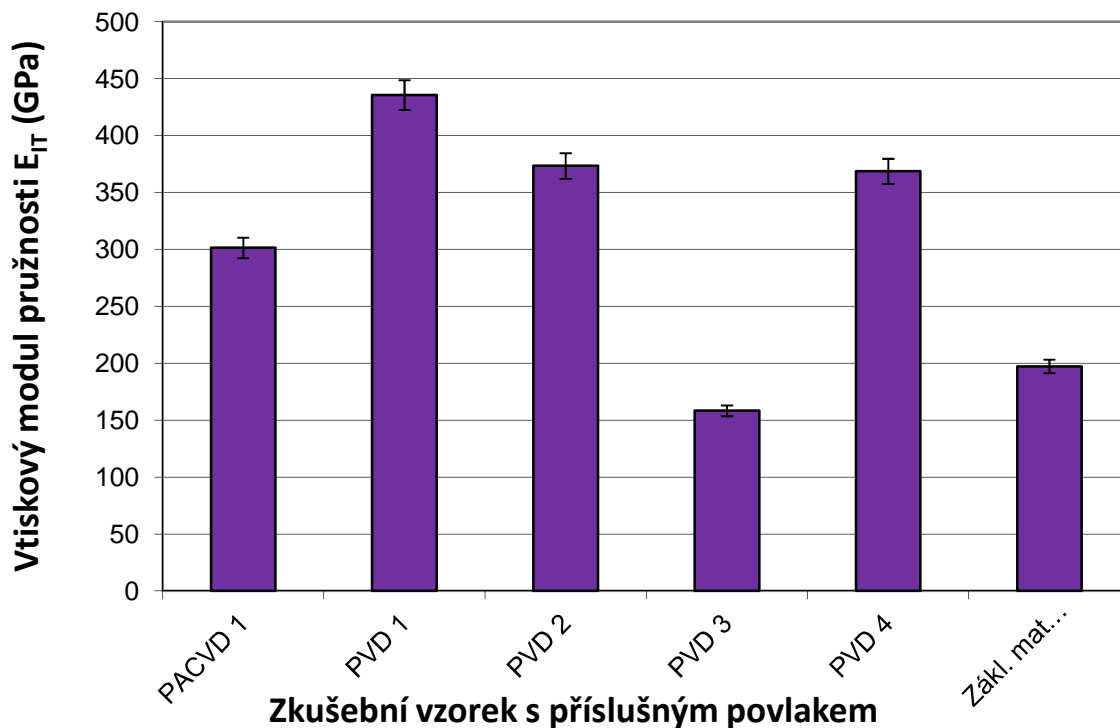
Obr. 24. Nanotvrdoměr (NHT2) – Opx/Cpx.

6.1 Naměřené hodnoty při aplikovaném zatížení 10 mN



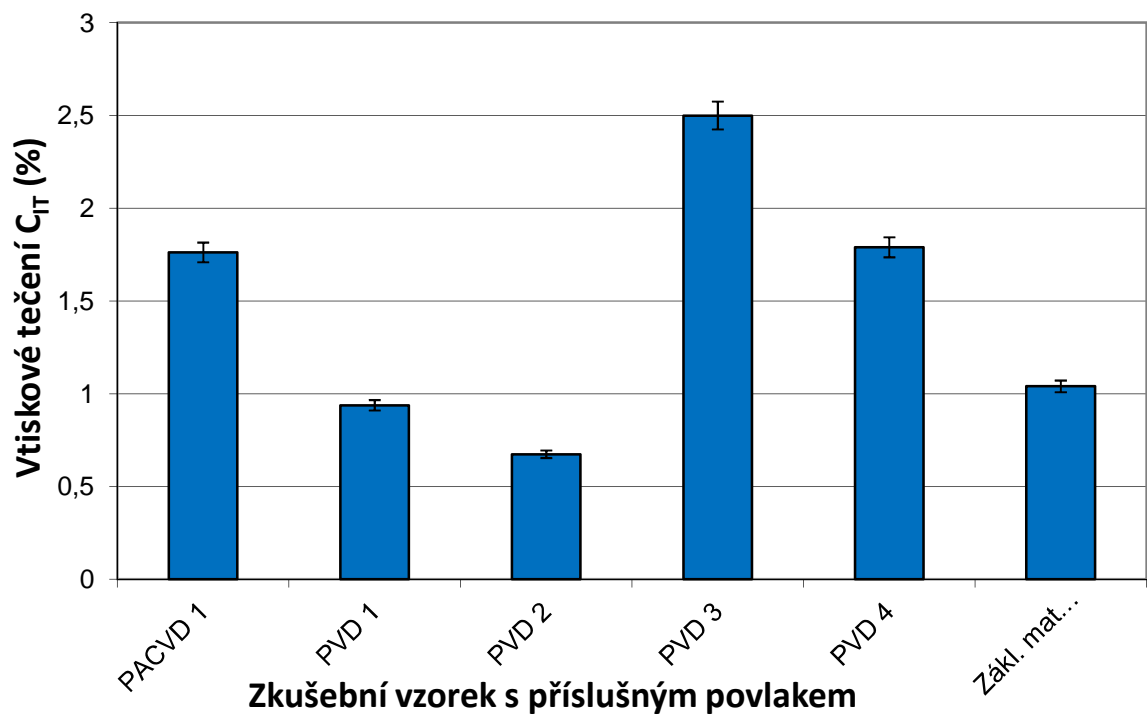
Obr. 25. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 10 mN

Při zkoušce mikrotvrdomosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti bylo dosaženo u povlaku PVD 1, zatímco nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 25)



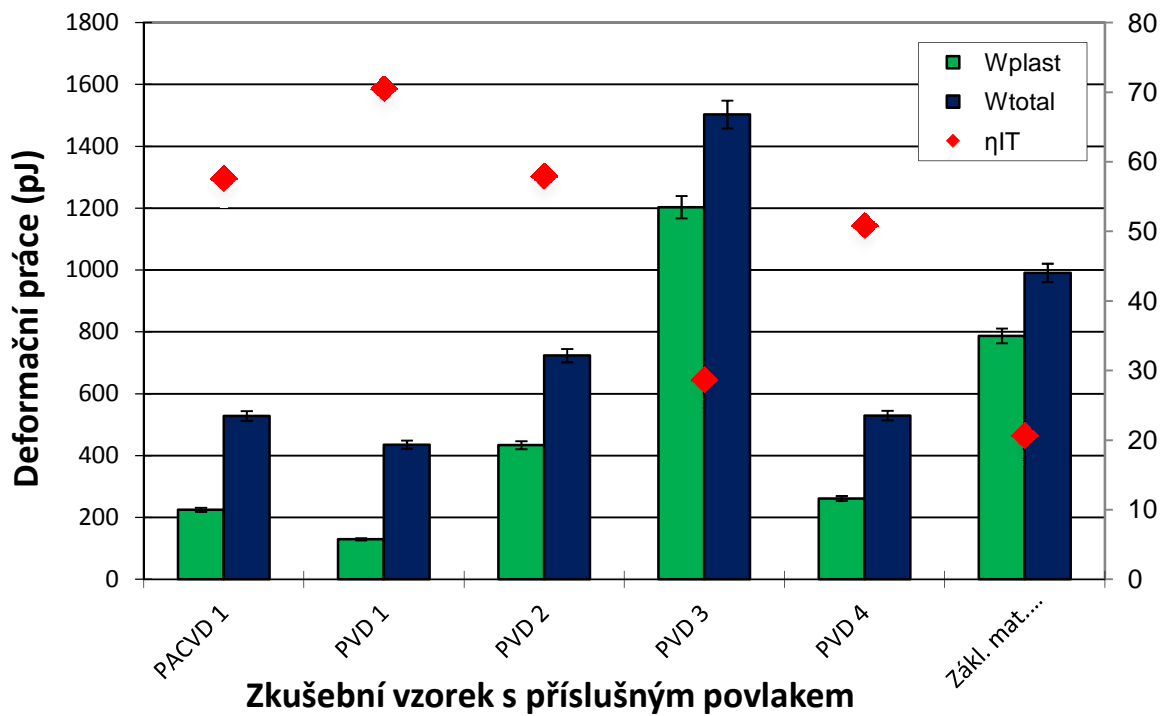
Obr. 26. Vtiskový modul pružnosti E_{IT} při zatížení 10 mN

Při zkoušce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty vtiskového modulu pružnosti bylo dosaženo u povlaku PVD 1, zatímco nejmenší hodnota vtiskového modulu pružnosti byla naměřena u povlaku PVD 3. (viz Obr. 26)



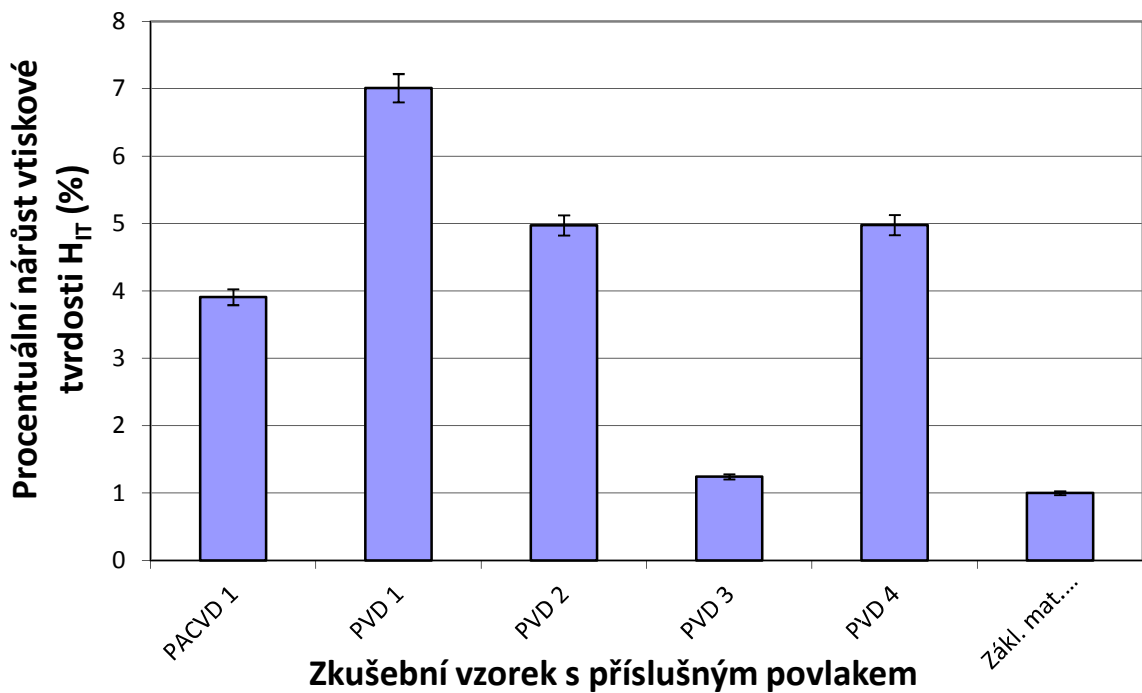
Obr. 27. Vtiskové tečení C_T při zatížení 10 mN

Z výsledků instrumentované zkoušky vyplývá, že nejvyšší hodnoty vtiskového tečení bylo dosaženo u povlaku PVD 3, naopak nejmenší hodnota vtiskového tečení byla naměřena u povlaku PVD 2. (viz Obr. 27)



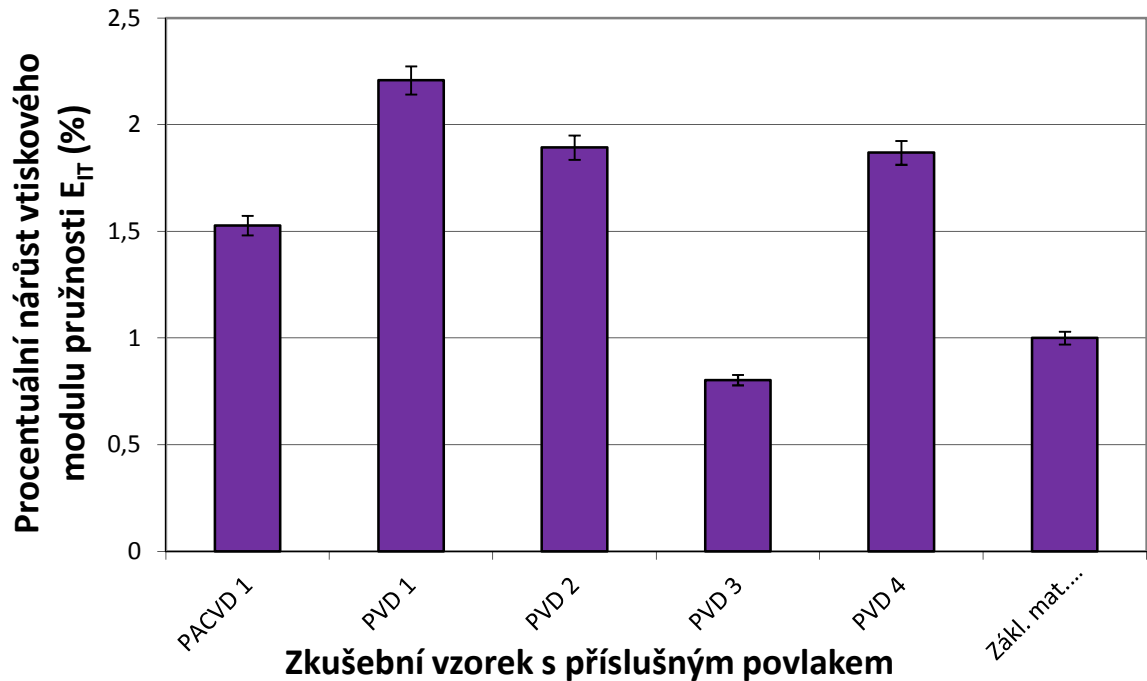
Obr. 28. Deformační práce při zatížení 10 mN

Nejvyšší hodnota deformační práce u zkoušky mikrotvrdomosti byl naměřena u povlaku PVD 3, zatímco nejnižší hodnota deformační práce byla naměřena u povlaku PVD 1. (viz Obr. 28)



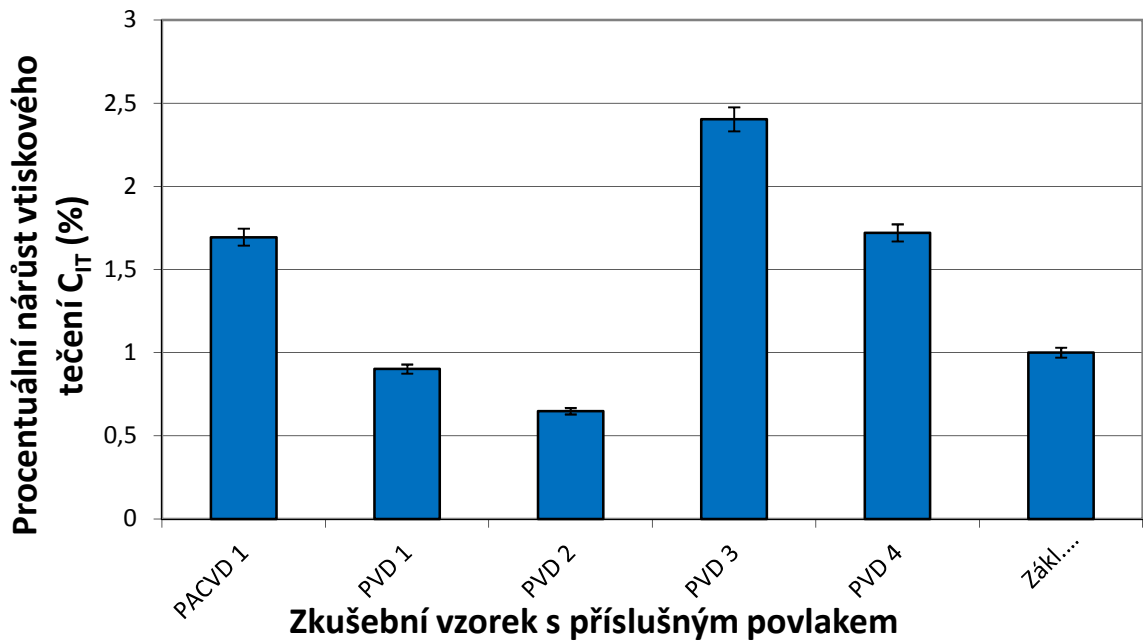
Obr. 29. Procentuální nárůst tvrdosti HIT při zatížení 10 mN

Z výsledků je patrné, že největší procentuální nárůst vtiskové tvrdosti byl naměřen u povlaku PVD 1, naopak nejmenší procentuální nárůst vtiskové tvrdosti byl naměřen u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 29)



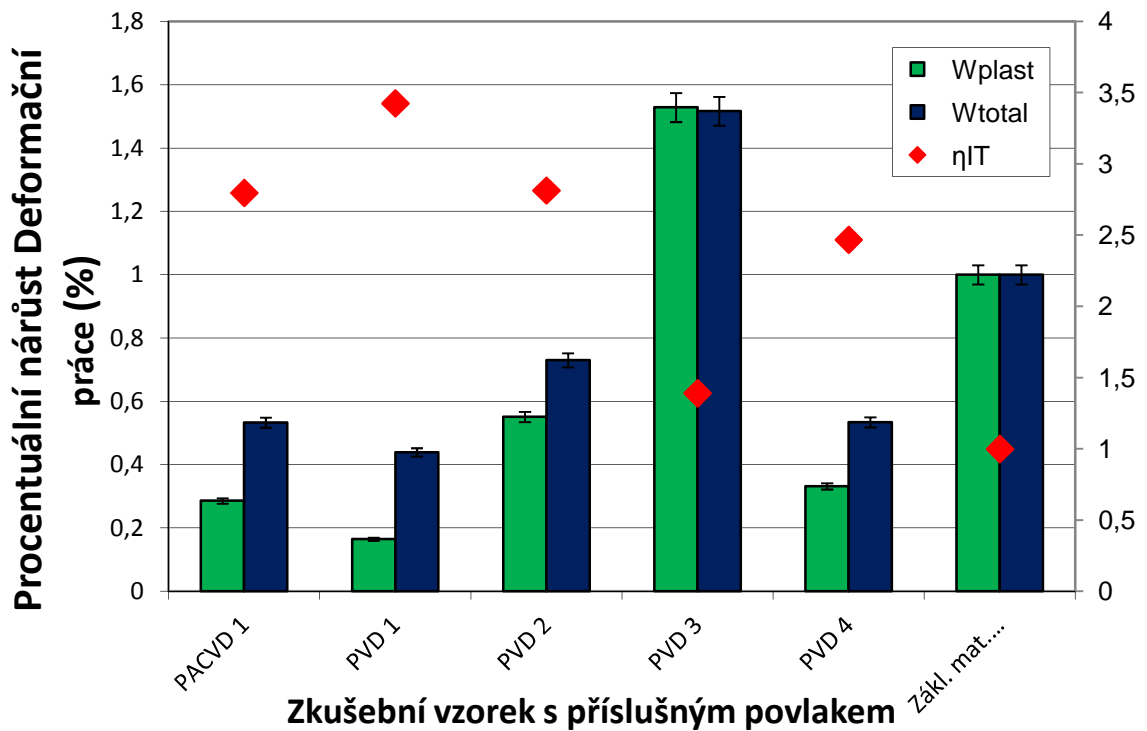
Obr. 30. Procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti E_{IT} při zatížení 10 mN

Nejmenší procentuální nárůst vtiskového modulu byl u zkoušky mikrotvrdosti zjištěn u povlaku PVD 3, zatímco největší procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti byl zjištěn u povlaku PVD 1. (viz Obr. 30)



Obr. 31. Procentuální nárůst vtiskového tečení C_T při zatížení 10 mN

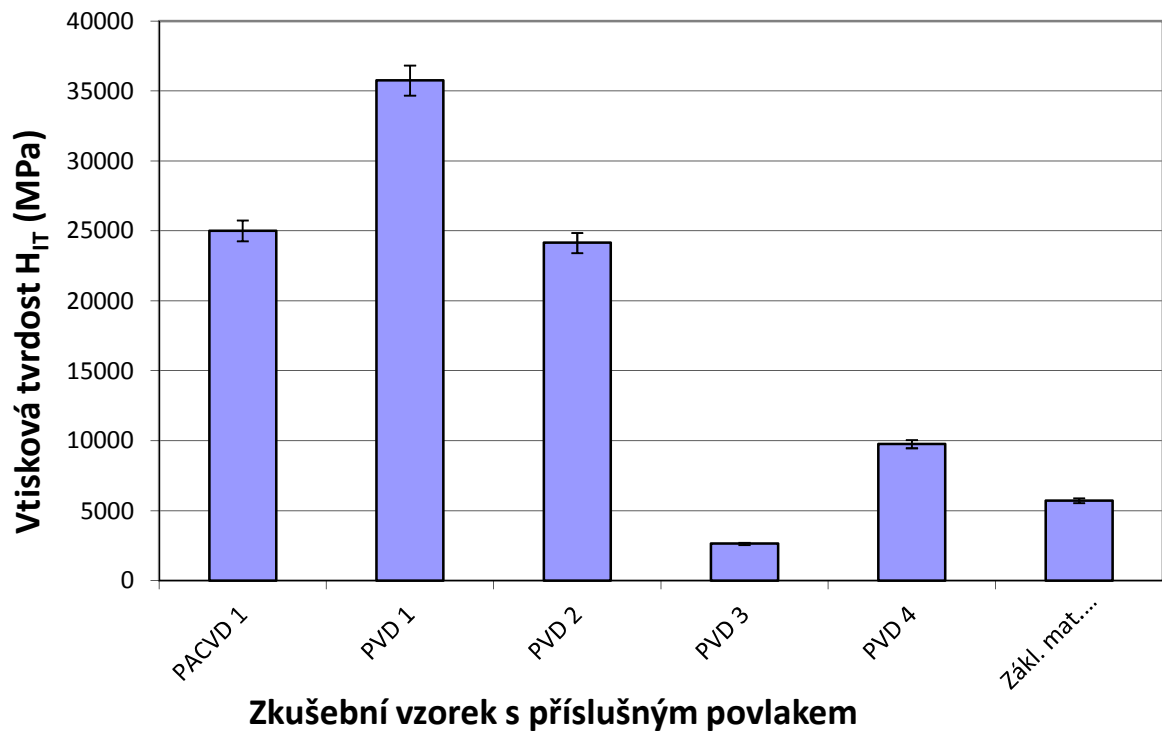
Z výsledků měření mikrotvrdomosti bylo zjištěno, že nejvyšší procentuální nárůst vtiskového tečení byl dosažen u povlaku PVD 3, zatímco nejmenší procentuální nárůst vtiskového tečení byl naměřen u povlaku PVD 2. (viz Obr. 31)



Obr. 32. Procentuální nárůst deformační práce při zatížení 10 mN

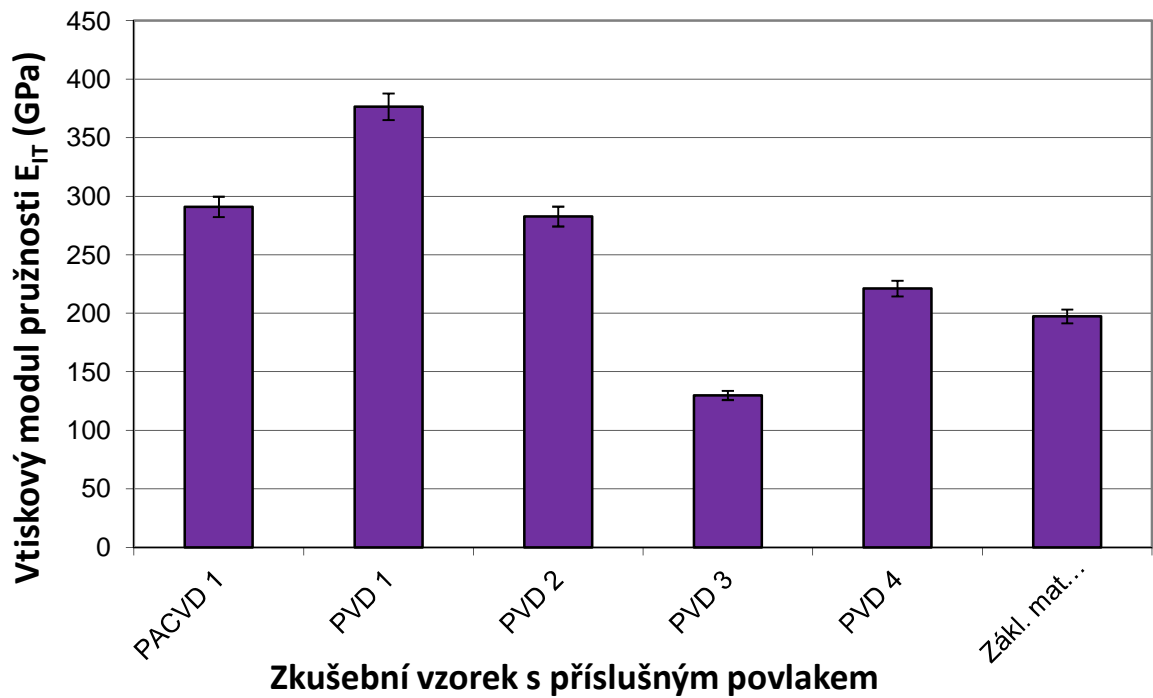
Z výsledků je patrné, že největší procentuální nárůst deformační práce byl naměřen u povlaku PVD 3, zatímco nejmenší procentuální nárůst deformační práce byl naměřen u povlaku PVD 1. (viz Obr. 32)

6.2 Naměřené hodnoty při aplikovaném zatížení 50 mN



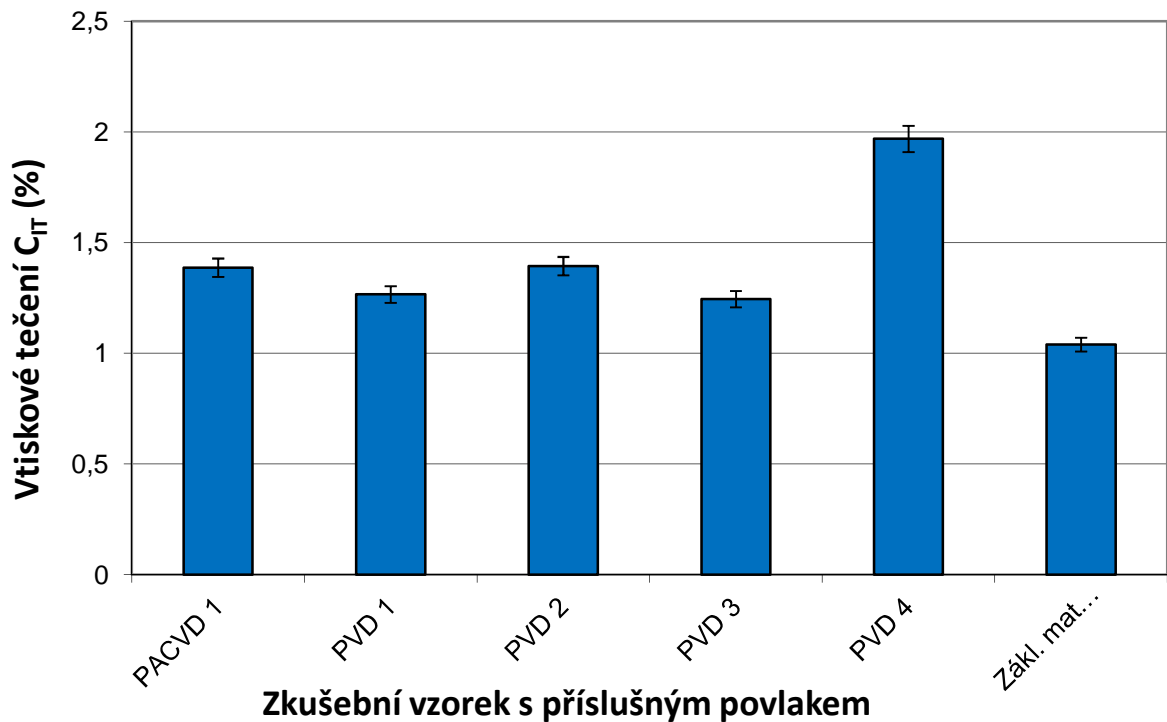
Obr. 33. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 50 mN

Nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla u zkoušky mikrotvrdosti zjištěna u povlaku PVD 3, zatímco největší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna u povlaku PVD 1. (viz Obr. 33)



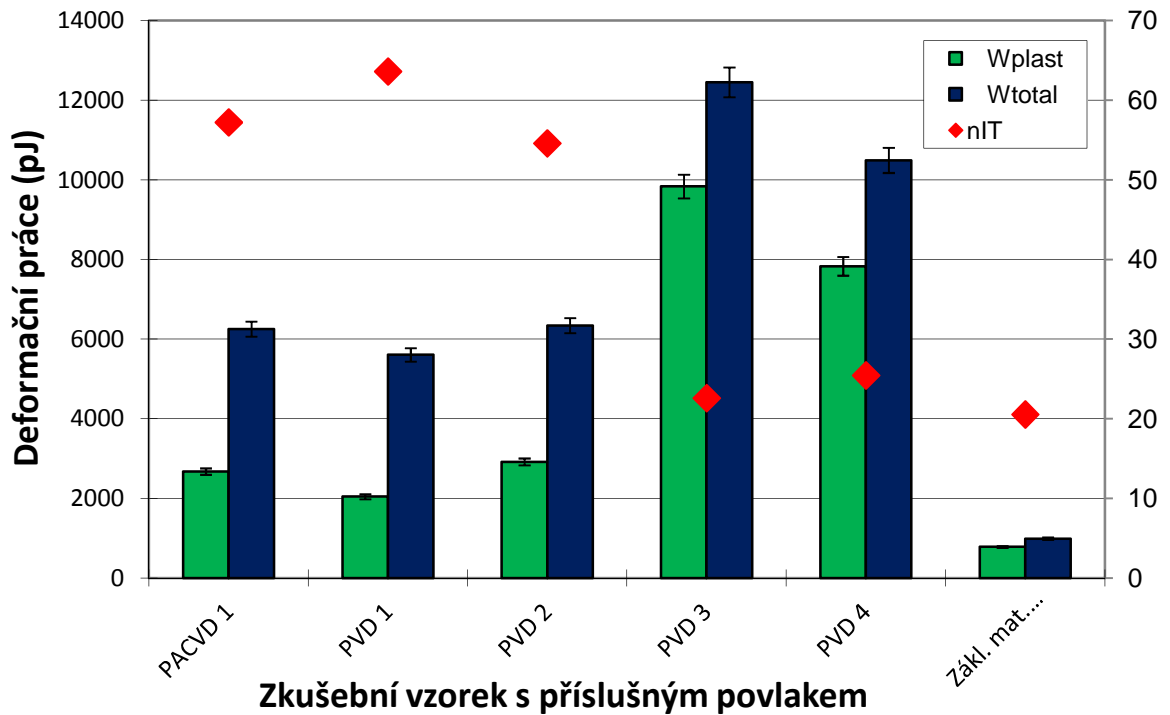
Obr. 34. Vtiskový modul pružnosti E_{IT} při zatížení 50 mN

Z měření mikrotvrdomosti vyplývá, že největší vtiskový modul pružnosti byl dosažen u povlaku PVD 1, naopak nejmenší vtiskový modul pružnosti byl dosažen u povlaku PVD 3. (viz Obr. 34)



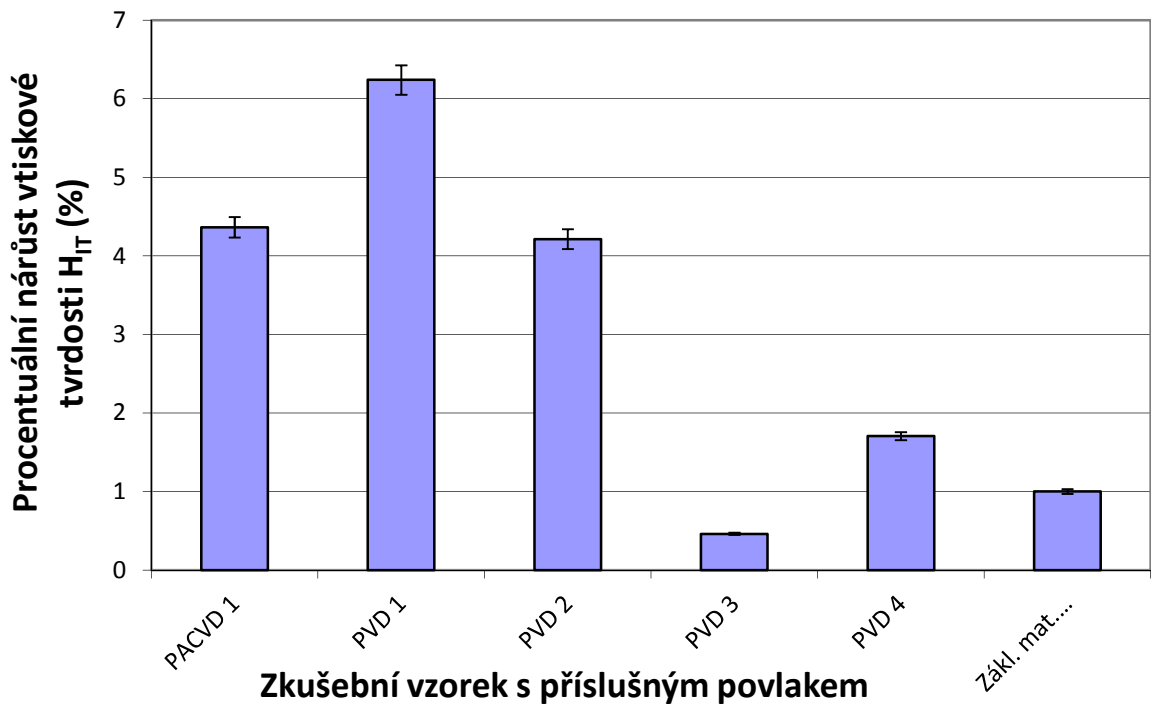
Obr. 35. Vtiskové tečení C_{IT} při zatížení 50 mN

Z naměřených hodnot je patrné, že nejvyšší vtiskové tečení bylo naměřeno u povlaku PVD 4, zatímco nejmenší vtiskové tečení bylo dosaženo u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 35)



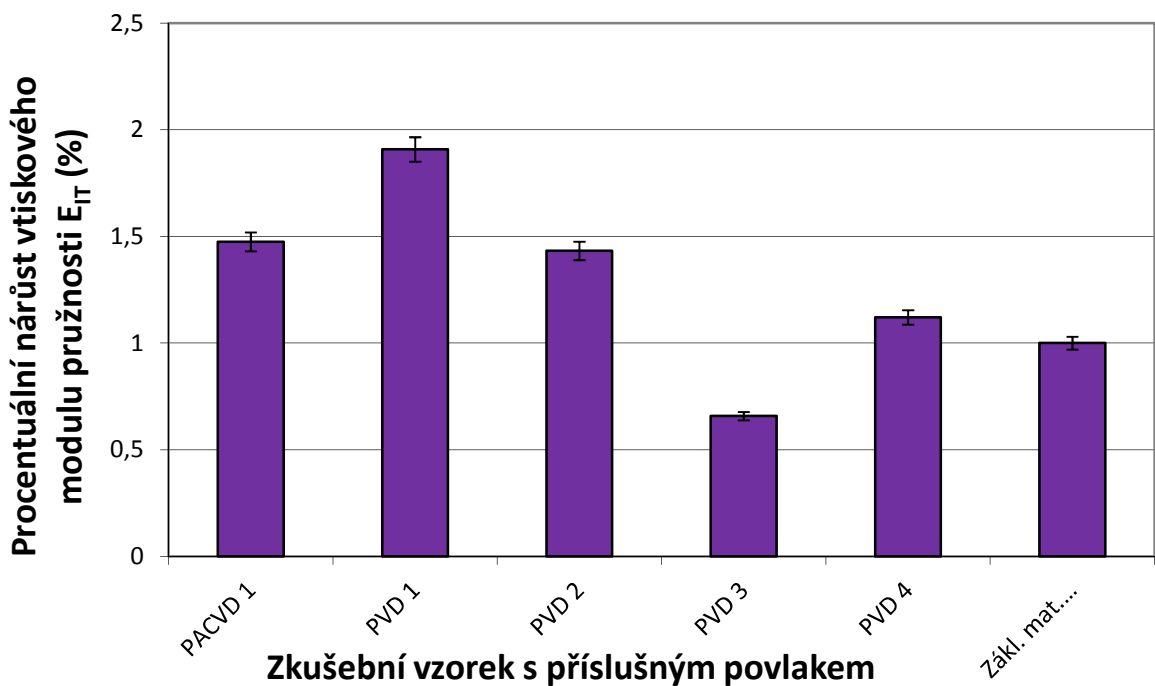
Obr. 36. Deformační práce při zatížení 50 mN

Nejvyšší hodnota deformační práce u zkoušky mikrotvrlosti byl naměřena u povlaku PVD 3, zatímco nejnižší hodnota deformační práce byla naměřena u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 36)



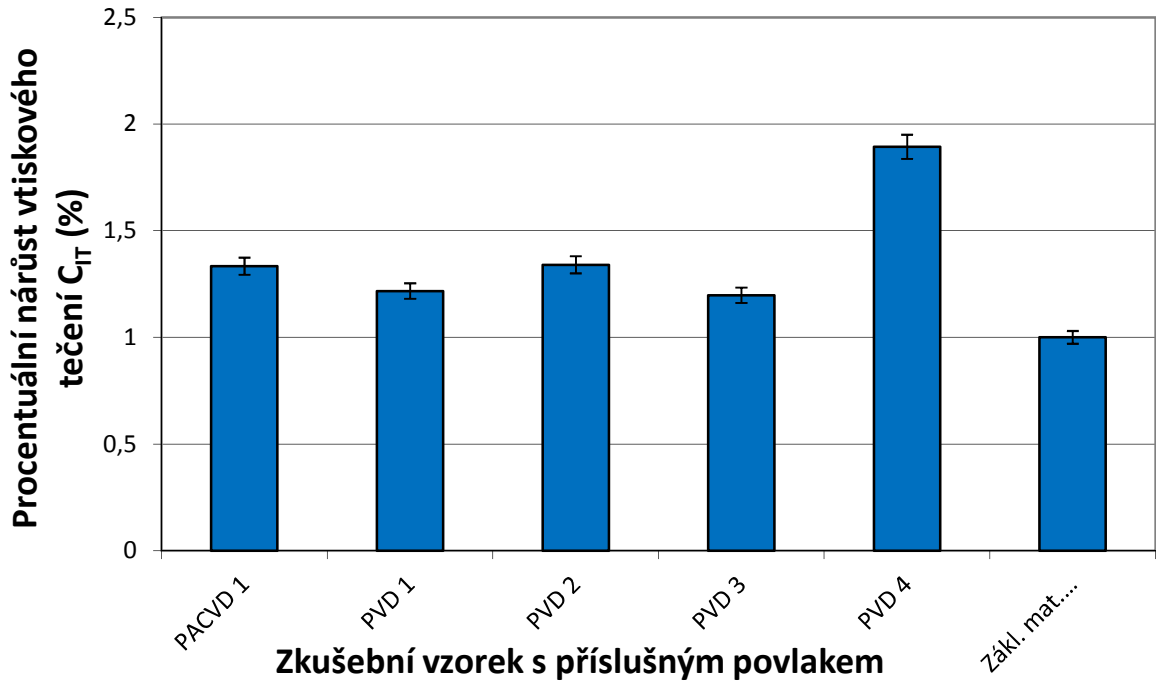
Obr. 37. Procentuální nárůst vtiskové tvrdosti H_{IT} při zatížení 50 mN

Z výsledků instrumentované zkoušky vyplývá, že nejvyšší procentuální nárůst vtiskové tvrdosti byl dosažen u povlaku PVD 1, naopak nejmenší procentuální nárůst vtiskové tvrdosti byl naměřen u povlaku PVD 3. (viz Obr. 37)



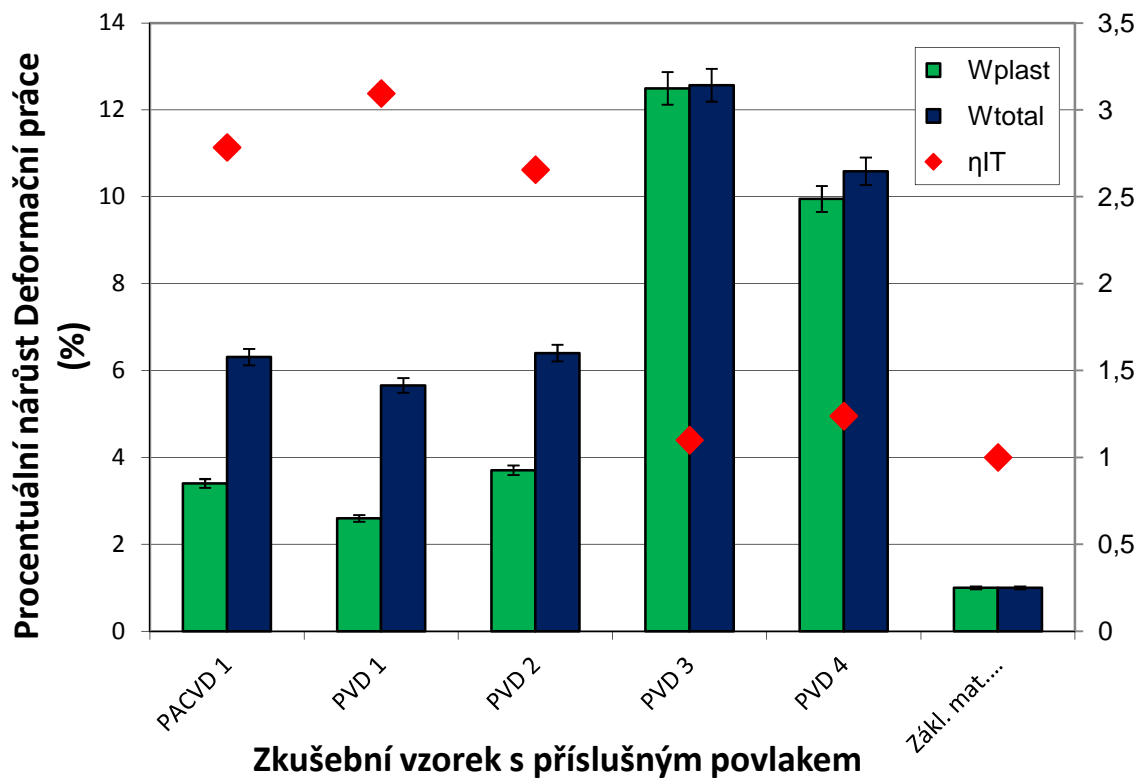
Obr. 38. Procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti E_{IT} při zatížení 50 mN

Při zkoušce mikrotvrdomosti bylo zjištěno, že nejvyšší procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti byl dosažen u povlaku PVD 1, zatímco nejmenší procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti byl naměřen u povlaku PVD 3. (viz Obr. 38)



Obr. 39. Procentuální nárůst vtiskového tečení C_{IT} při zatížení 50 mN

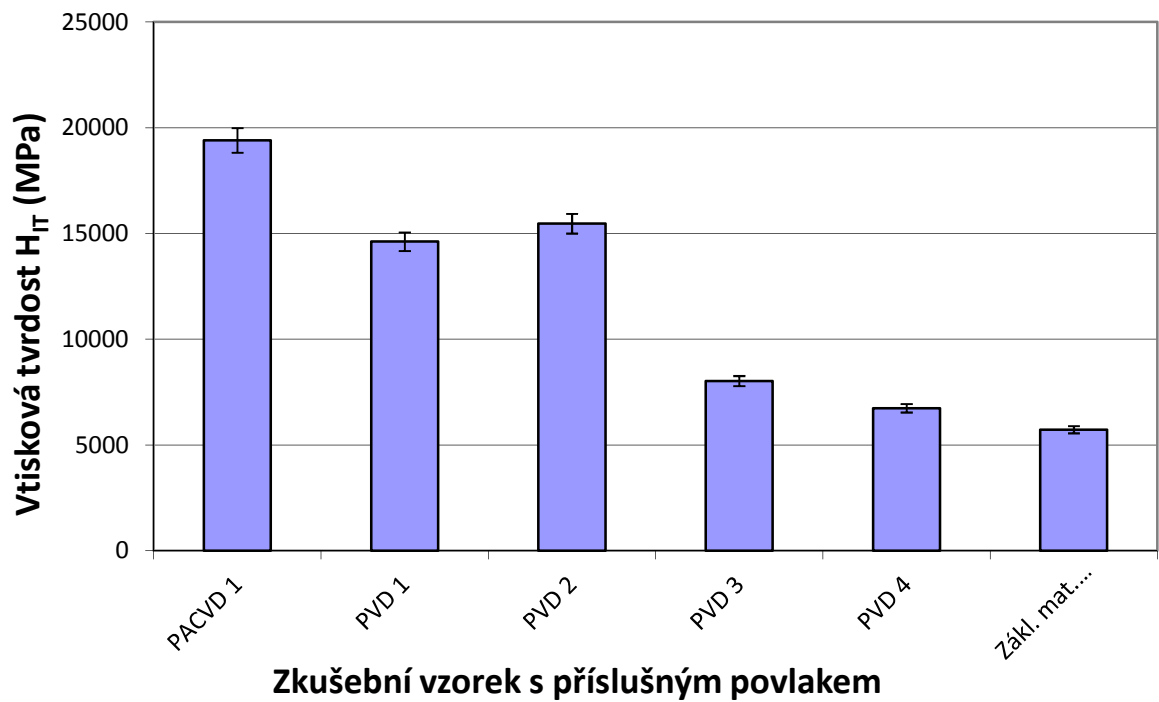
Z naměřených hodnot je patrné, že největší procentuální nárůst vtiskového tečení byl naměřen u povlaku PVD 4, zatímco nejmenší procentuální nárůst vtiskového tečení byl dosažen u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 39)



Obr. 40. Procentuální nárůst deformační práce při zatížení 50 mN

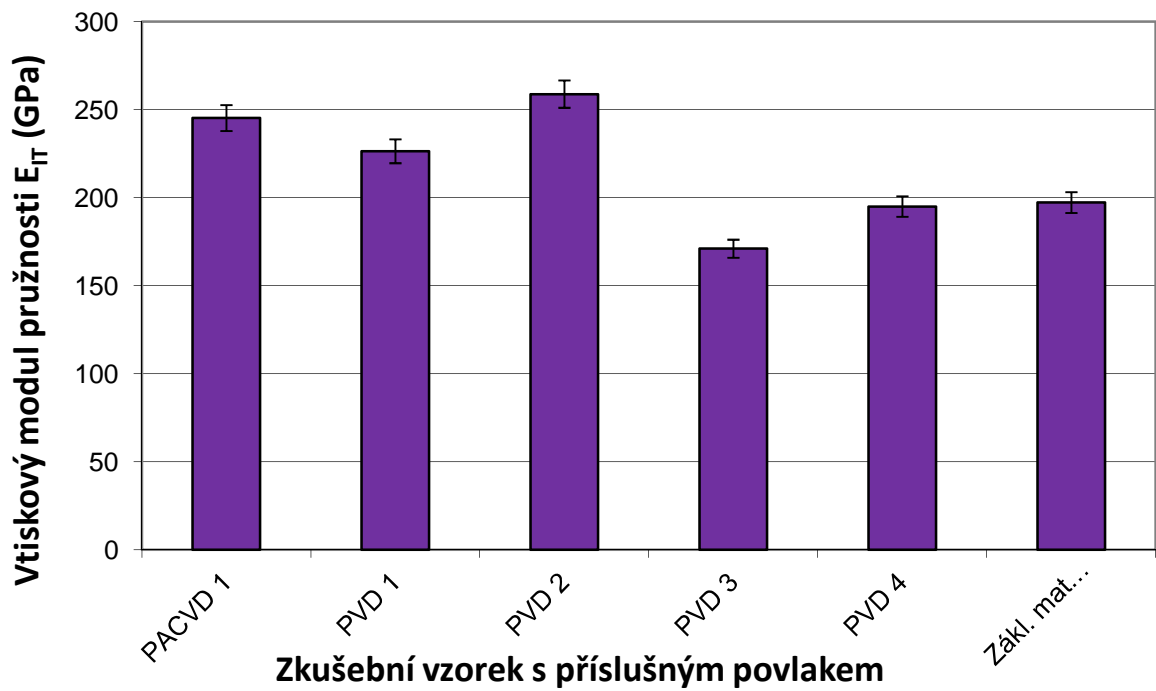
Z výsledků je patrné, že největší procentuální nárůst deformační práce byl naměřen u povlaku PVD 3, naopak nejmenší procentuální nárůst deformační práce byl naměřen u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 40)

6.3 Naměřené hodnoty při aplikovaném zatížení 250 mN



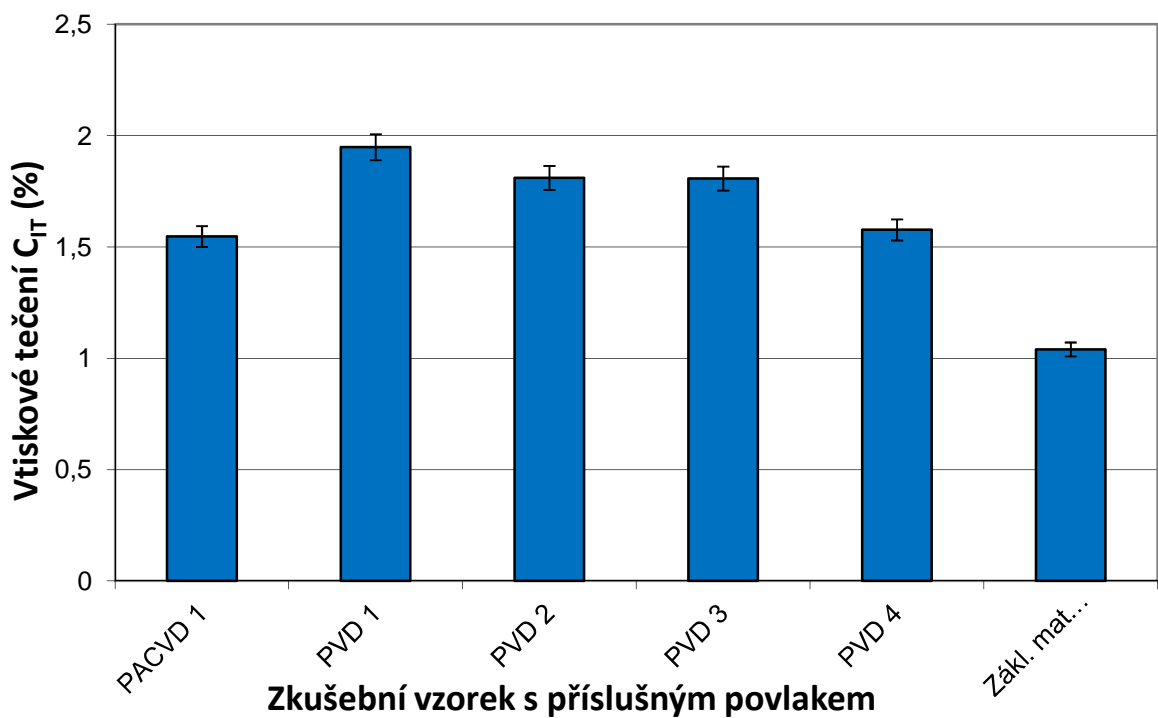
Obr. 41. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 250 mN

Nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti u zkoušky mikrotvrdomosti byla naměřena u povlaku PACVD 1, zatímco nejnižší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 41)



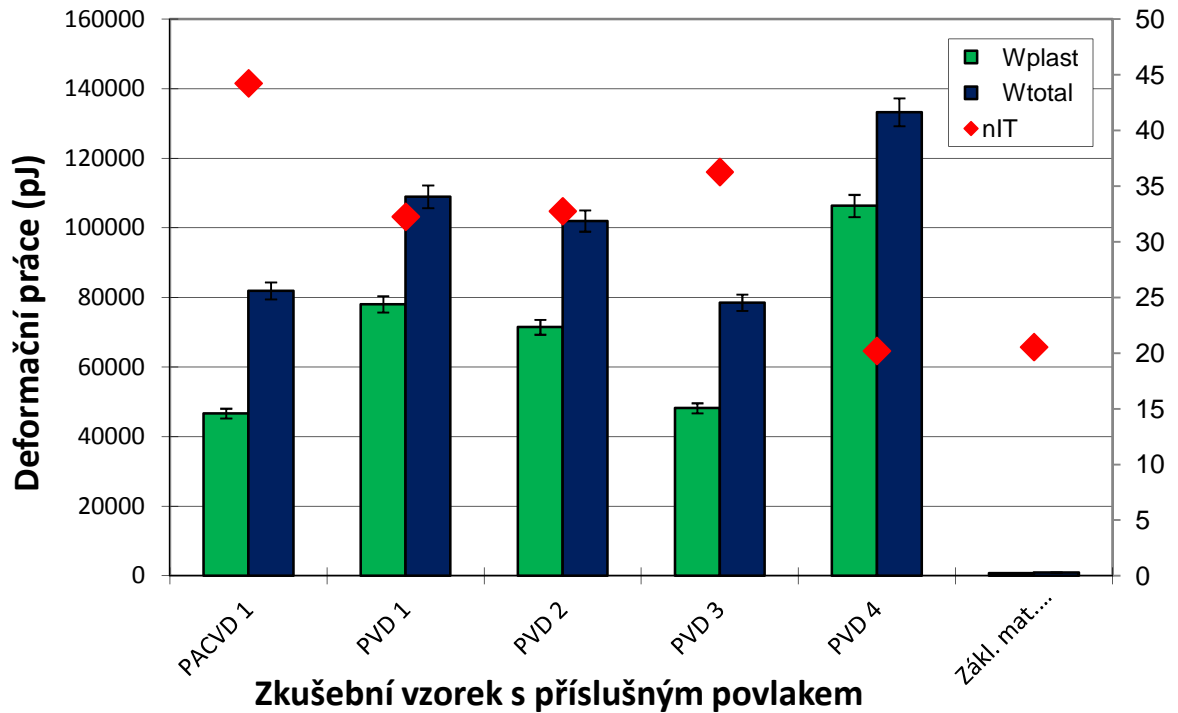
Obr. 42. Vtiskový modul pružnosti E_{IT} při zatížení 250 mN

Z výsledků instrumentované zkoušky vyplývá, že největší vtiskový modul pružnosti byl dosažen u povlaku PVD 2, naopak nejmenší vtiskový modul pružnosti byl naměřen u povlaku PVD 3. (viz Obr. 42)



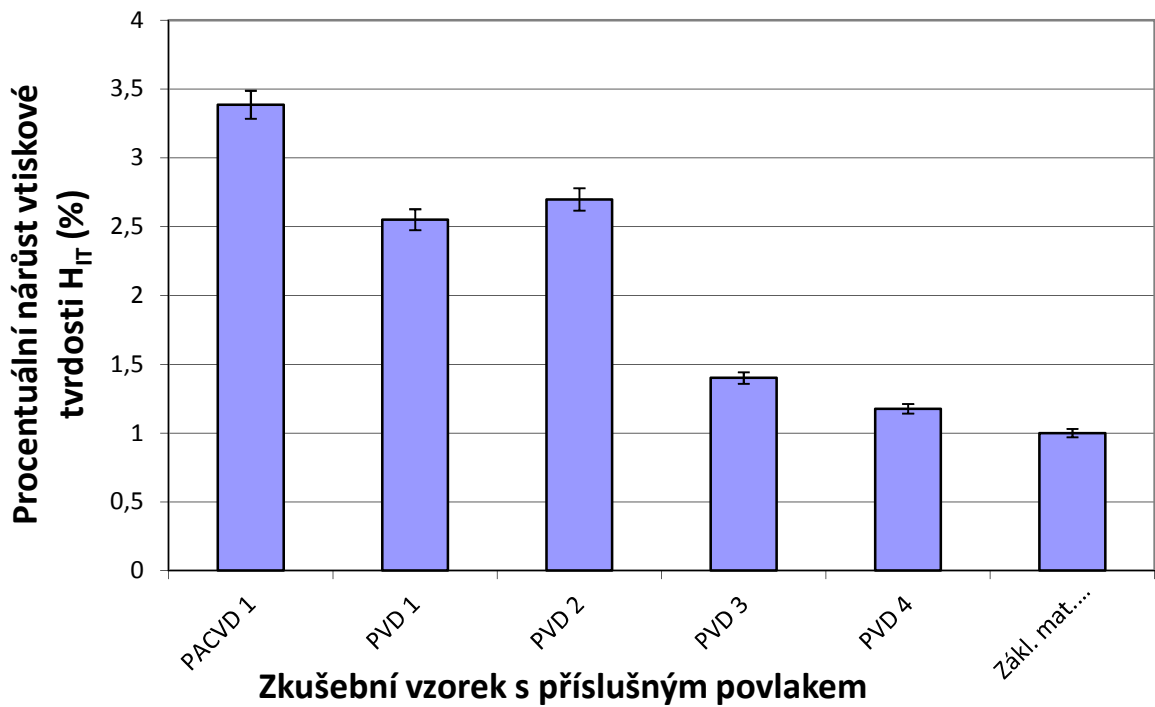
Obr. 43. Vtiskové tečení C_{IT} při zatížení 250 mN

Z měření mikrotvrdomosti vyplývá, že největší vtiskové tečení bylo dosaženo u povlaku PVD 1, naopak nejmenší vtiskové tečení bylo dosaženo u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 43)



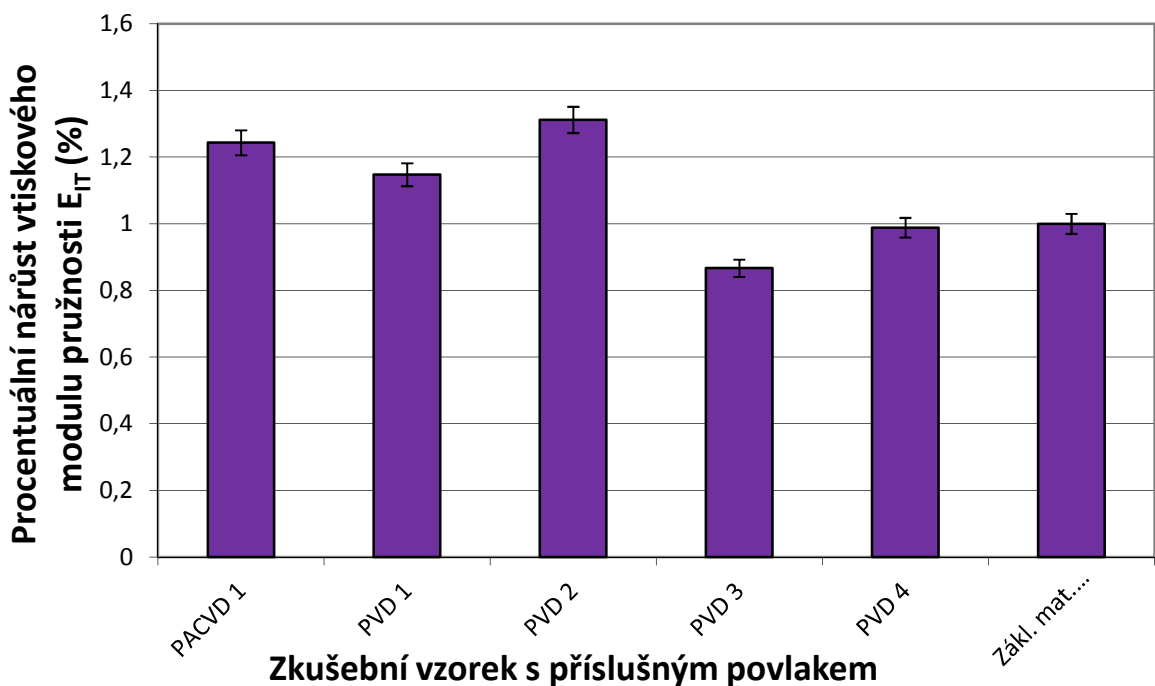
Obr. 44. Deformační práce při zatížení 250 mN

Z výsledků je patrné, že největší deformační práce byla naměřena u povlaku PVD 4, naopak nejmenší deformační práce byla naměřena u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 44)



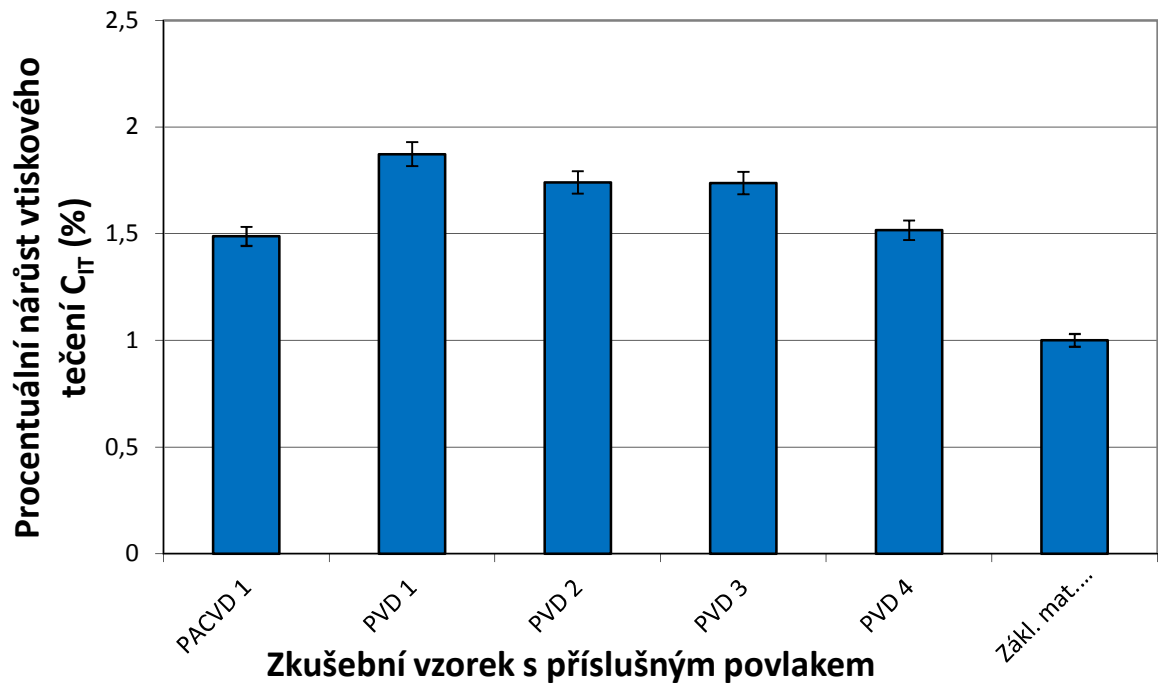
Obr. 45. Procentuální nárůst vtiskové tvrdosti H_{IT} při zatížení 250 mN

Při zkoušce bylo zjištěno, že nejvyšší procentuální nárůst vtiskové tvrdosti byl dosažen u povlaku PACVD 1, zatímco nejmenší procentuální nárůst vtiskové tvrdosti byl naměřen u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 45)



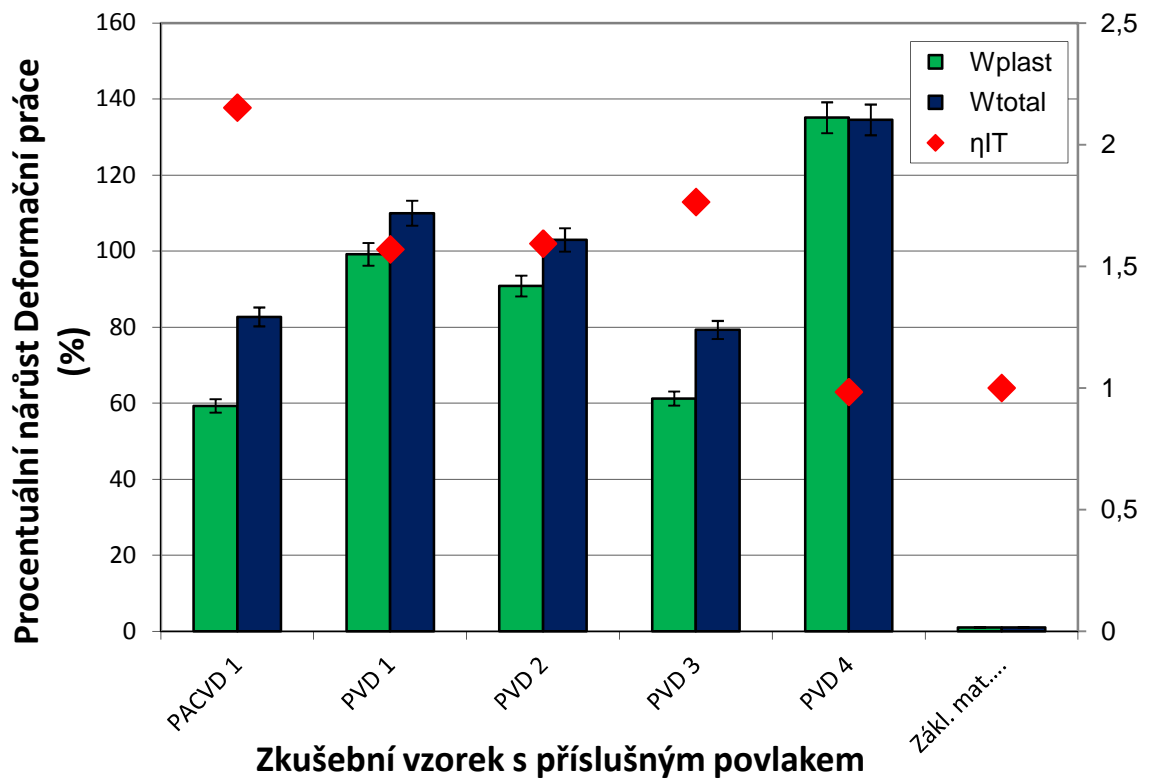
Obr. 46. Procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti E_{IT} při zatížení 250 mN

Nejmenší procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti byl u zkoušky mikrotvrdomosti zjištěn u povlaku PVD 3, zatímco největší procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti byl zjištěn u povlaku PVD 2. (viz Obr. 46)



Obr. 47. Procentuální nárůst vtiskového tečení C_{IT} při zatížení 250 mN

Z naměřených hodnot při zkoušce mikrotvrdomosti vyplynulo, že nejmenší procentuální nárůst vtiskového tečení byl naměřen u základního materiálu oceli 19 552, naopak největší procentuální nárůst vtiskového tečení byl naměřen u povlaku PVD 1. (viz Obr. 47)

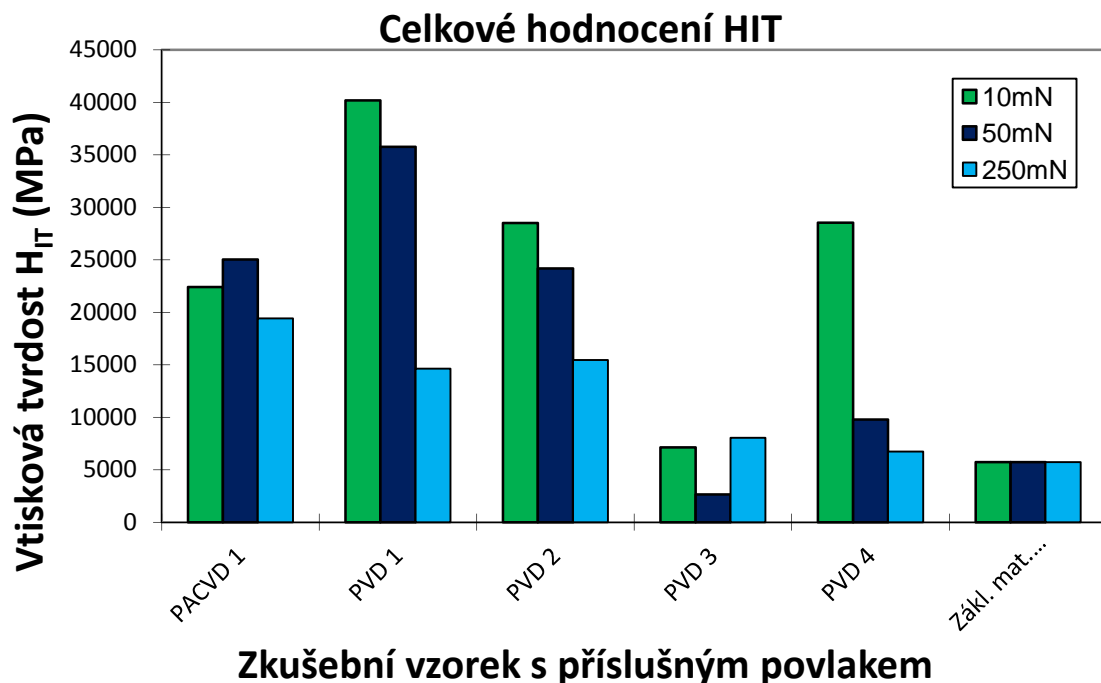


Obr. 48. Procentuální nárůst deformační práce při zatížení 250 mN

Z výsledků instrumentované zkoušky vyplývá, že největší procentuální nárůst deformační práce byl dosažen u povlaku PVD 4, naopak nejmenší vtiskový modul pružnosti byl naměřen u základního materiálu oceli 19 552. (viz Obr. 48)

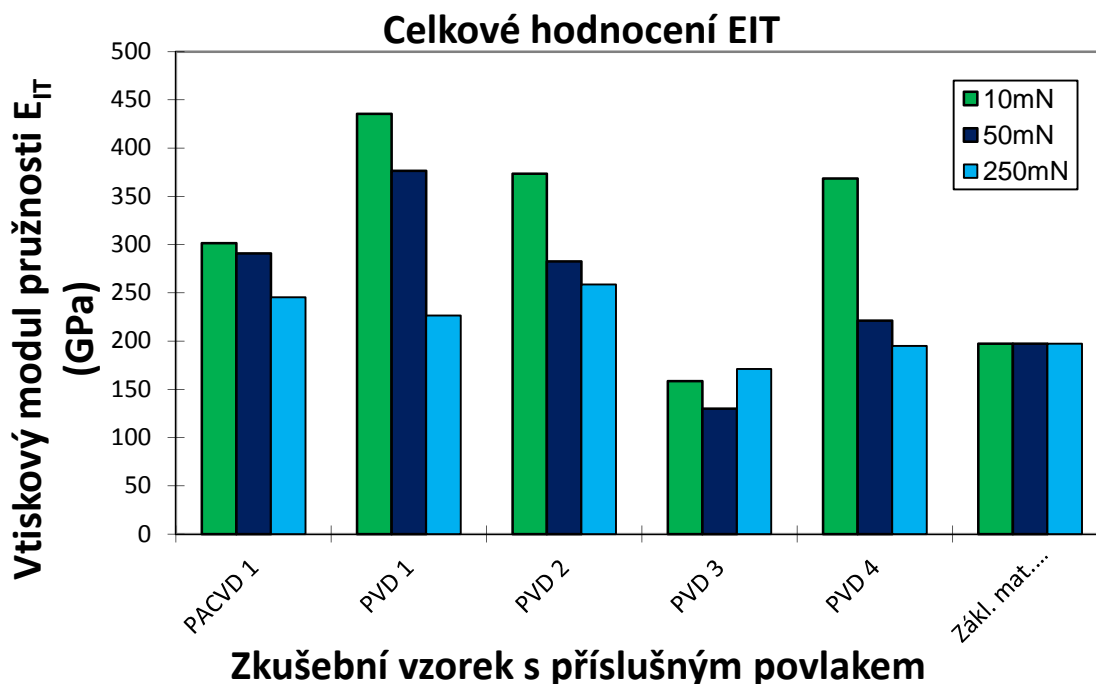
7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Praktická část diplomové práce se zabývá měřením mechanickými vlastnosti povlaků, nanášených na základní materiál (ocel). Pro praktickou část byla vybrána ocel 19 552, na kterou bylo nanášeno 5 různých typů povlaků technologií PVD a PACVD. Ocel 19 552 se běžně používá na výrobu tvarových dutin vstřikovacích forem. Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno na nanotvrdoměru Nanoindentation Tester (NHT2) – Opx/Cpx, CSM Instruments (Switzerland) dle normy CSN EN ISO 14577-1. Pro měření mikrotvrdomosti byly aplikovány tři zatížení a to 10 mN, 50 mN a 250 mN. U příslušného povlaku bylo vždy provedeno 15 měření. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.



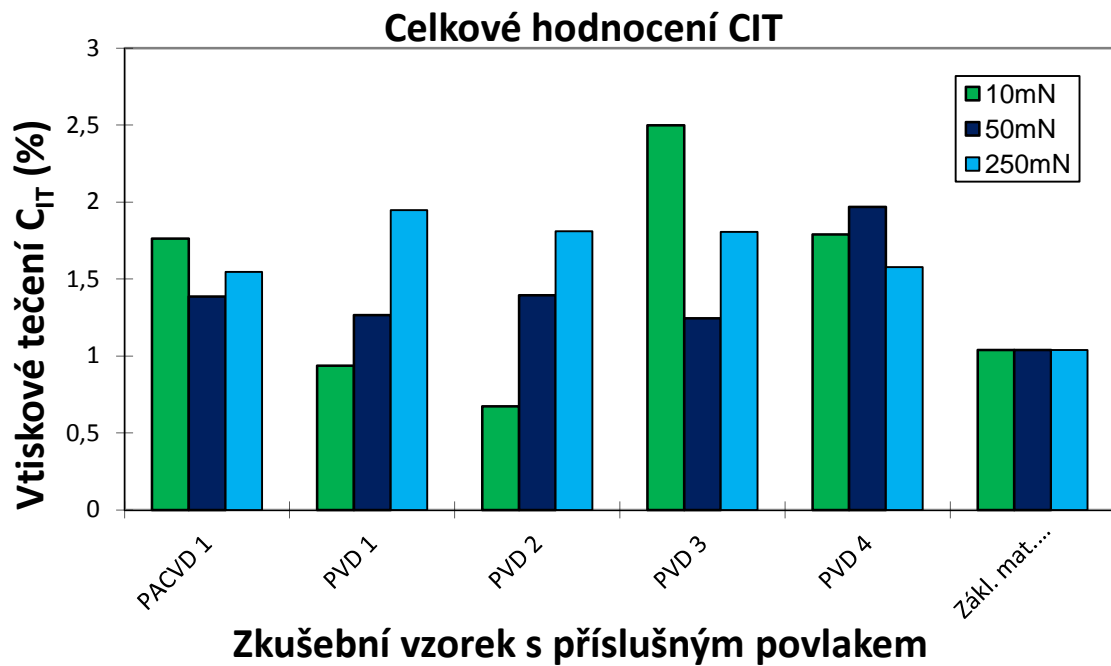
Obr. 49. Vtisková tvrdost H_{IT} při všech zatížení

Při zkoušce mikrotvrdomosti bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot vtiskové tvrdosti bylo dosaženo při aplikaci nejmenšího zatížení (10 mN). Naopak nejmenší hodnoty vtiskové tvrdosti byly naměřeny při aplikaci nejvyššího zatížení (250 mN). Nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti byly zjištěny u povlaku PVD 1 při zatížení 10 mN a 50 mN. Naopak nejmenší hodnoty vtiskové tvrdosti byly naměřeny pro aplikovaná zatížení 10 mN a 250 mN u nepovlakovaného povrchu oceli 19 552 (1.2343). Nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna pro zatížení 50 mN u povlaku PVD 3 a byla pravděpodobně zapříčiněna místní vadou při nanášení povlaku. (viz Obr. 49)



Obr. 50. Vtiskový modul pružnosti E_{IT} při všech zatížení

Při instrumentované zkoušce DSI bylo zjištěno, že největší hodnoty vtiskového modulu pružnosti byly naměřeny při použití nejmenšího zatížení (10 mN), zatímco nejnižší hodnoty vtiskového modulu pružnosti byly naměřeny při použití nejvyššího zatížení (250 mN). Nejvyšší naměřené hodnoty vtiskového modulu pružnosti byly dosaženy u povlaku PVD1 při zatížení 10 mN a 50 mN. Zatímco nejnižší hodnoty vtiskového modulu pružnosti byly naměřeny při použitím zatížení 10 mN, 50 mN a 250 mN u povlaku PVD 3. Nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna pro zatížení 50mN u povlaku PVD3 a byla pravděpodobně zapříčiněna místní vadou při nanesení povlaku. (viz Obr. 50)



Obr. 51. Vtiskové tečení C_{IT} při všech zatížení

Z naměřených hodnot při zkoušce mikrotvrdomosti vyplynulo, že nejvyšší hodnoty vtiskového tečení byly dosaženy u PACVD 1 a PVD 3 u zatížení 10 mN, u PVD 1 a PVD 2 při zatížení 250 mN a u PVD 4 byla největší hodnota dosažena při zatížení 50 mN. Naopak nejmenší hodnoty vtiskového tečení byly naměřeny pro aplikovaná zatížení 50 mN a 250 mN u nepovlakovaného povrchu oceli 19 552 (1.2343). Nejmenší hodnota vtiskového tečení byla zjištěna pro zatížení 10 mN u povlaku PVD2. (viz Obr. 51)

ZÁVĚR

Diplomové práce se zabývá měřením mechanickými vlastnosti povlaků, nanesených na základním materiálu (nástrojová ocel). Pro praktickou část byla vybrána ocel 19 552 (1.2343), na kterou bylo naneseo 5 různých typů povlaků technologií PVD a PACVD s označením PACVD1, PVD1, PVD2, PVD3, PVD4 a základní materiál. Ocel 19 552 (1.2343) se běžně používá na výrobu tvarových částí vstřikovacích forem. Měření mikrotvrdosti bylo provedeno na nanotvrdoměru Nanoindentation Tester (NHT2) – Opx/Cpx, CSM Instruments (Switzerland) dle normy CSN EN ISO 14577-1. Pro měření mikrotvrdosti byly aplikovány tři zatížení a to 10 mN, 50 mN a 250 mN. U příslušného povlaku bylo vždy provedeno 15 měření. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z naměřených výsledků mikrotvrdosti vyplynulo, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti byly naměřeny u povlaku PVD1, naopak nejmenší hodnoty vtiskové tvrdosti byly zjištěny u testovaného základního materiálu. S rostoucím aplikovaným zatížením docházelo k poklesu hodnot vtiskové tvrdosti.

Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje tuhost testované povrchové vrstvy, případně povlaku byl největší u povlaku PVD1, naopak neméně hodnoty tuhosti byly naměřeny u povlaku PVD3. S rostoucím zatížením docházelo podobně jako u vtiskové tvrdosti k poklesu hodnot tuhosti.

Hodnoty vtiskové tečení u oceli za normálních teplot jsou velmi malé, a proto se v praxi k nim nepřihlíží.

Z naměřených výsledků je patrné, že povlaky vykazovaly hodnoty vtiskové tvrdosti a tuhosti. Z hlediska mechanických vlastností jsou nanesené typy povlaků výrazně lepší než běžně používaná nástrojová ocel. Z toho důvodu budou mnohem lépe odolávat poškození a mohou výrazným způsobem zvýšit životnost tvarových částí forem. Pro toto tvrzení je ovšem nutné provést celou řadu dalších testů zahrnující testování tokových vlastností a tribologických testů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1.* 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 266 s. ISBN 80-7183-262-6.
- [2] HLUCHÝ, Miroslav a Josef BENEŠ. *Strojírenská technologie: pro SPŠ nestrojnické.* Vyd. 2., opr. Praha: SNTL, 1986, 248 s.
- [3] PÍŠEK, František, Jiří ŠKAREK a Aleš VETÍŠKA. *Nauka o materiálu.* 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959, 658 s.
- [4] Zkoušky tvrdosti. *ATEAM. Materiálový výzkum.* [online]. 2006 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
- [5] DOLEŽAL, P., PACAL, B. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálu.* Brno : VUT 2006. 41 s.
- [6] DUŠEK, J., Dizertační práce - *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost – čisté kovy měřené metodou DSI*, Brno: Masarykova univerzita v Brně, 171 s.
- [7] KULHÁNEK, Jan. *Formy pro tváření plastických hmot.* 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966, 220 s.
- [8] Konstrukce vstřikovacích forem, aplikace plastových dílů v automobilovém průmyslu. *TECHNOMAT* [online]. 2010 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z:http://www.techno-mat.cz/data/katedry/ksp/KSP_TDK_PR_04_CZE_Ausperger_Konstrukce_vstrikovacich_forem,_aplikace_plastovych_dilu_v_automobilovem_prumyslu.pdf
- [9] *Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů.* 1. vyd. Brno: Uniplast, 1999, 214 s.
- [10] ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery.* Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 230, 28 s. ISBN 978-80-7204-833-5.
- [11] Povlakování CZ. *VUHZ* [online]. 2011 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z:http://www.vuhz.cz/media/prospekty_12_14/prospekt_povlakovna_brozura_CZ.pdf
- [12] Povlakování nástrojů metodou PACVD. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z:<http://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-nastroju-metodou-pacvd.html>

- [13] PVD technologie. *Ionbond* [online]. 2015 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.ionbond.cz/cz/technologie/pvd/>
- [14] Povlaky. *ProTech Coatings eifeler* [online]. 2008 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.commercservice.sk/hlavna%20stranka%20eifeler.html>
- [15] Přehled sort pro řezné materiály Kennametal. *TrigonTools* [online]. 2012 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://www.trigon.sk/wp-content/uploads/sustruzenie_p_rehlad_sort.pdf
- [16] Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. *SMH* [online]. 2004 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/03/2004_09.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

H_{IT}	Vtisková tvrdost (MPa)
E_{IT}	Vtiskový modul pružnosti (GPa)
C_{IT}	Vtiskové tečení (%)
W_{total}	Celková deformační práce (pJ)
W_{pl}	Plastická deformační práce (pJ)
η_{IT}	Elastická část deformační práce (%)
HB	Tvrdost podle Brinella
HV	Tvrdost podle Vickerse
HR	Tvrdost podle Rockwella
H_{SH}	Tvrdost podle Shoreho
HK	Tvrdost dle Knoopu
H_{CH}	Tvrdost dle Berkoviče
H_M	Martensova tvrdost
DSI	Depth Sensing Indentation - Instrumentovaná vnikací zkouška
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní norma
ČSN	Česká státní norma
D	Průměr vnikající kuličky (mm)
d	Průměr otisknuté plochy (mm)
P	Velikost působícího zatížení (g)
F	Zatěžující působící síla (N)
t	Hloubka důlku (mm)
μ	Tření kuličky se zkoušeným povrchem
π	Ludolfovo číslo

k	Zkoušený materiál
θ	Velikost kuličky (mm)
G	Hmotnost tělesa (kg)
c	Konstanta vnikajícího nástroje
W	Velikost zatížení jehlanu (kg)
l	Výška trojúhelníku změřená na vtisku (mm)
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PA 6	Polyamid 6
PC	Polykarbonát
PMMA	Polymethylmethakrylát
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
PVD	Physical Vapour Deposition - Fyzikální depozice z plynné fáze
CVD	Chemical Vapour Deposition - Chemická depozice z plynné fáze
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition - CVD podporované plazmatem

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Martensův přístroj k vrypové zkoušce tvrdosti, d - diamant, Z - vzorek, G - posuvné závaží. [3].....</i>	13
<i>Obr. 2. Způsob vtlačování kuličky do zkoušeného materiálu. [3]</i>	15
<i>Obr. 3. Schéma zkoušky tvrdosti podle Ludwika. [3]</i>	16
<i>Obr. 4. Stanovení převýšení materiálu v okolí vtisku diamantového kužele. [3]</i>	16
<i>Obr. 5. Schéma zkoušky dle Vickerse a deformace vtisku. [4]</i>	17
<i>Obr. 6. Princip měření HRC tvrdosti. [4].....</i>	18
<i>Obr. 7. Schéma tří způsobů vtiskování kuličky do zkoušeného předmětu rázem. [3].....</i>	19
<i>Obr. 8. Princip měření tvrdosti kladívkem Poldiny huti. [3].....</i>	20
<i>Obr. 9. Schéma Shoreho skleroskopu. [3]</i>	21
<i>Obr. 10. Herbertovo kyvadlo při zkoušce tvrdosti ozubeného kola. [3].....</i>	22
<i>Obr. 11. Podstata zkoušky tvrdosti dle Vickerse.</i>	25
<i>Obr. 12. Podstata zkoušky tvrdosti dle Knoopa. [5]</i>	27
<i>Obr. 13. Schéma pravidelného tříbokého jehlanu - Berkovičův jehlan. [6].....</i>	29
<i>Obr. 14. Schématické znázornění indentační křivky, a) zátěžová křivka; b) odlehčovací křivka; c) tečna ke křivce b v F_{max}. [6]</i>	33
<i>Obr. 15. Schématické znázornění příčného řezu vtisku. a) indentor; b) povrch zbytkového plastického vtisku ve zkušebním tělese; c) povrch zkušebního tělesa při maximální hloubce vtisku a maximálním zkušebním zatížení. [6].....</i>	33
<i>Obr. 16. Schéma a popis vstřikovací formy. [8]</i>	34
<i>Obr. 17. Nejdůležitější díly rámu formy. [10]</i>	40
<i>Obr. 18. Vodící a spojovací součásti. [10]</i>	40
<i>Obr. 19. Způsoby upevnění rozpěrek ve formě. [10]</i>	41
<i>Obr. 20. Vedení vyhazovacích desek. [10]</i>	42
<i>Obr. 21. Různé uspořádání středících kroužků. [10]</i>	43
<i>Obr. 22. Povlakovací teploty. [11]</i>	49
<i>Obr. 23. Povlak PACVD splňuje lépe požadavky než původně využívaný CVD. [12]</i>	50
<i>Obr. 24. Nanotvrdoměr (NHT2) – Opx/Cpx.</i>	59
<i>Obr. 25. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 10 mN</i>	59
<i>Obr. 26. Vtiskový modul pružnosti E_{IT} při zatížení 10 mN</i>	60
<i>Obr. 27. Vtiskové tečení C_{IT} při zatížení 10 mN</i>	61
<i>Obr. 28. Deformační práce při zatížení 10 mN</i>	62

<i>Obr. 29. Procentuální nárůst vtiskové tvrdosti H_{IT} při zatížení 10 mN</i>	62
<i>Obr. 30. Procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti E_{IT} při zatížení 10 mN</i>	63
<i>Obr. 31. Procentuální nárůst vtiskového tečení C_{IT} při zatížení 10 mN</i>	64
<i>Obr. 32. Procentuální nárůst deformační práce při zatížení 10 mN</i>	64
<i>Obr. 33. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 50 mN</i>	65
<i>Obr. 34. Vtiskový modul pružnosti E_{IT} při zatížení 50 mN</i>	66
<i>Obr. 35. Vtiskové tečení C_{IT} při zatížení 50 mN</i>	66
<i>Obr. 36. Deformační práce při zatížení 50 mN</i>	67
<i>Obr. 37. Procentuální nárůst vtiskové tvrdosti H_{IT} při zatížení 50 mN</i>	68
<i>Obr. 38. Procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti E_{IT} při zatížení 50 mN</i>	68
<i>Obr. 39. Procentuální nárůst vtiskového tečení C_{IT} při zatížení 50 mN</i>	69
<i>Obr. 40. Procentuální nárůst deformační práce při zatížení 50 mN</i>	70
<i>Obr. 41. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 250 mN</i>	71
<i>Obr. 42. Vtiskový modul pružnosti E_{IT} při zatížení 250 mN</i>	72
<i>Obr. 43. Vtiskové tečení C_{IT} při zatížení 250 mN</i>	72
<i>Obr. 44. Deformační práce při zatížení 250 mN</i>	73
<i>Obr. 45. Procentuální nárůst vtiskové tvrdosti H_{IT} při zatížení 250 mN</i>	74
<i>Obr. 46. Procentuální nárůst vtiskového modulu pružnosti E_{IT} při zatížení 250 mN</i>	74
<i>Obr. 47. Procentuální nárůst vtiskového tečení C_{IT} při zatížení 250 mN</i>	75
<i>Obr. 48. Procentuální nárůst deformační práce při zatížení 250 mN</i>	76
<i>Obr. 49. Vtisková tvrdost H_{IT} při všech zatížení</i>	77
<i>Obr. 50. Vtiskový modul pružnosti E_{IT} při všech zatížení</i>	78
<i>Obr. 51. Vtiskové tečení C_{IT} při všech zatížení</i>	79

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Sestavení nerostů podle Mohseovy stupnice tvrdosti. [3]</i>	13
<i>Tab. 2. Oblasti zatížení pro kovové materiály [5]</i>	25
<i>Tab. 3. Zkušební zatížení [5]</i>	27
<i>Tab. 4. Zkušební zatížení [5]</i>	29
<i>Tab. 5. Některé důležité vztahy a relace u třístěnného jehlanu [6]</i>	30
<i>Tab. 6. Teploty formy a taveniny při zpracování plastů. [10]</i>	36
<i>Tab. 7. Přehled a použití ocelí. [10]</i>	44
<i>Tab. 8. Přehled a použití uhlíkové ušlechtilé oceli. [10]</i>	44
<i>Tab. 9. Přehled a použití cementační oceli. [10]</i>	45