

Mechanické vlastnosti lakovaných povrchů

Dominik Ničajevský

Bakalářská práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Dominik Ničajevský**
Osobní číslo: **T12146**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mechanické vlastnosti lakovaných povrchů**

Zásady pro vypracování:

1. vypracování literárních studií na dané téma
2. příprava zkušebních vzorků pro experiment
3. provedení experimentu
4. vyhodnocení naměřených výsledků

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- **dle doporučení vedoucího BP**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. David Mañas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 4. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, 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 13.5.2016

.....


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.

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá výzkumem mechanických vlastností lakovaných povrchů polymerů zejména polykarbonátů. V teoretické části jsou popsány metody, které se používají pro určení tvrdosti a mikrotvrdosti. Z větší části bude popsána instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI a zejména její parametry. V praktické části byly provedeny experimentální zkoušky mikrotvrdosti povlakovaných povrchů u polykarbonátů a to Makrolonu a Lexanu. Pro měření a zkoumání vlastností byla využita metoda Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI (Depth Sensing Indentation), pomocí které můžeme získat parametry jako je vtisková tvrdost, vtiskový modul, vtiskové tečení a deformační práci při vtisku indentoru.

Klíčová slova: mechanické vlastnosti, mikrotvrdost, tvrdost, Instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI), polykarbonát

ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on research of mechanical properties of lacquered polymer surfaces especially of polycarbonate. Theoretical part describes methods used for determination of hardness and micro-hardness and its large part will describes the Depth Sensing Indentation and especially its parameters. In practical part the experimental tests micro-hardness of coated polycarbonate surfaces, namely Macrolon and Lexan were executed. The Depth Sensing Indentation method was used for measurement and observation of properties. By using the DSI could be acquired parameters such as indentation hardness, indentation module, flow indentation and deformational work of indenter indentation.

Key words: mechanical properties, micro-hardness, hardness, Depth Sensing Indentation, polycarbonate

V těchto řádcích bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Davidu Maňasovi, PhD., za užitečné a odborné rady, obětavý přístup a také za čas, který mi věnoval při vypracování bakalářské práce.

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

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 9 |
| TEORETICKÁ ČÁST | 10 |
| 1 METODY MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ | 11 |
| 1.1 DEFINICE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ..... | 11 |
| 1.2 URČENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ..... | 11 |
| 1.2.1 Rozdělení zkoušek mechanických vlastností | 11 |
| 2 POLYMERY | 13 |
| 2.1 TVAR MAKROMOLEKUL..... | 13 |
| 2.2 POLYKARBONÁT (PC) | 14 |
| 3 METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI | 16 |
| 3.1 INDENTAČNÍ ZKOUŠKY TVRDOSTI..... | 17 |
| 3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella | 17 |
| 3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella..... | 19 |
| 3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse..... | 21 |
| 3.1.4 Zkouška tvrdosti podle Knoopu | 23 |
| 3.1.5 Zkouška tvrdosti podle Berkoviche | 24 |
| 4 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA – DSI | 25 |
| 4.1 PRINCIP METODY | 25 |
| 4.1.1 Faktory ovlivňující přesnost indentačního měření | 26 |
| 4.2 METODA OLIVER A PHARR..... | 27 |
| 4.3 URČENÍ VÝSLEDKŮ DSI ZKOUŠKY | 28 |
| 4.3.1 Určení tvrdosti..... | 28 |
| 4.3.2 Vtiskový modul pružnosti | 28 |
| 4.3.3 Vtiskové tečení..... | 29 |
| 4.3.4 Deformační práce | 30 |
| 5 POVLAKOVANÉ POLYMERY (POLYKARBONÁTY) | 31 |
| PRAKTICKÁ ČÁST | 32 |
| 6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE | 33 |
| 7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 34 |
| 7.1 VLASTNOSTI POUŽITÝCH MATERIÁLŮ..... | 34 |
| 7.2 VÝROBA VZORKŮ | 35 |
| 7.3 VOLBA A ROZMĚRY ZKUŠEBNÍHO VZORKŮ | 36 |
| 8 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI | 37 |
| 8.1 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT..... | 37 |
| 8.2 MĚŘENÉ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY A PARAMETRY ZKOUŠKY | 39 |
| 9 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ | 40 |
| 9.1 ZNÁZORNĚNÍ NAMĚŘENÝCH VTISKOVÝCH HODNOT V GRAFU | 40 |
| 9.2 VTISKOVÁ TVRDOST H_{IT} | 40 |
| 9.2.1 Zatížení indentoru 0,5 N | 41 |
| 9.2.2 Zatížení indentoru 1 N | 41 |
| 9.2.3 Zatížení indentoru 5 N | 42 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 9.3 | VTISKOVÝ MODUL PRUŽNOSTI E_{IT} | 42 |
| 9.3.1 | Zatížení indentoru 0,5 N | 43 |
| 9.3.2 | Zatížení indentoru 1 N | 44 |
| 9.3.3 | Zatížení indentoru 5 N | 44 |
| 9.4 | VTISKOVÉ TEČENÍ (CREEP) C_{IT} | 45 |
| 9.4.1 | Zatížení indentoru 0,5 N | 45 |
| 9.4.2 | Zatížení indentoru 1 N | 46 |
| 9.4.3 | Zatížení indentoru 5 N | 46 |
| 9.5 | DEFORMAČNÍ PRÁCE | 47 |
| 9.5.1 | Zatížení indentoru 0,5 N | 47 |
| 9.5.2 | Zatížení indentoru 1 N | 48 |
| 9.5.3 | Zatížení indentoru 5 N | 48 |
| 9.6 | INDENTAČNÍ KŘIVKY | 49 |
| 9.6.1 | Zatížení indentoru 0,5 N | 49 |
| 9.6.2 | Zatížení indentoru 1 N | 51 |
| 9.6.3 | Zatížení indentoru 5 N | 52 |
| ZÁVĚR | | 54 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | | 56 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | | 58 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | | 60 |
| SEZNAM TABULEK..... | | 62 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | | 63 |

ÚVOD

Chceme-li správně a hospodárně využívat materiály, měli bychom znát jejich mechanické vlastnosti, proto je musíme co nejpřesněji analyzovat.

Definice mechanických vlastností je taková, že pevnost materiálu je jeho schopnost odolávat namáhání bez poruchy. Celá řada materiálů kolem nás je vystavena různému druhu namáhání, například tahem, tlakem, krutem a namáhání na střih a ohyb. Mezi nejdůležitější mechanické vlastnosti patří tvrdost, pevnost, tvárnost, houževnatost. V této bakalářské práci se budeme zajímat o tvrdost povrchu polymerů.

Tvrdost je jedna z nejdůležitějších vlastností, která se zjišťuje. Její zjišťování je poněkud jednoduché, levné a lehce opakovatelné. Provádí se přímo na výrobku nebo na vytvořeném zkušebním vzorku, na kterém můžeme provádět i jiné mechanické zkoušky. Tvrdost můžeme měřit mnoha způsoby. Jednotlivé metody jsou rozebrány v této bakalářské práci.

V dnešní době vyžadujeme od polymerních materiálů stále vyšší požadavky. Je zřejmé, že každý materiál reaguje se svým okolím prostřednictvím svého povrchu. Jedním ze způsobů jak můžeme mechanické vlastnosti povrchu polymeru přiblížit vlastnostem povrchu skla, kovu a jiným je povlakování povrchu polymeru. Může tím zlepšit vlastnosti zejména proti opotřebení či zvýšit tvrdost nebo snížit koeficient tření. Jedná se o novou metodu úpravy povrchů polymerů.

V dnešní době jsou pomalu ale jistě těžké kovy, sklo a jiné materiály nahrazeny polymery. Dochází k tomu, protože řetězová struktura atomů polymerů je lepší jako například u kovů. Polymery mají oproti kovům lepší zpracovatelnost, lepší dostupnost výrobních technologií. Mají lepší vlastnosti a to zejména menší měrnou hmotnost, odolnost proti korozi, izolační vlastnosti a další užitečné vlastnosti.

Tato bakalářská práce se zabývá měřením mikrotvrdosti dvou polykarbonátů s různými povlaky povrchů a s různým zatížením. Ke zjištění mikrotvrdosti byla použita metoda Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI, která nám vyjádří parametry nejen o tvrdosti, ale i vtiskové tečení, vtiskový modul nebo deformační práci. Hodnoty byly matematicky vyhodnoceny a znázorněny v grafech.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 METODY MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Mezi základní rozdělení mechanických zkoušek z hlediska působení síly jsou zkoušky statické a dynamické. Poté máme zvláštní technické zkoušky, u kterých bych zmínil nejdůležitější zkoušku a to je zkouška tvrdosti. Zkouškou tvrdosti se budeme zabývat nejvíce a to přesně Indentačními zkoušky tvrdosti a Instrumentovanou zkouškou tvrdosti – DSI. [1]

- Statické zkoušky – zatížení zvětšujeme pozvolna, působí delší dobu, při dlouhodobých zkouškách dny až roky.
- Dynamické zkoušky – zatížení působí rázově ve zlomkách sekund, při zkouškách na únavu materiálu se zatížení opakuje několikrát.
- Zvláštní technické zkoušky – zde se provádí například zkoušky na tvrdost, houževnatost, koeficient tření nebo odolnost proti opotřebení. [1]

1.1 Definice mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti bych definoval tak, že pevnost materiálu je schopnost odolávat působení napětí bez větší poruchy. Napětí může působit v tahu, tlaku a smyku.

1.2 Určení základních pojmů

Pro začátek bych v této oblasti definoval důležité základní pojmy, které důležité pro další popis používaných metod měření.

1.2.1 Rozdělení zkoušek mechanických vlastností

- Mechanické zkoušky statické

Základem těchto zkoušek je zkouška pevnosti. Nejrozšířenější zkouškou pevnosti je zkouška tahem, u téměř všech materiálů je tato zkouška nutná, protože pomocí jí získáváme základní data pro výpočet konstrukčních prvků a následnou volbu materiálu. Zkoušku z pravidla neprovádíme na vyrobené součásti, ale na zkušebních tyčích. Tyto tyče jsou normalizované, mohou být kruhové nebo ploché, krátké či dlouhé.

Princip zkoušky spočívá v tom, že materiál pozvolně zatěžujeme silou v tahu. Síla v tahu působí delší dobu. Při dlouhodobých zkouškách působí dny až roky.

- Mechanické zkoušky dynamické

V praxi jsou součásti spíše namáhány rázovým zatížením, kde smysl zatížení se opakovaně či prudce mění. Takové údaje zjistíme ne statickým, ale dynamickými zkouškami. Při takovém namáhání může dojít k poruše materiálu, i když zatěžující síla nedosáhla maximální statické pevnosti materiálu. Zkouška rázem zjišťuje kolik energie nebo práce je potřeba k narušení struktury materiálu. Je nejpoužívanější dynamická zkouška, ukazuje jak houževnatý nebo křehký materiál je.

Princip zkoušky dynamické se mění v tom, že zatížení působí rázově ve zlomkách sekund, při zkouškách na únavu materiálu se zatížení opakuje několikrát.

- Zvláštní technické zkoušky

Údaje ze zvláštních technických zkoušek můžeme považovat za směrné, neboť výsledky zkoušek závisí na mnoha vedlejších činitelích. Z těchto zkoušek jsou nejdůležitější zkoušky tvrdosti. Zkoušky dělíme podle teplot, při kterých se provádí, pak je dělíme na zkoušky za normálních teplot, vysokých a nízkých teplot.

2 POLYMERY

Jsou přírodní (bílkoviny, škrob, celulóza, kaučuk) nebo syntetické (polyetylén, polyvinylchlorid) látky, mají specifické vlastnosti. Jejich velké molekule (makromolekule) většinou obsahují, uhlík, vodík, kyslík, dusík, chlór a nespočet jiných prvků. V makromolekule se jako článek v řetězu mnohonásobně opakuje základní monomerní jednotka, představují chemickou stavebnici, umožňující různou proměnlivost struktur i vlastností výsledných látek. Polymery dělíme do dvou skupin, vyznačených v tabulce (Tab. 1.) [2]

Tab. 1 : Základní rozdělení polymerů [2] [8]

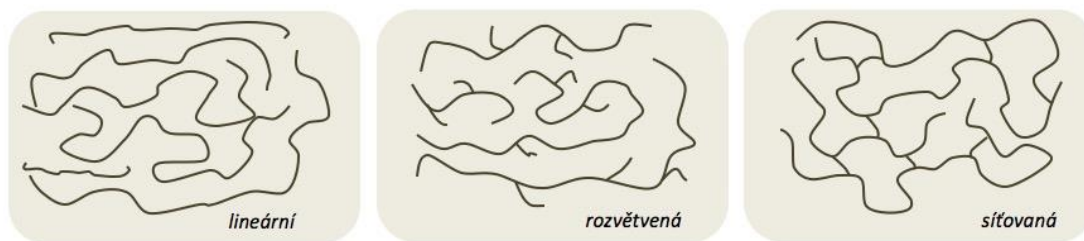
| POLYMERY | | | |
|-------------|--------------|------------|---------------------------|
| PLASTY | | ELASTOMERY | |
| TERMOPLASTY | REAKTOPLASTY | KAUČUKY | TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY |

- Plasty – Za běžných podmínek jsou tyto polymery většinou tvrdé, často i křehké. Plastickými a tvarovatelnými se stávají po zvýšení teploty, pokud je změna z plastického do tuhého stavu opakovaně vratná jedná se o termoplasty. Hovoříme-li o změně nevratné, jedná se o reaktoplasty, dochází zde k chemické reakci mezi molekulami většinou při zvýšené teplotě.
- Elastomery – Lze za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. Tato deformace je převážně vratná. Vysoce elastický polymer, jehož dominantní skupinou jsou kaučuky, z kterých dál vyrábíme pryže. [2]

2.1 Tvar makromolekul

Tvar je dán funkčností monomerů, rozhoduje o možnosti vzniku makromolekul a to lineárních nebo zesíťovaných. Vliv zda vznikne při polymeraci polymer lineární nebo rozvětvený mají teplotu a tlak což jsou reakční podmínky. [8]

Makromolekulární sítě vznikají například síťováním, tzn. spojování lineárních nebo mírně rozvětvených makromolekul. Řetěze tvoří mikroheterogenní systém, který má rozdílné vlastnosti v jednotlivých mikroobjemech. Tento systém tvoří nadmolekulární prostorové jednotky, pomocí kterých se dělí na lineární, rozvětvené nebo uspořádané do prostorové sítě zobrazené na obrázku (Obr. 1). [8]

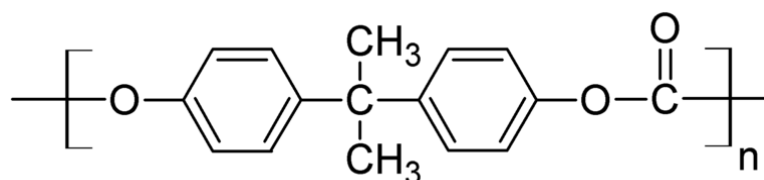


Obr. 1 : Makromolekuly – schématické znázornění

V této bakalářské práci se budeme zabývat měřením tvrdosti Termoplastů a to dvou PP – Polykarbonátů (Makrolon a Lexan). Rozdělení Termoplastů je znázorněné v tabulce (Tab. 2).

2.2 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát je z chemického hlediska polyester, ve které tvoří kyselou složku kyselina uhličitá, často se však řadí do samostatné skupiny. Vznik polykarbonátu syntézou je znázorněn na obrázku (Obr. 2). [3] [7]



Obr. 2 : Syntéza polykarbonátu

Vlastnosti:

Jde o amorfní, dokonale průhledný termoplast. Vyznačuje se dobrými mechanickými vlastnostmi. Mezi hlavní výhody patří dobrá pevnost, tuhost a hlavně tvrdost, ale taky houževnatost a odolnost proti prudkému nárazu tedy lomu. Má velmi dobré elektroizolační vlastnosti. Vzhledem k teplotě zesklennění uvedené v tabulce (Tab. 2) je odolný proti „Creepu“, je dlouhodobě tepelně stálý do teploty 135 °C. [7]

Tab. 2 : Typické vlastnosti polykarbonátu (PC)

| Vlastnosti Polykarbonátu (PC) | | | | |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|
| Hustota [g/cm ³] | Teplota zesklnění [°C] | Modul pružnosti [Mpa] | Mez pevnosti [Mpa] | Navlhavost [%] |
| 1,2 | 150 | 2100 - 2400 | 56 - 67 | 0,1 - 0,2 |

Použití:

Patří do skupiny konstrukčních polymerů. V porovnání s jinými plasty jsou jeho vlastnosti středně dobré. Používá se pro tělesa injekčních stříkaček, k výrobě brýlových skel, čoček fotoaparátů. V automobilovém průmyslu se využívají na svítilny automobilů, nárazníky, „skla“. Využívají se na součástky elektroprůmyslu, telefony, stěny televizorů, kostry cívek, počítačů a mnoho dalších. [7]

3 METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI

K měření tvrdosti nejčastěji používáme tzv. vnikací metody, které spočívají ve vtlačování vnikacího tělíska (indentoru) různě definovanou silou do zkoušeného povrchu. Tvrdost můžeme zkoušet dvěma způsoby. První způsob je na principu vtlačení indentoru do materiálu tak, aby došlo k plastické deformaci materiálu. Tato metoda je nazývána jako metoda vnikací (indentační). Druhý způsob měření tvrdosti je založen na principu elastické interakce povrchu materiálu a zkušebního tělíska. Indentor nesmí podléhat plastické deformaci, proto by měl dosahovat vysoké tvrdosti Youngova modulu a meze pevnosti. Aby nedošlo k plastické deformaci vnikacího tělíska, používá se jako funkční část diamant. [4]

Hodnoty měření tvrdosti mohou být ovlivněny celou řadou podmínek. Například tím, že při měření dochází k víceosému namáhání měřeného vzorku. Proto výsledná hodnota tvrdosti záleží na vlastnostech zkoušeného materiálu: [4] [6]

- elastické vlastnosti
- plastické vlastnosti
- velikost zatěžující síly indentoru , který vniká do měřeného vzorku

Podle použitého principu rozdělujeme zkoušky měření tvrdosti do několika skupin a to na zkoušky: [4]

- vtiskové – tvrdost materiálu zjišťujeme pomocí velikosti a tvaru vtisku indentoru
- odrazové – tvrdost je zjištěna spouštěním indentoru z určité výšky, indentor je kulovitě vybroušený diamant, který vytvoří ve zkoušeném materiálu odraz, který následně měříme
- vrypové – zde na zkoušeném materiálu vytvoříme při malém zatížení tvrdým hrotem rýhu neboli vryp, podle šířky vrypu následně určujeme tvrdost materiálu

Dále zkoušky tvrdosti dělíme na již zmíněné zkoušky podle aplikovaného zatížení na zkoušený materiál, kde výsledky zjistíme podle odezvy materiálu na působící zatížení: [4]

- zkoušky statické – nejznámější a nejvíce používaná metoda, tvrdost se hodnotí podle odolnosti materiálu proti vnikání cizího tělíska. Indentor je vtlačován předdefinovanou silou do zkoušeného vzorku (Rockwell, Vickers, Brinell)
- zkoušky dynamické – jsou to zkoušky, při kterých vnější síla nepůsobí klidně a bez rázů na indentoru. Dělíme je na dvě skupiny: plastické – indentoru vniká rázem a elastické – zjišťuje se výška odrazu indentoru spuštěného na vzorek.

- nepřímé – do této skupiny jsou zařazeny metody, které usuzují na hodnotu tvrdosti měřením jiných fyzikálních vlastností, které souvisejí většinou empiricky

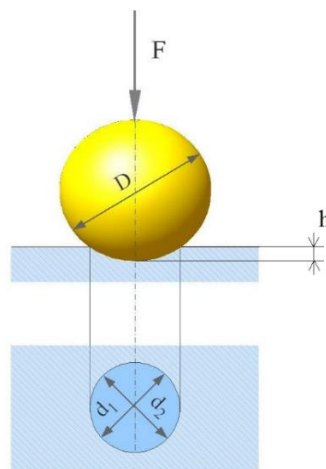
3.1 Indentační zkoušky tvrdosti

Indentační zkoušky tvrdosti se používají nejen ke zjištění tvrdosti materiálů, ale díky nim zjistíme další mechanické vlastnosti pevných látek jako je například pevnost, houževnatost nebo také vnitřní úroveň zbytkového napětí. Tyto mechanické vlastnosti zjistíme pomocí Vickersova, Berkovichova a Knoopova diamantového indentoru. U mnoha materiálů, testovaných vzorků dojde při zkoumání tvrdosti k elastické a plastické deformaci.

V případě křehkých materiálů dochází k plastické deformaci nejčastěji u indentorů s ostrými hroty a hranami neboť v ostrých hranách dochází k vyššímu napětí. Ke značnému nárůstu plastické deformace dochází u testů s kuželovými indentory kde jsou elastické deformace zanedbatelné ve srovnání s deformacemi plastickými. U takových vlastností pak jde říct, že se jedná o vzorek plastický. V dalším případě bude odezva elasticko-plastická, který způsobuje kulový indentor. [5]

3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Zkouška spočívá ve vtlačování vnikacího tělíska (indentoru o průměru D) do povrchu zkoušeného materiálu a následném měření průměru vtisku d , který zůstane na povrchu po odlehčení definovaného zatížení. Metoda Brinella je typická v tom, že díky relativně velké ploše vtisku lze zkoušet materiály s heterogenní strukturou. Tuto metodu používáme ke zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů. [5, 10]



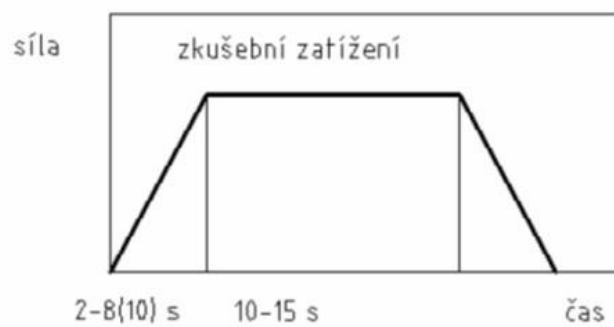
Obr. 3 : Zkouška podle Brinella

Vnikající tělesa

Ke zkouškám tvrdosti podle Brinella používáme dva druhy materiálů kuliček a tím jsou kuličky z kalené oceli značené (HBS) nebo kuličky z tvrdokovu neboli slinutých karbidů (HBW) průměru v mm. Kuličky vybíráme podle zkušební síly. Kalené ocelové kuličky používáme pro materiály, které nemají vyšší tvrdost podle Brinella než 450. Kuličky ze slinutých karbidů se používají pro materiály s tvrdostí podle Brinella ne vyšší než 650.

Zkušební tělesa

Zkušební tělesa musí mít hladký, rovný povrch bez okujené vrstvy a zejména úplně bez mazadel. Povrch by měl být co nejméně ovlivněn ohřevem nebo tvářením. Tloušťka vzorku by měla být nejméně osminásobně větší, než hloubka vtisku h . Na protilehlé straně nesmí být patrné žádné stopy deformace od vnikajících tělísek.



Obr. 4 : Průběh zatížení - metoda Brinell

Zápis hodnot tvrdosti

Tvrdost podle Brinella určená z hloubky je úměrná poměru získaného podílem zkušebního zatížení F plochou zaobleného povrchu vtisku S .

$$\text{HBT} = \frac{F}{S}, \quad \text{HB} = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.1)$$

kde F je zkušební zatížení, D je průměr kuličky, $d_{1,2}$ je střední průměr vtisku.

Modifikovaná metoda měření tvrdosti HBT. Spočívá ve vyhodnocení tvrdosti z hloubky vtisku.

$$\text{HBT} = \frac{0,102 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} k_1 + k_2 \quad (3.2)$$

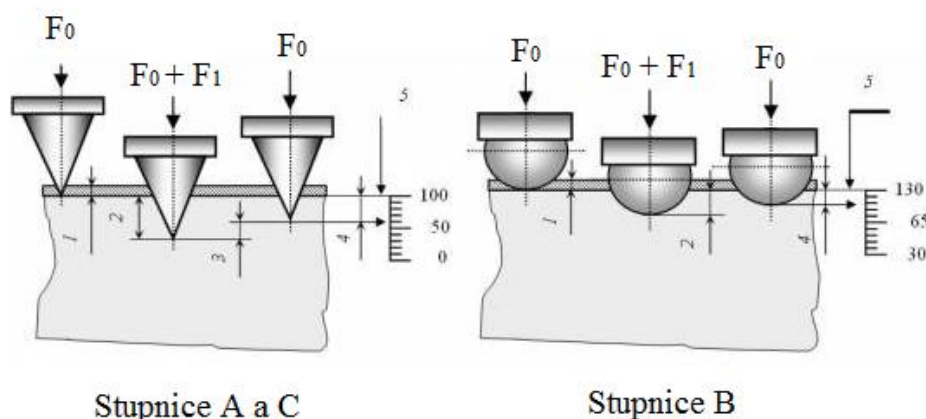
kde F je zkušební zatížení, D je průměr kuličky, $d_{1,2}$ je střední průměr vtisku, k_1 je korekční konstanta tvrdoměru, k_2 je korekční konstanta materiálu.

Uvedená metoda je používána v případě nutnosti automatizace měřicího procesu např. na lince pro zušlechťování materiálů. Odchytky tvrdosti zjištěné měřením hloubky vtisku jsou korigovány konstantami k_1 a k_2 .

Zápis výsledku tvrdosti obsahuje číslo tvrdosti, symboly HBS nebo HWB, dále obsahuje podmínky zkoušky a to v pořadí: průměr kuličky, velikost zkušebního zatížení, dobu působení zkušebního zatížení v sekundách. Zápis může vypadat například takto 350 HBW 5/750 [10]

3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Zkouška Rockwell je zkouškou vtiskovou, základní princip je podobný jako u metody Brinell, využívají se plastické deformace za působení statické síly. Tvrdost je vyhodnocována z hloubky vtisku v měřeném materiálu. Tato metoda využívá oproti metodě Brinell a Vickers předběžné zatížení F_0 , tímto zatížením působí indentor po dobu maximálně 3 s a vytváří vtisk o hloubce 1, poté je přidáno přídavné zatížení F_1 , které zvětší vtisk o hloubku 2, na celkové zkušební zatížení F , které se rovná době náběhu zatížení z F_0 na F je v rozmezí 1 – 8 s. Následuje cyklus výdrže zkušebního zatížení po dobu 4 ± 2 s, následně je pokles zatížení z F na F_0 . Tvrdost se vyhodnocuje z hloubky vtisku 4 po odlehčení. (Obr. 5) [5, 10]



Obr. 5 : Zkouška podle Rockwella [5]

Vnikající tělesa

Jako vnikací tělesa používáme kužele nebo kuličky, které vybíráme pomocí celkového zatížení indentoru. Kuličky jsou stejně jako u metody Brinella z kalené oceli nebo tvrdokovu (slnutých karbidů) o daném průměru 1,5875mm nebo 3,175mm. Druhým vnikacím tělískem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°. Tyto dva geometrické tvary značíme: [12]

- kulička – HRB, HRE, HRF, HRG ,HRH, HRT
- diamantový kužel - HRA, HRC, HRD, HR

Tab. 3 : Způsob výpočtu tvrdosti podle Rockwella pro jednotlivé stupnice

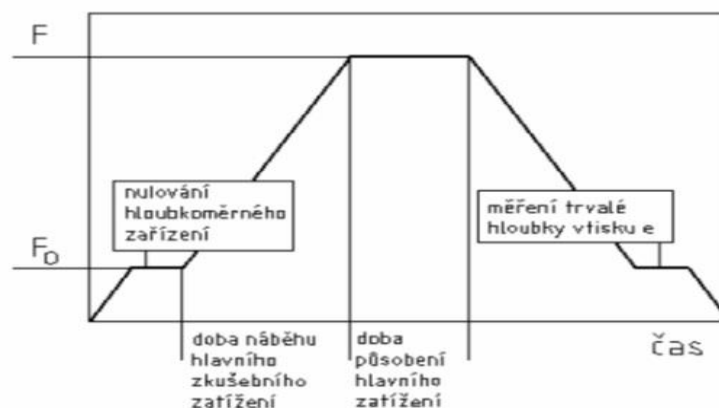
| Stupnice | Výpočet tvrdosti |
|------------------|------------------------------|
| A, C, D | $HR_x = 100 - e$ |
| B, E, F, G, H, K | $HR_x = 130 - e$ |
| N, T | $HR_{xx} \times x = 100 - e$ |

Zkušební tělesa

Zkušební tělesa mají stejné podmínky jako tělesa zkoušené metodou Brinella. Povrch musí být hladký, rovný a zejména bez mazadel. Tloušťka vzorku musí být nejméně 10 ti násobek hodnoty e . Na protilehlé straně zkoušené plochy nesmí být plastická deformace po vniku indentoru.

Zápis hodnot tvrdosti

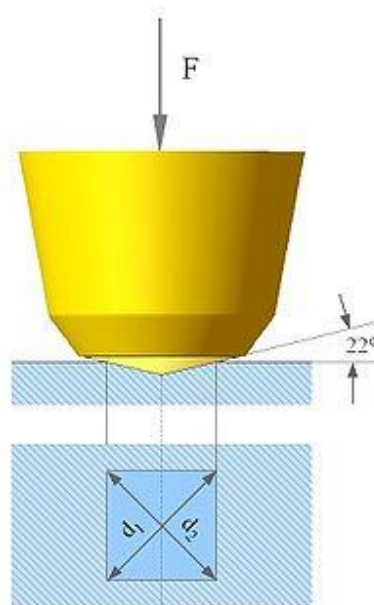
Tvrdot podle Rockwella se vyjadřuje pomocí čísel určujícími hodnotu tvrdosti a písmeny HR s uvedením stupnice tvrdosti např. 59 HRC, 70 HR 30N



Obr. 6 : Průběh zkušebního zatížení – metoda Rockwell

3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška tvrdosti Vickerse vznikla ve stejné době jako v Americe vznikla metoda Rockwellova, to je v roce 1922 v Anglii, kde za autory jsou označováni G. E. Sandland a R.L. Smith. Název metody vznikl podle firmy Vickers, ve které byl zkonstruován první tvrdoměr. Předností zkoušky je nezávislost tvrdosti na velikosti zatěžující síly F . Měření je tedy možné provádět i při malých zatěžujících silách. Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku. Průběh zkušebního zatížení je stejný jako u metody Brinell. [5]



Obr. 7 : Zkouška podle Vickerse

Tab. 4 : Rozsah zkušebního zatížení [5]

| Zkušební zatížení F (N) | Symbol tvrdosti | Označení |
|---------------------------|----------------------|---|
| $F \geq 49,03$ | $\geq HV5$ | Zkouška tvrdosti podle Vickerse |
| $1,961 \leq F < 49,03$ | HV 0,2 až $< HV5$ | Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení |
| $0,09807 \leq F < 1,961$ | HV 0,01 až $< HV0,2$ | Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse |

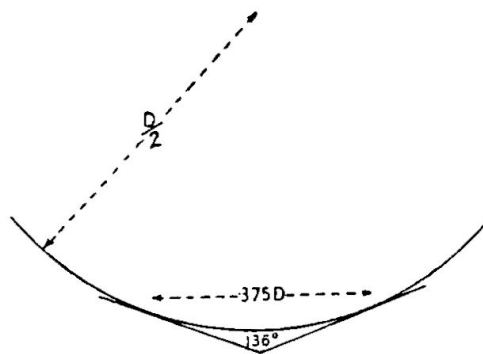
Tvrdost podle Vickerse

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (3.3)$$

kde F je zkušební zatížení (N), d je aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1 a d_2 (mm).

Vnikající tělesa

U metody Vickerse je používán jedno těleso, tím je diamant ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou (pyramida). Vrcholový úhel je $136^\circ \pm 0,5^\circ$. (Obr. 8) Úhel byl navržen na základu Brinellova testu. U Brinellova testu je indentor kulička o průměru D , která ve většině případů vytváří vtisky o průměru v rozsahu $0,25D - 0,5D$. Průměrná hodnota těchto rozsahů je $0,375D$, nanese-li tečny ke kontaktním bodům vtisku, vzniká nám zmíněný úhel 136° . Obvyklé zatížení dle normy ČSN 42 0374 jsou 9,8; 29,4; 49; 98; 294 a 490 N. [9]



Obr. 8 : Výběr úhlu Vickersova jehlan [9]

Zkušební tělesa

Tloušťka zkoušeného materiálu (vzorku) musí být nejméně 1,5x délky úhlopříčky vtisku. Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být známka plastické deformace způsobené vnikem indentoru. Vzdálenosti středů každého vtisku, by měly být minimálně 2,5x průměrné hodnoty úhlopříček. Při měření tvrdosti u vzorků s velkou mírou povrchové hrubosti a silnou heterogenní strukturou se zkouška podle metody Vickerse nehodí.

Zápis hodnot tvrdosti

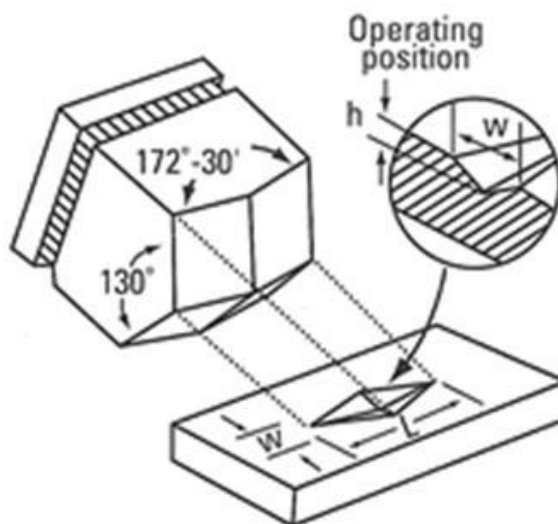
Výsledek měření tvrdosti obsahuje číslo tvrdosti a symbol HV, za kterým se nachází číslo použitého zkušebního zatížení. Příklad zápisu takovéto tvrdosti je např. 814 HV 5.

3.1.4 Zkouška tvrdosti podle Knoop

Knoopův indentor byl vyvinut jako alternativa k Vickersova indentoru a to v roce 1939 F. Knoopem, C. G. Petersem a W. V. Emersonem. Od metody Vickersovy se liší tvarem indentoru. Byl vyvinut výhradně pro zkoušky s nízkým zatížením. Výhoda zkoušky je ta, že lze poměrně přesně měřit tvrdost u úzkých součástí např. drátů. Díky malé hloubce průniku indentoru lze měřit materiály se slabou povrchovou vrstvou. [13]

Vnikající tvar

Knoopův indentor má tvar čtyřstěnného diamantového jehlanu, ale základnu nemá čtvercového průřezu. Základnou je velmi protáhlý kosočtverec. V materiálu vytváří stopu ve tvaru kosodélníku. Protilehlé strany svírají úhel 172° a 130° (poměr úhlopříček 7:1). (Obr. 10)



Obr. 9 : Zkouška podle Knoop [12]

Výhodou Knoopova indentoru jsou relativně největší deformace u krátké úhlopříčky a v tomto směru je tedy největší odpružení při odlehčení. Ve směru dlouhé úhlopříčky je odpružení zanedbatelné. Zatížení volíme od 1,96; 2,94; 4,9; 9,8 N [12]

Tvrdost se stanoví podle vztahu:

$$HV = 1,451 \frac{F}{l^2} \quad (3.4)$$

kde F je zkušební zatížení, l je hodnota delší úhlopříčky.

Zápis hodnot tvrdosti

Tvrdot materiálu zkoušené podle metody Knoopa značíme např. HK 0,2; HK0,3; HK0,5 nebo HK1.

3.1.5 Zkouška tvrdosti podle Berkoviche

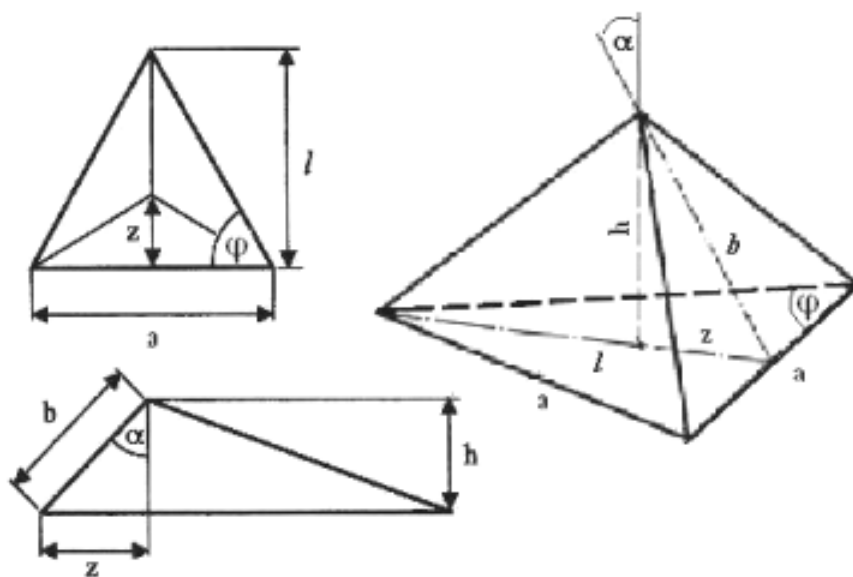
Berkovichův indentor vznikl roku 1951, jedná se o nepravidelný třístěnný jehlan z diamantu kde boční stěny svírají s výškou jehlanu $65,27^\circ$. Poměr projekční plochy k hloubce vtisku odpovídá podmínce stejného průměru, tak jako u metody Vickerse. Hodnota tvrdosti podle Berkoviche je značená H_{CH} , je vyjádřena jako poměr velikosti zatěžující síly a plochy. [5] [12]

Tvrdot stanovíme podle vztahu:

$$H_{CH} = 1570 \frac{F}{l^2} \quad (3.5)$$

kde F je zkušební zatížení jehlanu, l je výška trojúhelníku vytvořená ve zkoušeném vzorku.

Berkovichův indentor byl vytvořen z důvodu náročnosti výroby čtyřbokého jehlanu u metody Vickers. Problém byl dodržet geometrické podmínky sbíhavosti čtyřbokého Vickersova jehlanu. Výhoda Berkovichova indentoru je ta, že snáší nárazy a neopatrné zacházení. Trojboký indentor se v dnešní době používá pro nanoindentační zkoušky. (Obr. 11) [5]



Obr. 10 : Zkouška podle Berkoviche [12]

4 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA – DSI

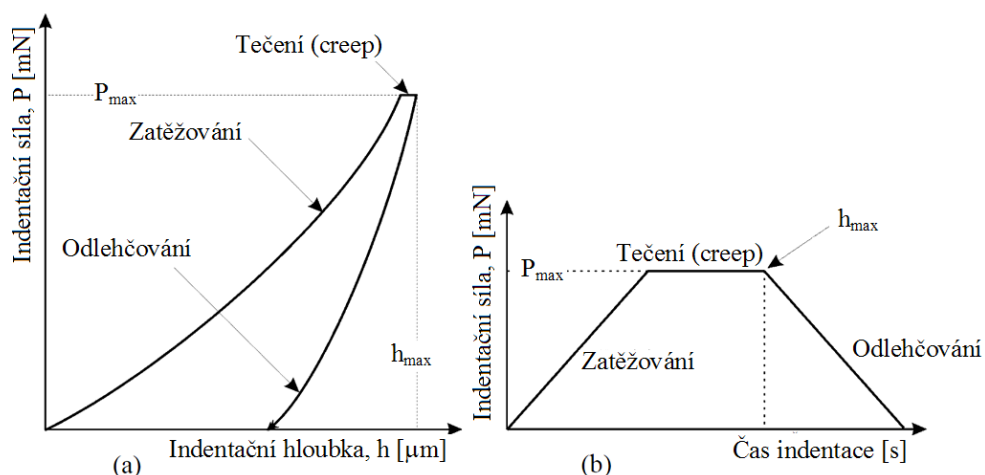
Metoda DSI vznikla v 70. letech 20. století, autory metody jsou Bulichev a Alekin. Shromažďování dat, analýzy a metodologie nebyly dokonalé. Ke zdokonalení došlo na počátku 80. let, které provedli Oliver a Pharr. V porovnání s ostatními metodami je metoda DSI tou novější. Dříve se pro měření tvrdosti používala tzv. klasická zobrazovací metoda založená na zjišťování rozměrů reziduálního vtisku. Tato metoda se ale stala nedostatečnou, protože rozvoj technologických vrstev a požadavků na měření lokálních mechanických vlastností. Hlavní nevýhoda a důvod proč vznikla metoda DSI byla nemožnost měřit mechanické vlastnosti velmi tenké, elastické vrstvy. [5]

4.1 Princip metody

Principem metody je okamžitá detekce a zobrazování změny hloubky průniku indentoru do zkoumaného vzorku, nárůst nebo pokles zatížení v celém průběhu zatěžování nebo odlehčování indentoru. Zpracováním dat vzniká grafická charakteristika tzv. indentační křivka, kde je možné vidět závislost zatížení na hloubce vtisku. (Obr. 12)

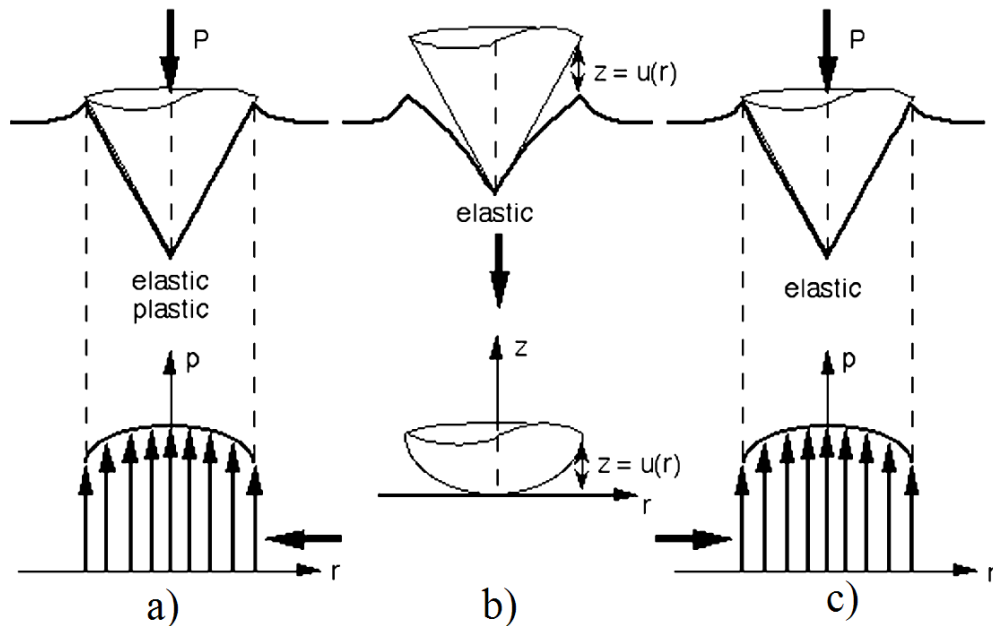
Fáze průběhu zkoušky DSI:

První fází indentačního cyklu je řízené zatěžování, kdy je na indentor definovanou rychlostí aplikovaná zatěžovací síla. Druhou fází cyklu je odlehčování a spočívá ve snižování zatěžující síly až na nulovou hodnotu. Obvykle mezi fází zatěžování a fází odlehčování bývá prodleva, kdy vzorek je vystaven maximální zatěžovací síle, což umožňuje zkoumat creep (tečení). [14]



Obr. 11 : Indentační křivka (a), časový diagram indentační zkoušky DSI (b) [14]

Během zatěžování dochází k elasticko-plastické deformaci a tvar vtisku odpovídá tvaru indentoru obrázek 11 a). Během odlehčování dojde ke změně tvaru vtisku a to kvůli elastickému zotavení, tvar vtisku neodpovídá indentoru obrázek 11 b). K elastické deformaci dochází při opětovném zatěžování a odlehčování obrázek 11. Pomocí zkoušky DSI můžeme vyhodnotit elastický modul, tečení materiálu (Creep), lomovou houževnatost, práce vynaloženou na vtisk nebo fázové transformace. [5]



Obr. 12 : Průběh zatěžování a odlehčování indentoru: a) zatížení, b) odlehčení, c) opětovné zatížení [5]

4.1.1 Faktory ovlivňující přesnost indentačního měření

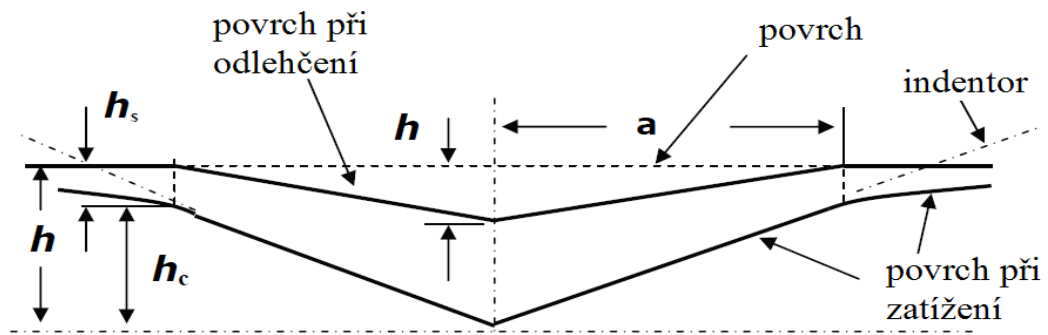
Dělíme je do dvou skupin:

- Ve skupině první jsou to tyto faktory: geometrie indentoru, tuhost měřicího přístroje, kolísání teplot apod.
- Ve druhé skupině se jedná o faktory, které má na starosti měřený materiál: zbytkové napětí, jakost povrchu, tvar vtisku apod.

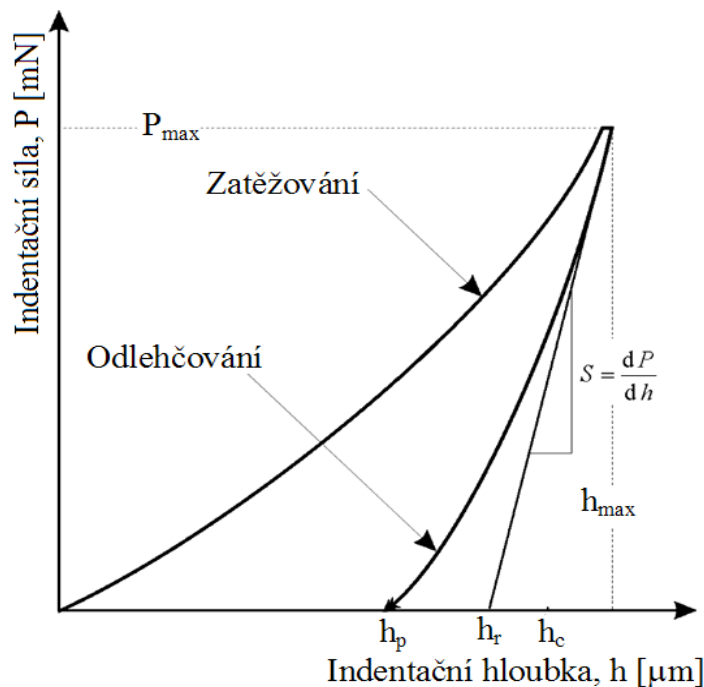
Z důvodu nepřímého určení hodnoty tvrdosti z přesného určení hloubky vtisku do měřeného materiálu se u instrumentované zkoušky dopouštíme chyby. Proto přesné změření hloubky indentace a zatěžující síly je obtížné.

4.2 Metoda Oliver a Pharr

Tato metoda se nejčastěji používá k výpočtu tvrdosti a elastického modulu. Hodnoty zatěžující síly P a hloubky h jsou výsledkem instrumentované zkoušky tvrdosti. Metoda je založena na předpokladu elasticko-plastického zatěžování a elastického odlehčování. Výsledné hodnoty analýzy jsou maximální zatěžující síla P_{MAX} , maximální indentační hloubka h_{MAX} a konstantní tuhost S , která je definovaná jako směrnice tečny počáteční části odlehčovací křivky (Obr. 15). [5]



Obr. 13 : Schéma zatěžování a odlehčování [5]



Obr. 14 : Indentační křivka [5]

4.3 Určení výsledků DSI zkoušky

4.3.1 Určení tvrdosti

Vtisková tvrdost HIT můžeme definovat jako míru rezistence k trvalé deformaci nebo poškození. Vtisková tvrdost HIT obecně definujeme jako maximální zatěžující sílu P_{max} podělenou průmětem kontaktní plochy indentoru s tělesem zkušebním. [15, 5]

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} \quad (4.1)$$

Funkcí okamžité hloubky vtisku určené při odlehčování indentoru je Martenzova tvrdost značená HM, tato tvrdost zahrnuje plastickou i elastickou deformaci, proto tato hodnota může být použita pro všechny druhy materiálu. Martenzova tvrdost HM je definována jako zatěžující síla P podělená plochou povrchu vnikacího tělesa $A_s(h)$ ve vzdálenosti h od hrotu, tedy. [15, 5]

$$HM = \frac{P}{A_s(h)} \quad (4.2)$$

Tvrdost podle Vickerse HV se určí jako [15, 5]

$$HV = \frac{P_{max}}{9,81 \cdot A_c(h_c)} \quad (4.3)$$

4.3.2 Vtiskový modul pružnosti

Metodou DSI indentačních zkoušek, lze získat materiálové veličiny jako je indentační modul E_{IT} také nazývaný vtiskový modul, redukovaný E_r a komplexní modul E^* . Vtiskový modul obecně určíme ze směrnice tečny, která slouží k výpočtu vtiskové tvrdosti HIT. Vtiskový modul má za ideálních podmínek stejný význam jako Youngův modul. [15,5]

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (4.4)$$

kde ν_s je Poissonův poměr zkušebního tělesa a volí se pro kovové materiály 0,2 až 0,4 a pro polymerní materiály 0,3 až 0,4 a E^* je komplexní modul.

Z následující rovnice určíme redukovaný modul E_r : [15, 5]

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot C \cdot \sqrt{A_p}} \quad (4.5)$$

kde A_p je průmět kontaktní plochy a C je kontaktní poddajnost.

Komplexní modul E^* je definován jako: [15, 5]

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (4.6)$$

kde E_i je modul vnikacího tělesa, E_r je redukovaný modul vtiskového kontaktu a ν_i je Poissonův poměr vnikacího tělesa (u diamantu 0,07).

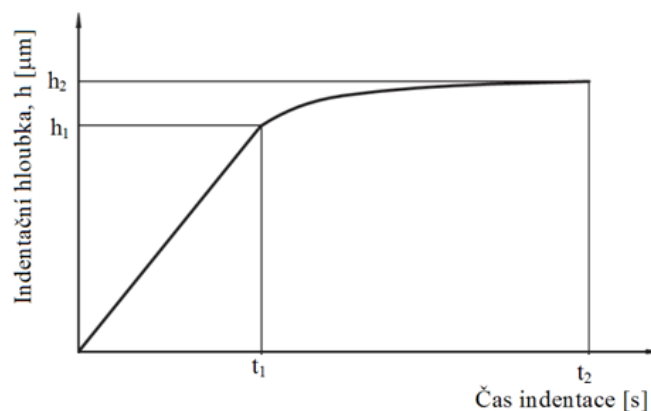
4.3.3 Vtiskové tečení

Hodnotu tečení (creep) materiálu zkusíme způsobem, při kterém dochází ke konstantnímu zatížení zkoušeného vzorku, kde se měří změna hloubka vtisku, může se vypočítat relativní hloubka vtisku.

Hodnotu tečení CIT nám určí vztah: [15, 5]

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (4.7)$$

kde h_1 a h_2 jsou hloubky vtisku v čase t_1 a t_2 , v čase t_1 je dosaženo zkušebního zatížení a v čase t_2 je zatížení konstantní na úrovni zkušebního zatížení



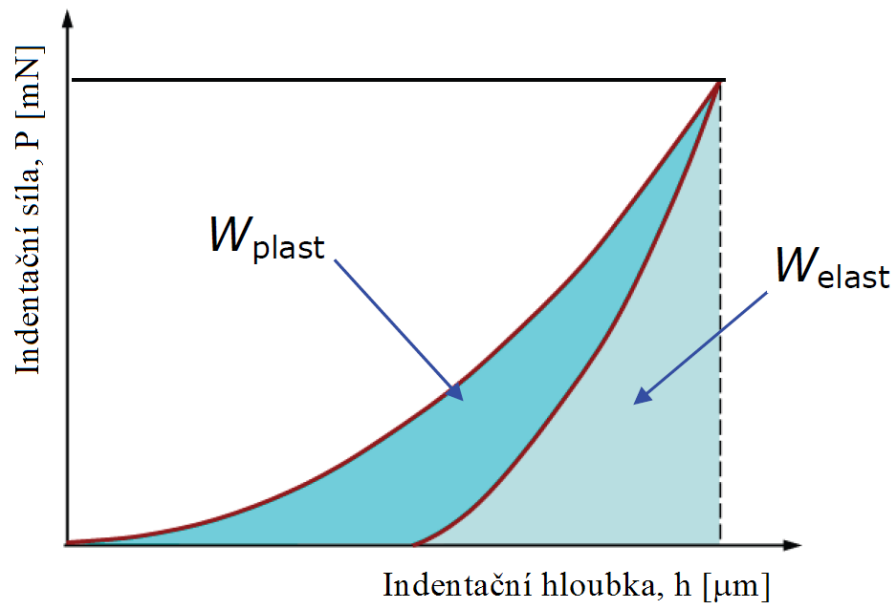
Obr. 15 : Vyjádření vtiskového tečení [5]

4.3.4 Deformační práce

V průběhu indentačního cyklu se celková práce značená W_{total} je rovna ploše pod zatěžovací křivkou. Nevratnou plastickou práci W_{plast} udává plocha mezi zatěžovací a odlehčovací křivkou. Obecně Indentační křivka (obr. 2.08) je zdrojem velkého množství informací. Koeficient zpětné relaxace η_{IT} je popsán jako podíl elastické práce W_{elast} a celkové práce W_{total} . [15, 5]

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \quad (4.8)$$

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 \quad (4.9)$$



Obr. 16 : Indentační křivka - deformační práce [5]

5 POVLAKOVANÉ POLYMERY (POLYKARBONÁTY)

Povlakované polymery vznikly začátkem 90. let, kdy představil würzburgský ústav pro výzkum silikátů Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) první anorganicko-organické hybridní polymery s označením Ormocer. Tento hybridní polymer byl vytvořen modifikovaným procesem sol-gel. Vynálezci ani z daleka netušili, že stojí na prahu materiálů se zázračnými vlastnostmi pro povrchové inženýrství. [11]

Dva velcí světoví výrobci PC plastů Bayer AG (Makrolon) a General Electric Plastics (Lexan) spojili své síly a vytvořili společný podnik Exatec GmbH k výrobě lehkých PC skel pro automobilový průmysl s povlaky odolnými proti opotřebení a s antiadhezivními účinky. Mělo by jít o multifunkční povlak, kde dominuje odolnost vůči opotřebení ve spojení s proti zamlžovacími a antireflexními účinky.

Povlaky používáme nejen na polymerech, ale i na kovech. Používají se různé druhy povlaků a to optoelektronické povlaky, povlaky pro korozní ochranu kovů, antistatické a antiadhezivní povlaky, proti poškrábání a opotřebení a mnoho dalších jako třeba dekorační povlaky.

Povlakování zvýší tvrdost a tím i ořezu-odolnost povrchu, dá plastům atraktivní kovový vzhled v mnoha barvách a chrání plasty proti korozi. Je možné povlakovat povrch plastů jak kovy, tak i vysoce odolnými keramikami.

Povlaky mají silné hydrofobní a oleofobní účinky vůči vodě, olejům, tukům. Cílem povlaků je snížit povrchové napětí substrátů na $13 - 20 \text{ mN.m}^{-1}$ (povrchové napětí vody je 73 mN.m^{-1}) [11]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce byly tyto následující body:

- Zpracování literárních studií na dané téma
- Příprava zkušebních vzorků pro experiment
- Provedení experimentu – získání potřebných dat
- Následné vyhodnocování naměřených dat z experimentu

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této bakalářské práce se zabývá měřením mechanických vlastností a to zejména měření tvrdosti povlakovaných povrchů PC (polykarbonát). Zkušební tělesa dvou polykarbonátů vznikly dle příslušné normy vstřikovací technologií a v následném povlakování 7 různými laky. Získané hodnoty byly následně zpracovány a vyhodnoceny.

Měření proběhlo na 7 vzorcích, na každý vzorek byl nanesen povlak (lak). Tvrdost byla zkoušena 10x za podmínek opakovatelnosti a to při zatížení 0,5 N, 1 N a 5 N. Zkouška byla provedena metou DSI neboli instrumentovaná zkouška tvrdosti a to na mikrotvrdoměru Micro-Combi Tester od firmy CMS Instrments. Získané hodnoty byly následně zpracovány a vyhodnoceny.

V experimentu byly použity PC (polykarbonáty) Marklon AL2447 a Lexan LS1, na tyto dva polymery byl nanesen povlak. Mezi povlaky byla porovnávána mikrotvrdomost jednotlivých laků nanesených na připravených destičkách z Makrolonu a Lexanu.

PC jsou ve formě granulí, byly zpracovány ve vstřikovacím stroji Arburg a poté byl na vzorky nanesen lak. Mikrotvrdomost byla zjištěna pomocí zařízení Micro-Combi Tester, které pracuje na principu Vickersova tvrdoměru. Zkouška se provádí na povrchu, který musí být hladký a rovný, povrch by měl být před povlakováním zcela bez mazadel a jiných přísad. Příprava zkušebního tělesa se provádí tak, aby jeho změna vlastností např. ohřevem nebo tvářením při řezání, broušení a leštění byla co nejvíc omezena. Výsledky byly graficky zpracovány

7.1 Vlastnosti použitých materiálů

V experimentální části používáme dva polykarbonáty a to Lexan a Makrolon. Polykarbonáty patří mezi termoplastické polymery tedy termoplasty. Makrolon je neplněný amorfní termoplast, díky svým reologickým vlastnostem tzn. Snadno tekoucí je vhodný pro výrobu vstřikováním. Nejen oproti Lexanu, ale i ostatním polykarbonátům se vyznačuje nižší houževnatostí. Lexan je velmi dobrý technický termoplast, má dobré mechanické, optické, tepelné a elektrické vlastnosti, proto se dá říct, že je to ideální materiál pro různé technické použití. Vlastnosti těchto dvou polykarbonátů můžeme vidět v tabulce (Tab. 5).

Tab. 5 : Vlastnosti použitých materiálů

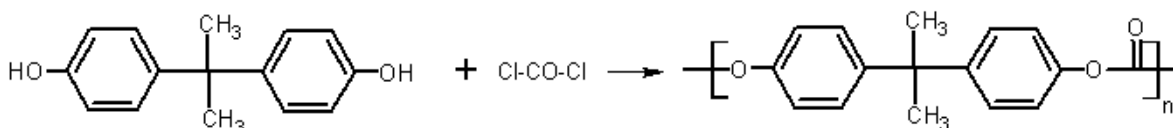
| Název | Makrolon, Lexan |
|----------------------|-----------------|
| Struktura | amorfní |
| Pevnost v tlaku | > 80 MPa |
| Pevnost v tahu | 55–75 MPa |
| Youngův modul | 2000–2400 MPa |
| Smykový modul | 870 MPa |
| Poissonova konstanta | 0,37 |

Poissonova konstanta - označuje poměr relativního prodloužení tyče k jejímu relativnímu příčnému zkrácení – zúžení při namáhání tahem.

Modul pružnosti ve smyku - je jedna z materiálových vlastností popisující poměr mezi smykovým napětím a jím způsobenou deformací

Youngův modul pružnosti - materiálová konstanta.

Makrolon a Lexan jsou polykarbonáty, polykarbonáty se vyrábí polykondenzací s fosgenem podle schématu (Obr. 18)



Obr. 17 : Zjednodušené schéma polykarbonátu

Polykondenzace je společně s polyadící jeden z typů stupňovité polymerace (reakce syntetických makromolekulárních látek)

7.2 Výroba vzorků

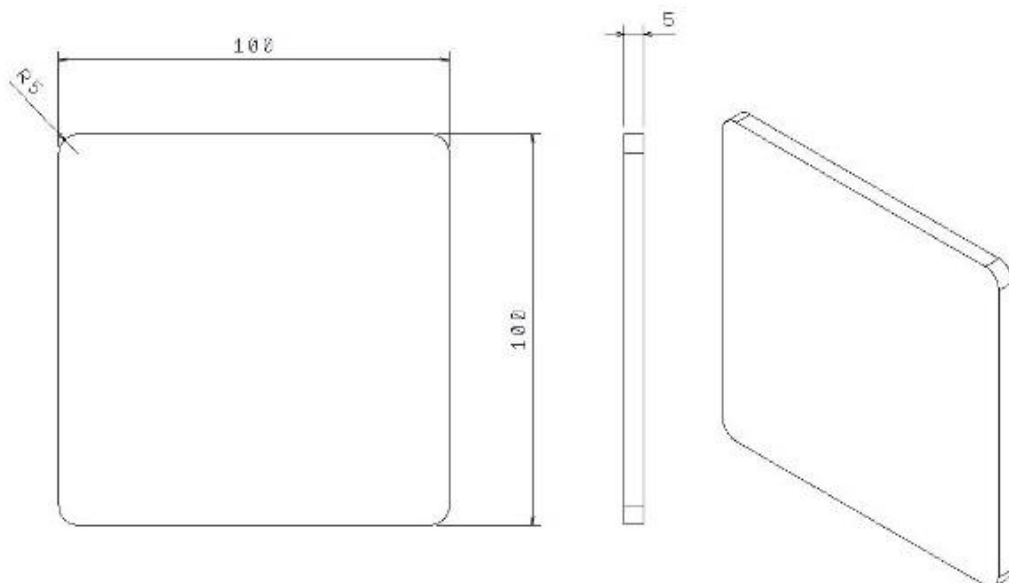
Zkušební tělesa, u kterých byly zkoušeny mechanické vlastnosti lakovaného povrchu jsou vyrobeny z Makrolonu a Lexanu, jejich výroba byla provedena na vstřikovacím stroji ARBURG 420C Allrounder Advance za vstřikovacích teplot 80°C, 100°C, 120°C, vstřikovací stroj je vybaven řídicím systémem Selogica. Vzorky byly pak následně lakovány. Parametry vstřikování byly zvoleny dle doporučení výrobce materiálu.



Obr. 18 : ARBURG 420C Allrounder Advance

7.3 Volba a rozměry zkušební vzorků

V praktické části bylo použito sedm různě lakovaných polymerních destiček přesněji řečeno destiček z polykarbonátu. Jedná se o polykarbonáty Lexan a Makrolon. Rozměry destiček jsou 100x100x5 mm.



Obr. 19 : Rozměry a tvar zkušební tělesa

8 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI

Měření mikrotvrdomosti metodou DSI probíhalo na mikrotvrdoměru od společnosti CMS Instruments. V průběhu experimentu bylo jako vnikací tělísko (indentor) použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° (Vickersův indentor). Veškeré měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 14577-1. Tento tvrdoměr lze využít na mnoho způsobů měření, disponuje velkou řadou přídatných modulů a to zejména námi použitá zkouška DSI indentační zkouška dále vrypové zkoušky, tribometr, scan.



Obr. 20 : CMS Micro-Combi Tester

8.1 Vyhodnocení naměřených hodnot

Naměřené hodnoty byly pro jednotlivé zatížení matematicky a graficky vyhodnoceny, jejich průměrné hodnoty a chyby byly vyneseny do grafů a jejich nejmenší a nejvyšší hodnoty slovně popsány a barevně vyznačeny. Směrodatná odchylka pak zobrazuje již zmíněné chyby měření.

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8.1)$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8.2)$$

Střední kvadratická chyba aritmetického průměru:

$$\delta = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (8.3)$$

kde: n - počet naměřených hodnot

x_i - naměřená hodnota – aritmetický průměr

\bar{x} – aritmetický průměr

s – směrodatná odchylka

8.2 Měřené materiálové parametry a parametry zkoušky

Zkouška tvrdosti DSI neboli instrumentovaná zkouška tvrdosti, která proběhla na mikrotvrdoměru Micro-Combi Tester od firmy CMS Instrments umí vyhodnotit mnoho parametrů, zde budeme vyhodnocovat parametry uvedené v tabulce (Tab. 6). V následující tabulce byly uvedeny hodnoty parametrů zkoušky, zejména aplikované zatížení, Rychlost odlehčení a zatížení, dobu zatížení a Poissonovo číslo (Tab. 7).

Tab. 6 : Měřené materiálové parametry

| Vyhodnocované parametry | |
|-----------------------------|----------------|
| Vtisková tvrdost | H_{IT} [Mpa] |
| Vtiskový modul pružnosti | E_{IT} [Gpa] |
| Vtiskové tečení (Creep) | C_{IT} [%] |
| Elastická deformační práce | W_e [pJ] |
| Plastická deformační práce | W_p [pJ] |
| Koeficient zpětné deformace | n_{it} [%] |

Tab. 7 : Vlastnosti použitých materiálů

| Parametry zkoušky | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Aplikované zatížení | 0,5 N | 1 N | 5 N |
| Rychlost odlehčení a zatížení | 1 N.min ⁻¹ | 2 N.min ⁻¹ | 10 N.min ⁻¹ |
| Doba zatížení | 90 s | | |
| Poissonovo číslo | 0,3 | | |

9 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

Získané hodnoty instrumentované zkoušky DSI byly vyhodnoceny v souladu s normou ISO 14577. Byly vyhodnoceny vybrané vlastnosti DSI zkoušky uvedené v kapitole 7.2.

- H_{IT} – Vtisková tvrdost
- E_{IT} – Vtiskový modul pružnosti
- C_{IT} – Vtiskové tečení (Creep)
- W_{elast} – Elastická deformační práce
- W_{plast} – Plastická deformační práce
- n_{IT} – Koeficient zpětné deformace

9.1 Znázornění naměřených vtiskových hodnot v grafu

Naměřené hodnoty jsou seřazeny v pořadí, které je uvedené v tabulce (Tab. 8). Hodnoty jsou dále porovnány mezi sebou v grafech při jednotlivých zatížení. Vzorky č. 1, 3, 5 jsou etalony. U každého laku a zatížení bylo provedeno deset měření za podmínek opakovatelnosti, ze kterých byl vypočten průměr a směrodatná odchylka, tyto hodnoty byly vyznačeny v grafech.

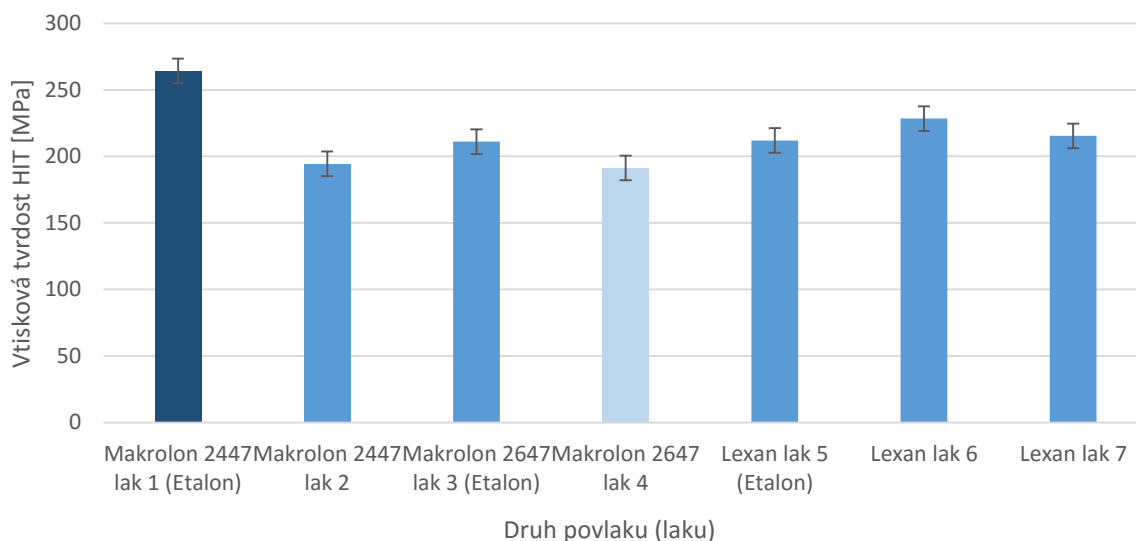
Tab. 8 : Pořadí zkoušených lakovaných polykarbonátů

| Polykarbonát + lak | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|------------------|
| Vzorek č. 1 | Vzorek č. 2 | Vzorek č. 3 | Vzorek č. 4 | Vzorek č. 5 | Vzorek č. 6 | Vzorek č. 7 |
| Makrolon 2447 - lak 1 (Etalon) | Makrolon 2447 - lak 2 | Makrolon 2647 - lak 3 (Etalon) | Makrolon 2647 - lak 4 | Lexan - lak 5 (Etalon) | Lexan - lak 6 | Lexan - lak 7 |

9.2 Vtisková tvrdost H_{IT}

Definujeme ji jako míru odolnosti vůči trvalé deformaci nebo poškození. Míru odolnosti vůči trvalému poškození vyhodnocujeme při třech zatížení, 0,5 N, 1 N, 5N. Vtisková tvrdost je popsána v praktické části a to v kapitole 3.3.1.

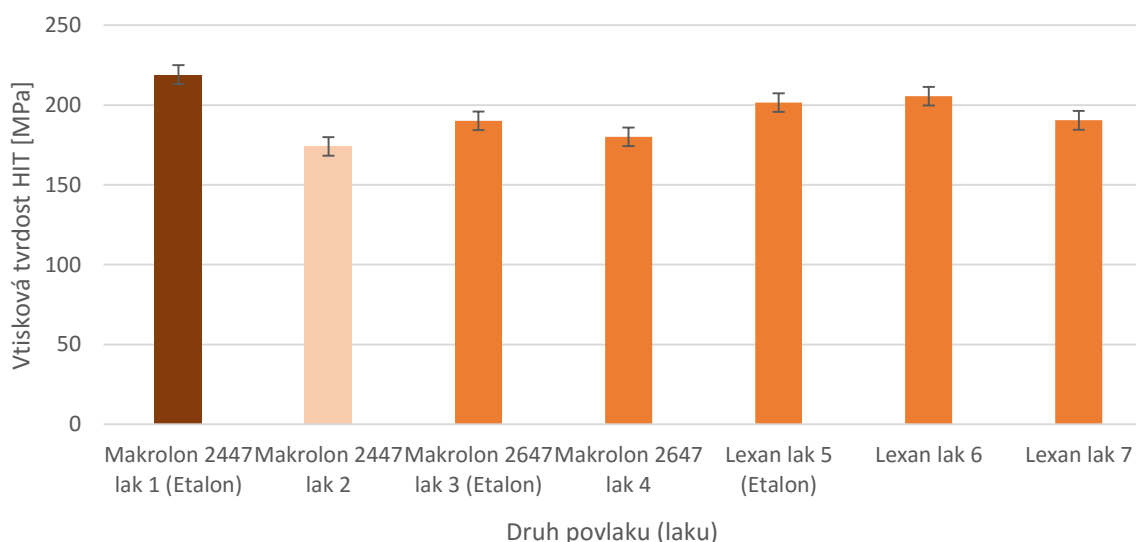
9.2.1 Zatížení indentoru 0,5 N



Obr. 21 : Vtisková tvrdost při zatížení 0,5 N

Při zatížení 0,5 N byla nejnižší vtisková tvrdost zjištěna u vzorku č. 4, Makrolonu 2647, který byl povlakován lakem 4. Nejmenší hodnota činila 191 MPa. Nejvyšší hodnota 264 MPa byla naměřena u vzorku č. 1, jedná se o Makrolonu 2447 na který byl nanesen lak 1, jednalo se etalon, výsledek je vidět na obrázku (Obr. 22).

9.2.2 Zatížení indentoru 1 N

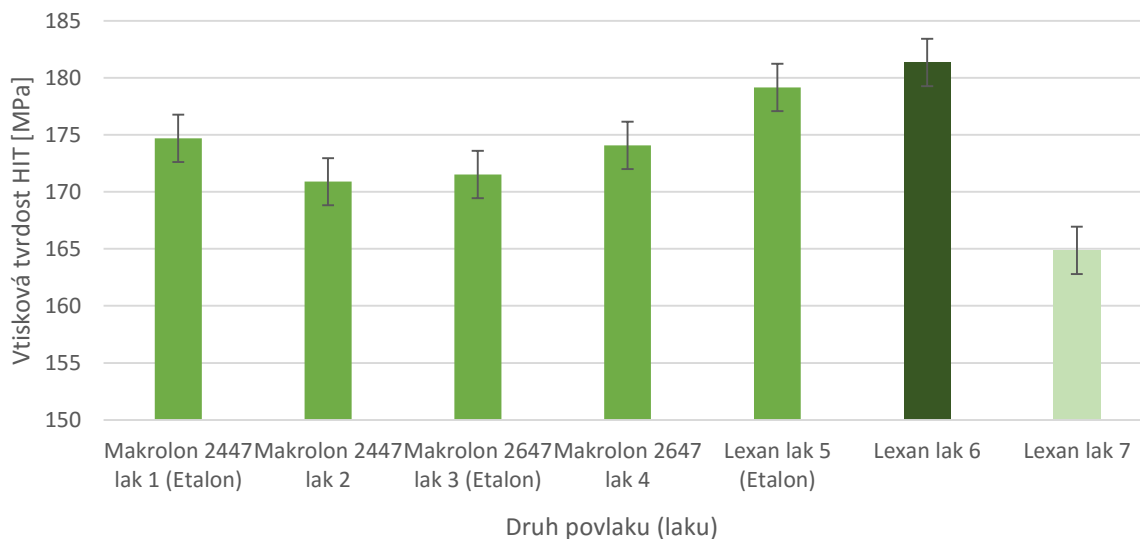


Obr. 22 : Vtisková tvrdost při zatížení 1 N

Při zatížení indentoru 1 N byla zjištěna největší vtisková tvrdost taktéž u etalonu vzorku č. 1 a to u Makrolonu 2447 s povlakem 1. Největší hodnota byla 219 MPa. Naopak

nejnižší tvrdost vyznačená světlým sloupečkem byla u vzorku č. 2. což je Makrolon 2447 s lakem 2 a jeho hodnota je 174 MPa jak je vidět na obrázku (Obr. 23).

9.2.3 Zatížení indentoru 5 N



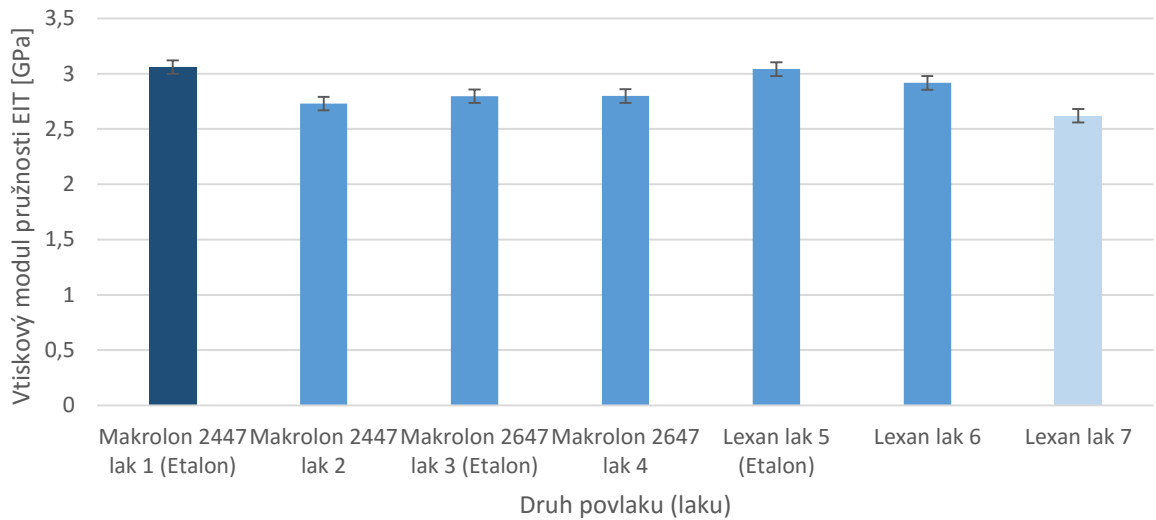
Obr. 23 : Vtisková tvrdost při zatížení 5 N

Při největším zkoušeném zatížení 5 N byla nejvyšší hodnota tvrdosti naměřena u vzorku č. 6, což je Lexan s povlakem 6. Jeho hodnota 181 MPa. Nejnižší hodnota tvrdosti v tomto zatížení byla naměřena u vzorku č. 7, přesněji u Lexanu s povlakem 7. Hodnota nejnižší tvrdosti je 164 MPa. Výsledky se zatížením indentoru 5 N jsou na obrázku (Obr. 24).

9.3 Vtiskový modul pružnosti E_{IT}

Vtiskový modul je vyjádřen jako směrnice tečny odtěžující křivky, hodnoty modulu by měli následně odpovídat Youngověmu modulu. Vyhodnocujeme jej opět pro 3 zatížení, které jsou 0,5 N, 1 N, 5 N. U vtiskového modulu mohou nastat dvě nepřesnosti a to při penetraci zkušebního tělesa kde dojde k nahromadění materiálu pod hrotem, tento jen se nazývá „pile up“. Druhá chyba může nastat, že pod hrotem vznikne propadlina, tento jen nazýváme „skin-in“. Podrobněji je vtisková tvrdost popsána v kapitole 3.3.2.

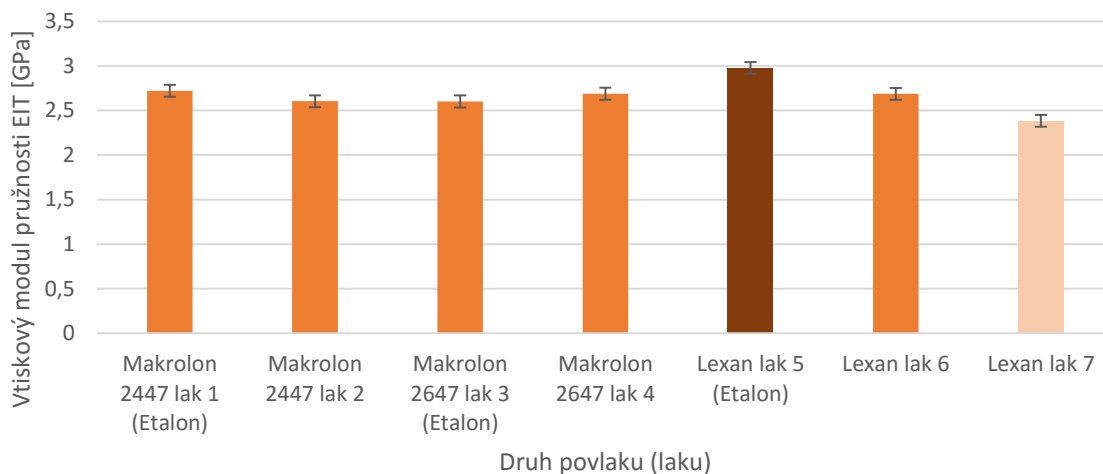
9.3.1 Zatížení indentoru 0,5 N



Obr. 24 : Vtiskový modul pružnosti při zatížení 0,5 N

Vtiskový modul pružnosti (tuhost) při nejnižším zatížení indentoru má hodnoty u všech povlakovaných polykarbonátů podobné, avšak nepatrné rozdíly tu jsou. Nejvyšší vtiskový modul s hodnotou 3,05 GPa byl zjištěn u etalonu u vzorku č. 1 tedy u Makrolonu 2447 s lakem 1. Zkušební vzorek má podobné vtiskové vlastnosti jako vzorek č. 5, což je taktéž etalon, ale jedná se o Lexan povlakovaný lakem 5, hodnota se liší opravdu nepatrně. Nejnižší vtiskový modul pružnosti má naopak vzorek poslední č. 7, jedná se o Lexan, který je povlakovaný lakem 7. Jeho hodnota modulu pružnosti je 2,61 GPa. Zbylé výsledné hodnoty jsou znázorněny v obrázku (Obr. 25).

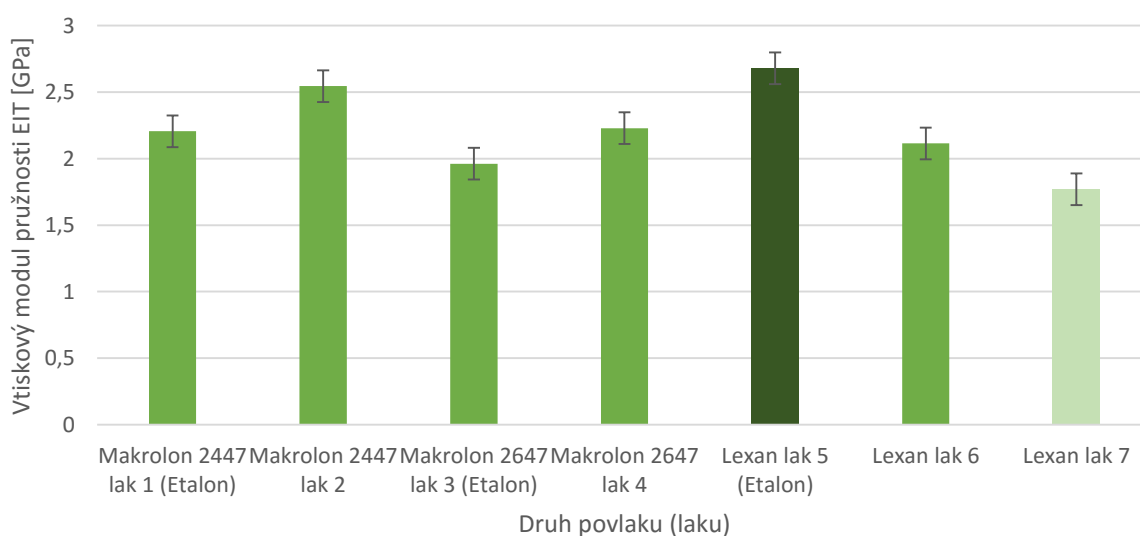
9.3.2 Zatížení indentoru 1 N



Obr. 25 : Vtiskový modul pružnosti při zatížení 1 N

Při zatížení silou 1 N byly výsledné hodnoty opět podobné. U vzorku č. 5 byla hodnota podobná jako u předchozího zatížení 0,5 N (3,04 GPa) v předchozím obrázku (Obr. 25), v tomto případě zatížení se jedná o nejvyšší hodnotu tuhosti. Nejvyšší hodnota dosahuje 2,97 GPa opět u etalonu. Nejnižší hodnota byla zjištěna taktéž jako u předchozího zatížení u posledního vzorku č. 7, kterým je Lexan s povlakem 7, jeho hodnota je 2,61 GPa. Hodnoty modulu pružnosti můžete porovnat na obrázku (Obr. 26).

9.3.3 Zatížení indentoru 5 N



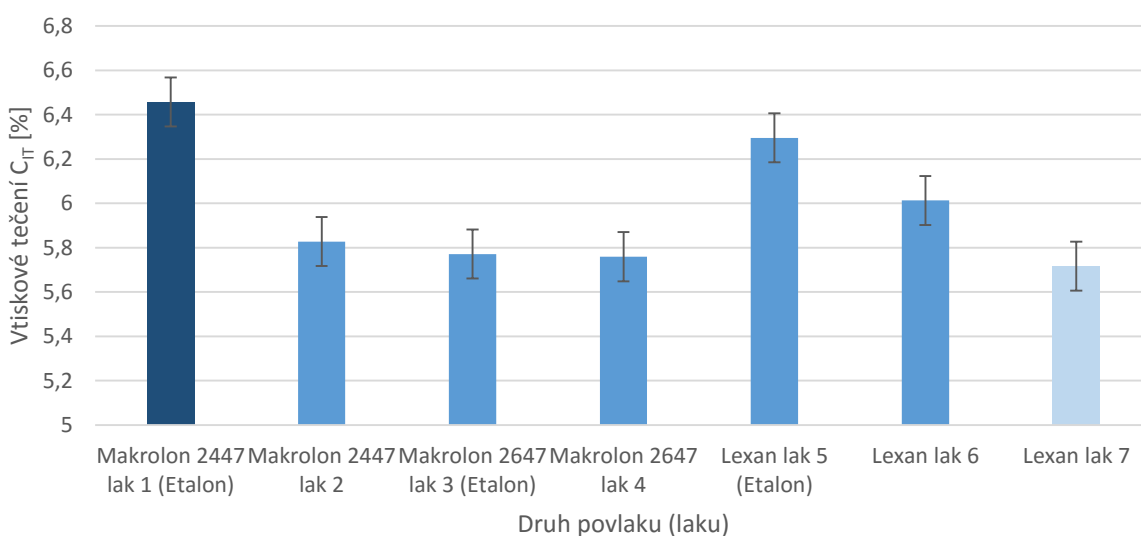
Obr. 26 : Vtiskový modul pružnosti při zatížení 5 N

U zatížení indentoru 5 N je vidět, že největší vtiskovou tvrdost má opět vzorek č. 5. a nejmenší tvrdost má taktéž jako v předchozím zatížení vzorek č. 7. (Obr. 26). Hodnoty tvrdosti se nepatrně liší od předchozího zatížení 1 N. Vzorek s největší tvrdostí je etalon Lexan s povlakem 5, je to 5. vzorek s hodnotou 2,68 GPa. Poslední zkoušený vzorek Lexan s povlakem 7 má nejnižší hodnotu tvrdosti, jeho hodnota je 1,77 GPa. Na obrázku (Obr. 27) jsou vidět výsledky ostatních vzorků při zatížení 5 N.

9.4 Vtiskové tečení (Creep) C_{IT}

Vtiskové tečení definujeme jako relativní změnu hloubky vtisku, značíme jej C_{IT} a vyjadřuje se v procentech. Opět určujeme vtiskové tečení u třech zatížení jako v předchozích parametrech. Parametr vtiskové tečení je popsán podrobněji v teoretické části v kapitole 3.3.3.

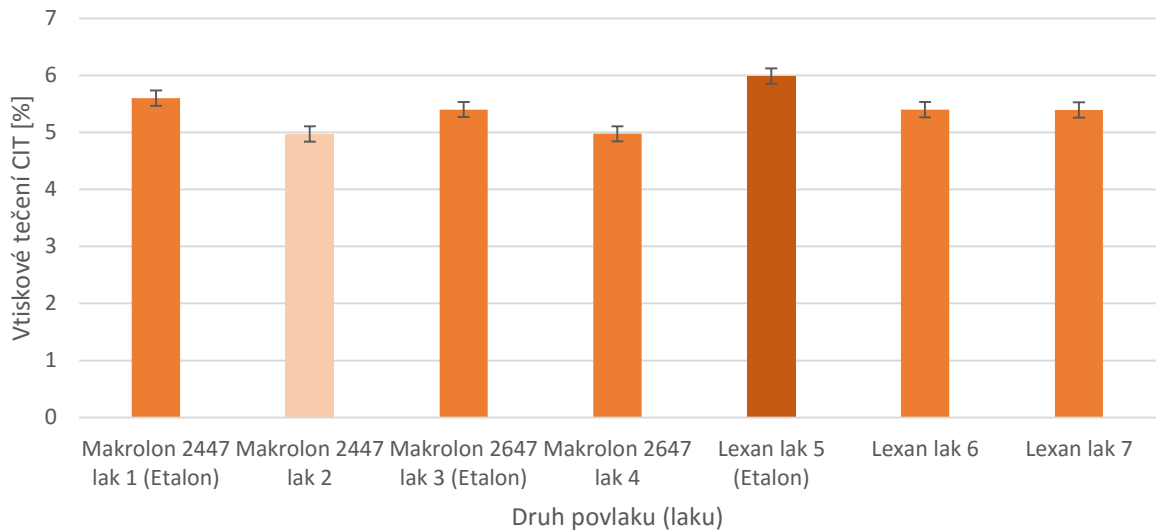
9.4.1 Zatížení indentoru 0,5 N



Obr. 27 : Vtiskové tečení (Creep) při zatížení 0,5 N

Z obrázku (Obr. 28) je patrné, že při zkoušce parametru vtiskového tečení byla nejvyšší hodnota zjištěna u vzorku č. 1, hodnota byla 6,45 %, jedná se o vzorek z Makrolonu 2447 s povlakem 1 tedy etalon. Naopak nejnižší hodnota byla zjištěna u posledního vzorku č. 7, jedná se o Lexan s povlakem 7, u kterého byla zjištěna hodnota 5,71 %.

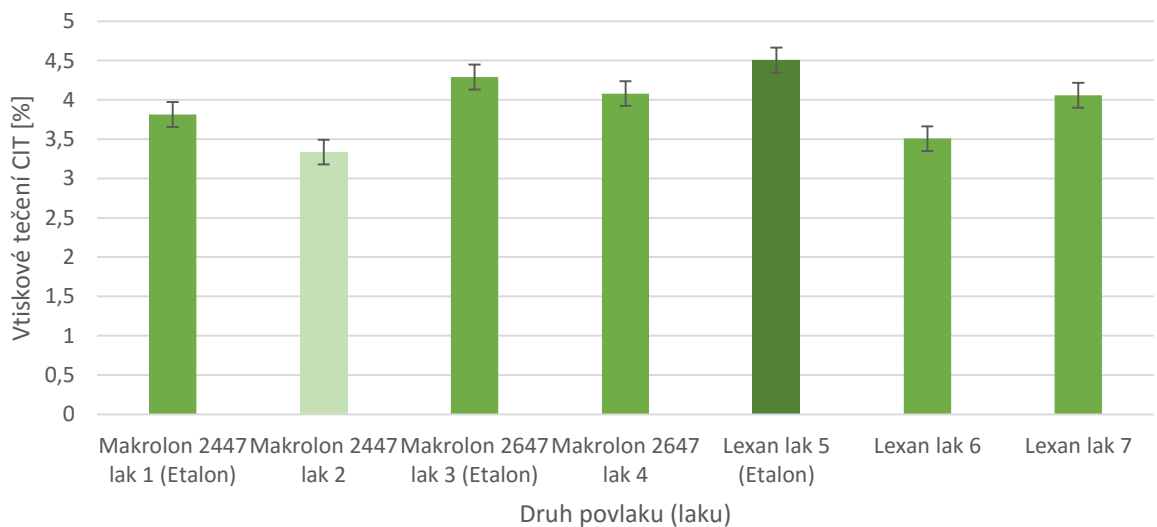
9.4.2 Zatížení indentoru 1 N



Obr. 28 : Vtiskové tečení (Creep) při zatížení 1 N

Vyhodnocení výsledků vtiskového tečení při zatížení 1 N ukázalo, že nejvyšší hodnota dosahovala u vzorku č. 5 s hodnotou 5,98 %. Jedná se o etalon Lexanu jehož povrch je upravený lakem 6. Nejnižší hodnota vtiskového tečení byla vyhodnocena u vzorku č. 2 (4,97 %) jednalo se o Makrolon 2447 s lakem 2. Z obrázku (Obr. 29) lze vyčíst, že vzorek č. 4 má nepatrně vyšší hodnotu než vzorek s nejnižší vtiskovou tvrdostí. Hodnota vzorku č. 4 je 4,97 %.

9.4.3 Zatížení indentoru 5 N



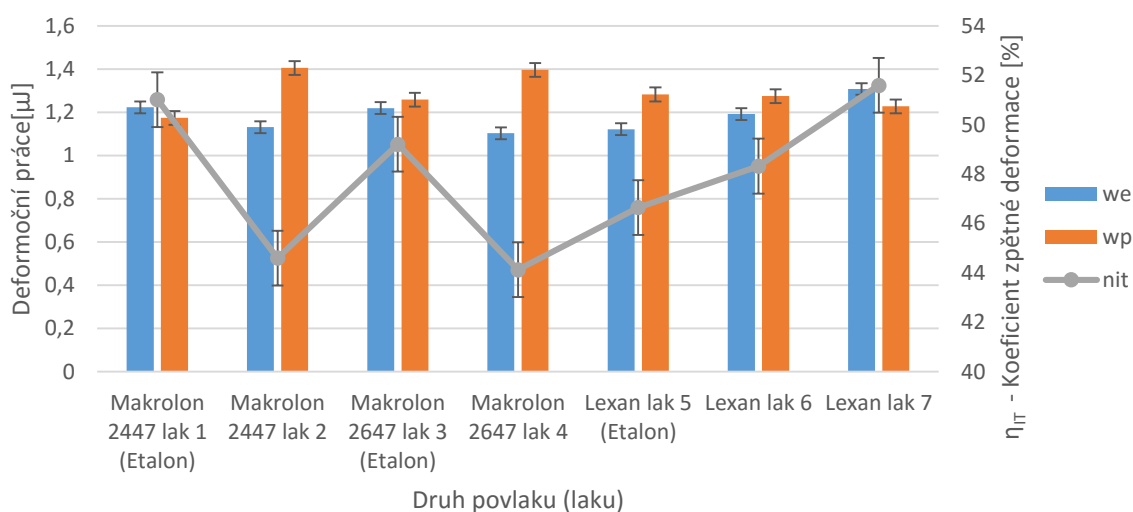
Obr. 29 : Vtiskové tečení (Creep) při zatížení 5 N

Při největším zatížení bylo nejvyšší vtiskové tečení zjištěno u vzorku č. 5, kterým byl etalon Lexanu s lakem 5, v tomto případě byla naměřena hodnota 4,51 %. Nejnižší hodnota vtiskového tečení byla vyhodnocena indentační zkouškou u vzorku č. 2, což byl Makrolon 2447 povlakován lakem 2. Jak je vidět na obrázku (Obr. 29 a 30) nejvyšší i nejnižší hodnoty byly u stejných vzorků.

9.5 Deformační práce

Deformační práce je u mikrotvrdosti jeden z důležitějších parametrů, skládá se ze dvou částí. V první části jde o elastickou deformaci dále značenou W_e , která je reakcí na zatížení s vratnou deformací. Ve druhé části se jedná o plastickou deformaci, která je definována jako odolnost proti vzniku plastické deformaci. Deformační práce je rozepsaná v teoretické části v kapitole 3.3.4.

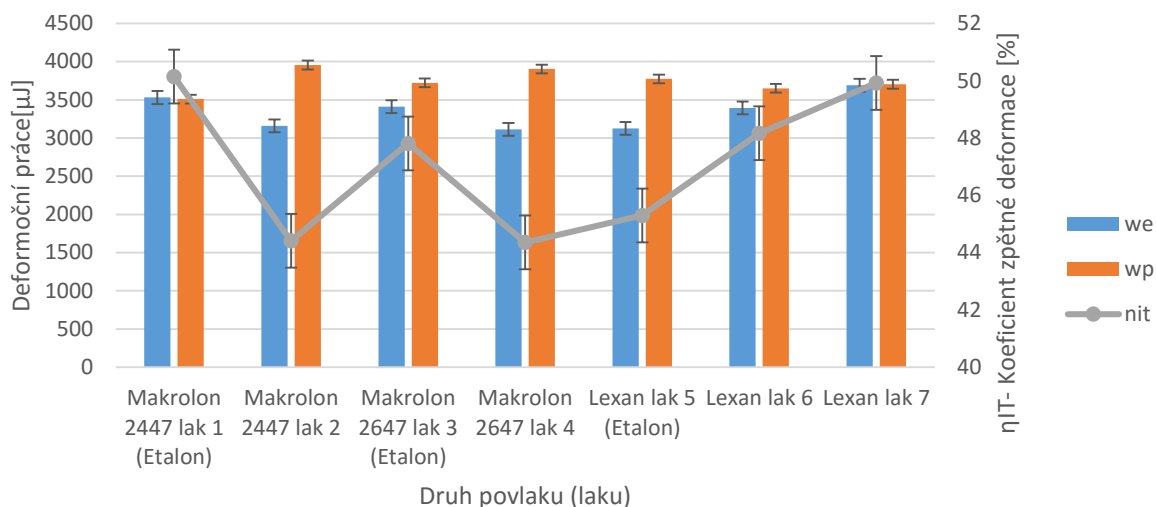
9.5.1 Zatížení indentoru 0,5 N



Obr. 30 : Deformační práce při zatížení 0,5 N

U zatížení 0,5 N je patrné, že koeficient zpětné deformace n_{IT} byl nevyšší u etalonu vzorku č. 1 (51,01%) a vzorku č. 7 (51,59 %) kde byla plastická a elastická deformace téměř stejná s nepatrnými rozdíly (Obr. 31). Nejnižší koeficient zpětné deformace byl naměřen u vzorku č. 2 (44,6 %) a č. 4 (44,13%). Porovnáním s obrázkem vtiskové tvrdosti (Obr. 22) je patrné, že při poklesu W_e a W_p se zvyšuje tvrdost. Nejvyšší hodnota elastické deformace byla dosažena u sedmého vzorku č. 7) Lexanu s lakem 7. Jeho hodnota byla 1,308 μJ . Nejnižší hodnotu elastické deformace měl vzorek č. 4, Makrolon 2647 s povlakem 4 (1,103 μJ).

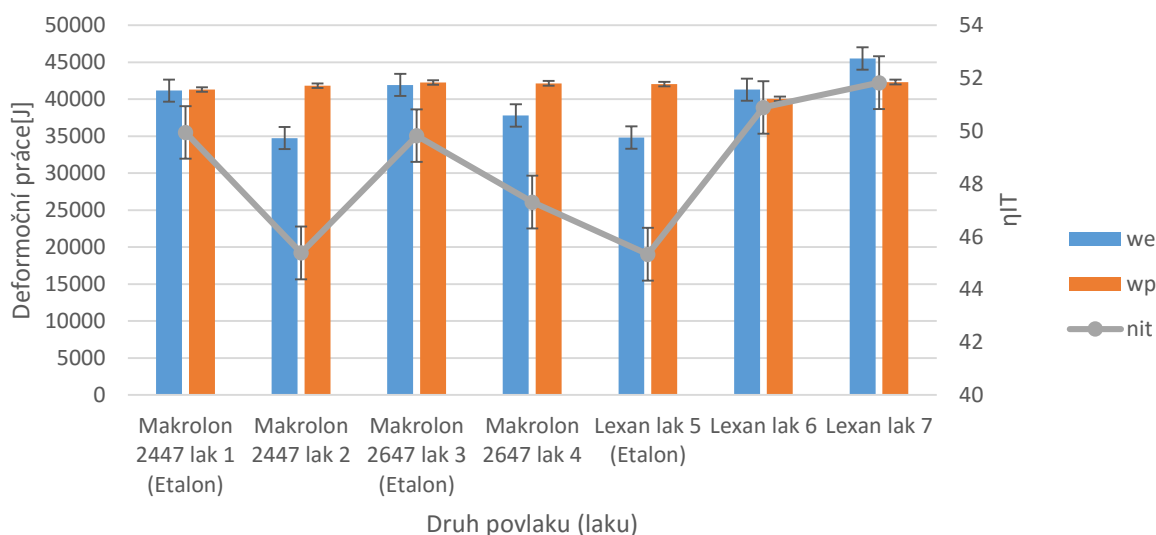
9.5.2 Zatížení indentoru 1 N



Obr. 31 : Deformační práce při zatížení 1N

Průběh křivky zpětné deformace η_{IT} byl u většího zatížení 1 N a byl podobný jako u zatížení 0,5 N. Nejvyšší i nejnižší hodnoty byly podobné. Stejně jako i u předchozího zatížení se tvrdost zvyšovala se snižováním W_p a W_e . Nejvyšší koeficient zpětné deformace byl naměřen u prvního a posledního vzorku jak je vidět na obrázku (Obr. 32).

9.5.3 Zatížení indentoru 5 N



Obr. 32 : Deformační práce při zatížení 5 N

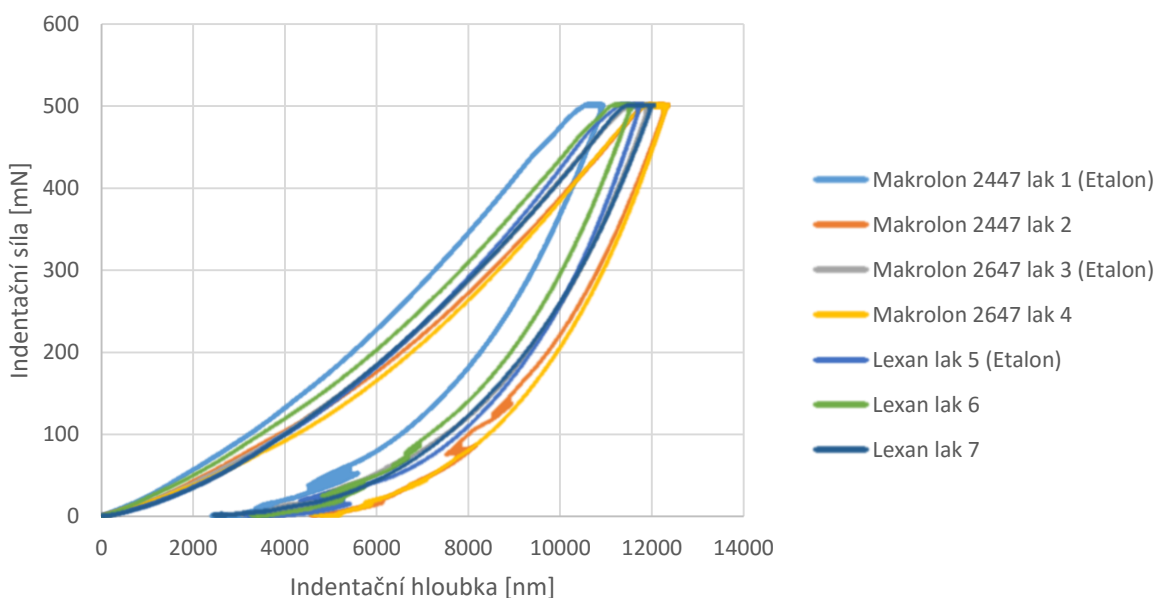
Při největším zatížení 5 N jsou rozdíly větší. Zpětná deformace byla nejvyšší u Lexanu s lakem 7 což je poslední vzorek č. 7 (51,83 %). Nejmenší koeficient η_{IT} , byl zjištěn u vzorku

č. 2 a 5, hodnoty byly podobné 45,33 %. Hodnoty ostatních vzorků lze vyčíst z obrázku (Obr. 33).

9.6 Indentační křivky

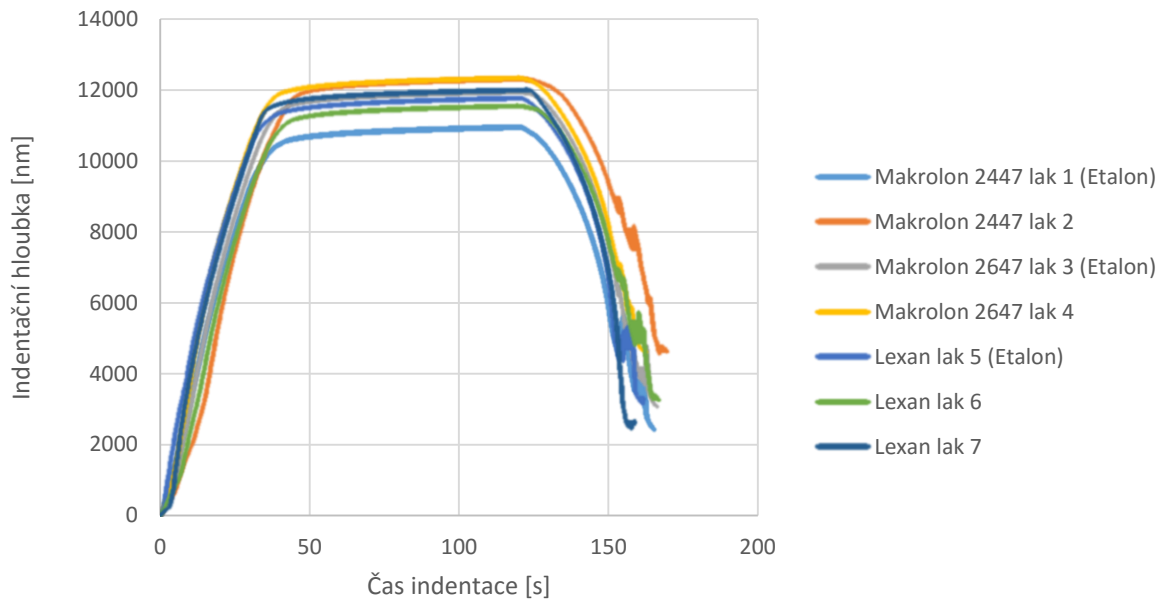
Jsou to křivky, které znázorňují závislost indentační síly na indentační hloubce a indentační hloubku na čase indentace. Při metodě DSI - Instrumentovaná zkouška tvrdosti nám tyto křivky zobrazují hlavní výstupní hodnoty zkoušky. Jsou vyobrazeny v grafech a pro přehled byly rozděleny do skupin podle jednotlivých laků při jednotlivých zatížení.

9.6.1 Zatížení indentoru 0,5 N



Obr. 33 : Závislost indentační síly na indentační hloubce při zatížení 0,5 N

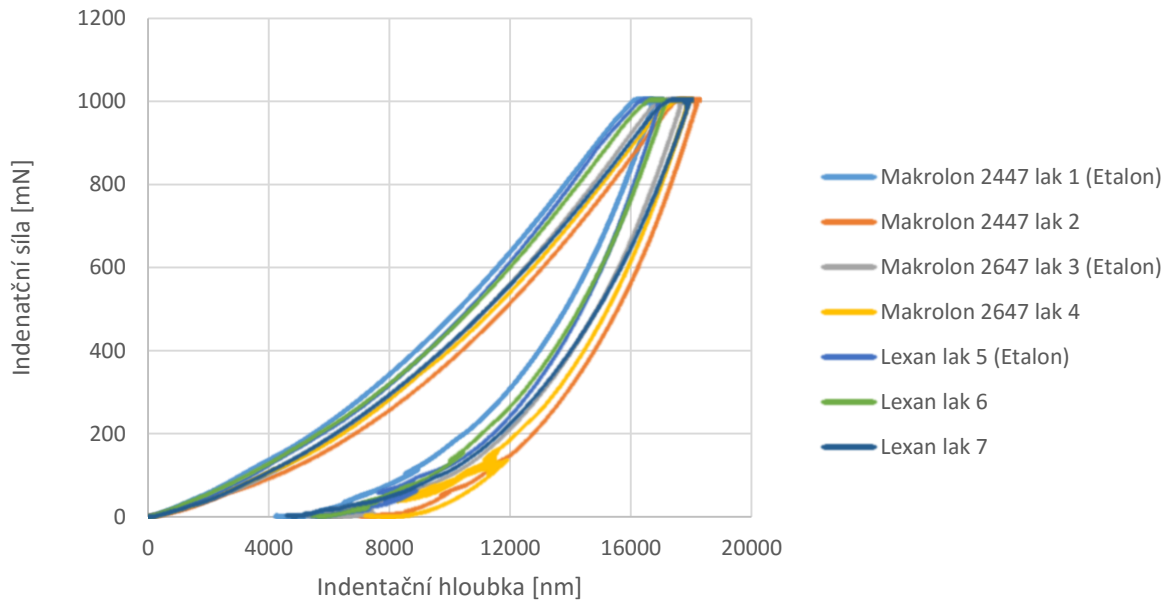
Výsledné hodnoty byly stanoveny metodou DSI. Indentační křivky nám ukázaly totožný výsledek jako u zkoušky tvrdosti H_{IT} . V obrázcích (Obr. 34 a 22) byly hodnoty takové, že nejvyšší tvrdost má vzorek Makrolon 2447 s lakem 1. A nejnižší tvrdost zase u Makrolonu 2647 s lakem 4. Rozdíl indentační hloubky mezi nejtvrdším lakem a nejměkčím byl při zatížení 0,5 N 1436 nm.



Obr. 34 : Závislost indentační hloubky na indentačním čase při zatížení 0,5 N

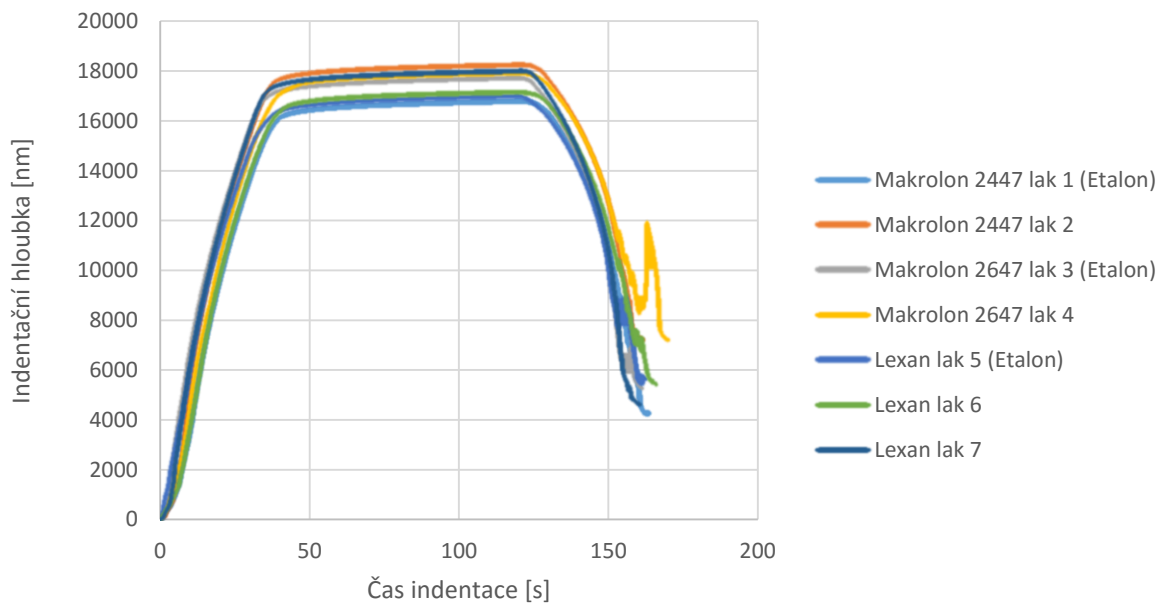
Na obrázku je možno vidět jak se mění indentační hloubka na čase indentace, největší zjištěný rozdíl hloubek v určitém čase byl zjištěn mezi prvním a druhým vzorkem (Obr. 35). Tedy nejnižší hodnota vtiskového tečení u vzorku č. 1 (Makrolon 2447 s povlakem 1) byla 10855 nm a nejvyšší hodnota Creepu byla naměřena vzorku č. 2 (Makrolon 2447 s lakem 2), jeho hodnota činila 12269 nm. Rozdíl indentačních hloubek v čase mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou vtisku byl při nejnižším zatížení 1414 nm.

9.6.2 Zatížení indentoru 1 N



Obr. 35 : Závislost indentační síly na indentační hloubce 1 N

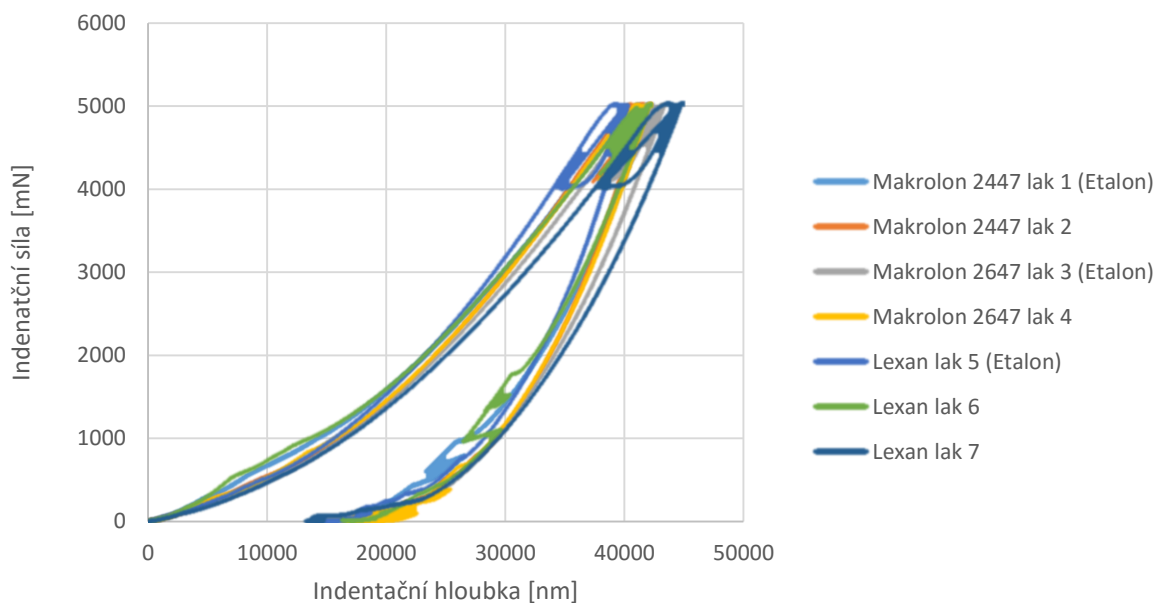
Při větším zatížení 1 N hodnoty nebyly tak odlišné, jako tomu bylo u nejnižšího zatížení indentoru. Indentační křivky u metody DSI opět odpovídají hodnotám naměřeným u vtiskové tvrdosti H_{IT} , jako tomu bylo i u předchozího zatížení (Obr. 34). Nejvyšší i nejnižší vtisková tvrdost byla zjištěna u stejných vzorků jako v předešlém zatížení. Vzorek č. 1 Makrolon 2447 s lakem 1 s nejvyšší hodnotou (16770 nm) tvrdosti a s nejmenší hodnotou tvrdosti tudíž nejhlubší vryp měl vzorek č. 4 Makrolon 2647 s lakem 4 (17920 nm). Rozdíl hloubek činil 1150 nm.



Obr. 36 : Závislost indentační hloubky na indentačním čase při zatížení 1 N

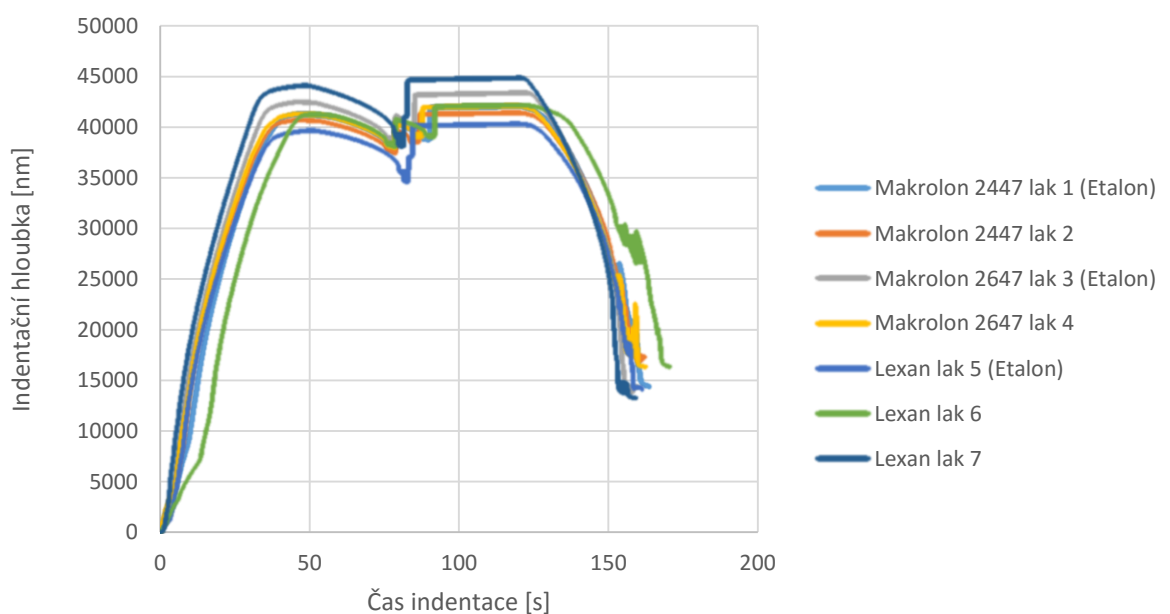
Při porovnání většího zatížení 1 N s nižším 0,5 N je patrné, že výsledné hodnoty se liší pouze v hloubce vtisku. Nejtvrďší první vzorek i nejměkčí druhý vzorky zůstávají stejné. Hodnota Creepu (Obr. 29) koresponduje s touto indentační křivkou (Obr. 37). Rozdíl hloubky indentace činil 1294 nm.

9.6.3 Zatížení indentoru 5 N



Obr. 37 : Závislost indenační síly na indentační hloubce 5 N

Při největším zatížení vznikaly chyby měření, proto nám graf vyobrazil i odlehle hodnoty (Obr. 38). Výsledky metody DSI vyšly zcela odlišně od předchozích zatížení, při největším zatížení 5 N byl indentor vtisknut nejhluběji do vzorku č. 7 což je Lexan s povlakem 7. Indentor se zastavil v hloubce 44760 nm, tudíž jeho tvrdost je nejmenší. Naopak největší vtiskovou tvrdost má vzorek č. 5, jedná se o Lexan s povlak 5. Bylo zjištěno, že hloubka vtisku u pátého vzorku byla 40293 nm. Rozdíl hloubek nejtvrdsího a nejměkčího vzorku byl 4467 nm.



Obr. 38 : Závislost indentační hloubky na indentačním čase při zatížení 5 N

Při největším zatížení 5 N je patrné, že lak 1 vzorku č. 1, který byl v předchozích zatížení nejtvrdsí při největším zatížení neobstál. Nejtvrdsím vzorkem je Lexan s lakem 5 (40227 nm). Nejměkčím lakem již také není vzorek č. 2, nýbrž poslední vzorek č. 7, lak 7 nanesený na Lexan (44641 nm). Hodnoty korespondují s výsledky měření tvrdosti při stejném zatížení (Obr. 24). Rozdíl indentace nejměkčího a nejtvrdsího vzorku byl 4414 nm.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo měření mikrotvrdomosti povlakovaných povrchů tří PC – Polykarbonátů. Jednotlivé povlaky byly porovnávány mezi sebou. U každého PC byl jeden lak etalon. V teoretické části byly definovány mechanické vlastnosti, popsány a vysvětleny metody měření tvrdosti a jaké výhody nám povlakování přináší z pohledu mechanických vlastností. V praktické části byly naměřeny a vyhodnoceny jednotlivé parametry zkoušky mikrotvrdomosti. Hodnoty byly získány metodou DSI Instrumentovaná zkouška tvrdosti – Depth Sensing Indentation. Jedná se o parametry jako je vtisková tvrdost, vtiskový modul pružnosti, vtiskové tečení a deformační práce. Měření probíhalo na 7 povlacích, 2 povlaky byly nanášeny na Makrolonu 2447, 2 na Makrolonu 2647 a zbylé 3 na Lexanu LS1.

První měřený parametr mikrotvrdomosti byla vtisková tvrdost H_{IT} , kde bylo zjištěno, že při zatížení 0,5 N a 1 N bylo dosaženo podobných výsledků u jednotlivých vzorků, největší tvrdost měly etalony. Etalony byly v průměru o 5,2 % tvrdší než druhé vzorky. Při největším zatížení 5 N se výsledky tvrdosti oproti předchozímu zatížení u jednotlivých vzorků podstatně změnil, nejtvrďší hodnoty nebyly zjištěny u etalonů. Největší vtiskovou tvrdost měl v průměru lak 1 (etalon) nanášený na Makrolonu 2447. Naopak nejnižších hodnot dosahoval Makrolon 2447 s povlakem 2 spolu a Makrolonem 2647 s povlakem 4. Průměrný pokles tvrdosti mezi nejtvrďším a nejměkčím lakem byl 18 %.

Při druhém zjišťovaném parametru což byl vtiskový modul pružnosti E_{IT} , který udává tuhost testovaného povrchu. Bylo zjištěno, že výsledky byly opět u prvních dvou zatížení 0,5 N a 1 N podobné. Nepatrné rozdíly se objevily u největšího zatížení. Největší pokles modulu pružnosti byl vyzorován u laku 7, který byl nanášen na Lexan LS1. Nejvyšší pokles se v průměru pohyboval o 19,8 %. Etalony měly vtiskový modul pružnosti v průměru o 7,1 % vyšší než vzorky se stejným lakem.

Dále se zjišťovalo vtiskové tečení neboli Creep. Nejvyšší i nejnižší hodnoty opět dopadají na stejné laky jako v doposud vyhodnocených parametrech. Největší % hodnotu Creepu má lak 4 nanášený na Makrolon 2647 společně s Makrolonem 2447 povlakovaný lakem 1, nejnižší průměrnou hodnotu Creepu má opět lak 2 na Makrolonu 2447. Průměrný rozdíl vtiskového tečení mezi Nejvyšší a nejnižší hodnotou činil 16 %. Procentuálně měly etalony o 9,3 % vyšší vtiskové tečení.

Deformační práce a její koeficient s plastickou částí rostl úměrně s tvrdostí jednotlivého laku. Na nejodolnější laky měla deformační práce a její plastická část opačný vliv.

Z naměřených hodnot, které jsem získal instrumentovanou zkouškou tvrdosti neboli zkouškou DSI jsem následně matematicky vyhodnotil a v grafech znázornil jednotlivé parametry. Z vyhodnocených parametrů jsem určil, že etalonové vzorky, tedy vzorky č. 1, 3, 5 mají v průměru nejlepší mechanické vlastnosti, ke kterým jsou pak v grafu přirovnány ostatní vzorky. Z porovnávání jednotlivých laků mezi sebou jsem vyhodnotil, že lak č. 1 nanesený na PC - polykarbonát Marklon 2447 má nejlepší mechanické vlastnosti ze zkoumaných vzorků. Naopak nejméně mechanicky schopný byl vyhodnocen lak č. 2 taktéž nanesený na Makrolon 2447. Hodnoty byly velice těsné, proto je byla potřeba matematicky a graficky vyhodnotit. Povlaky velice kladně zlepšují mechanické vlastnosti povrchu a to jak u Makrolonu 2447, 2647 tak i Lexanu. V tabulce lze vidět procentuální rozdíly jednotlivých parametrů mezi etalony a náhodně vybranými stejnými laky.

Tab. 9 : Rozdíl etalonových vzorků u jednotlivých parametrů v %

| Porovnání rozdílů etalonových vzorků [%] | | | |
|--|---------------|---------------|-----------|
| Parametry | Makrolon 2447 | Makrolon 2647 | Lexan LS1 |
| H_{IT} | 16,40 | 4,38 | 0,13 |
| E_{IT} | -0,12 | -5,68 | 17,10 |
| C_{IT} | 11,16 | 4,33 | 10,93 |
| n_{IT} | 11,05 | 7,53 | -9,56 |
| W_{elast} | 11,19 | 9,37 | -16,48 |
| W_{plast} | -11,22 | -5,19 | 2,35 |

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Mechanické vlastnosti materiálů, [online]. [cit. 2016-2-3]. Dostupné z: http://www.spstjbc.cz/spst_files/projekty/vyuka_v_cizim_jazyce/moduly/modul%20stt/de/sttn1_mechanicke%20vlastnosti%20materialu.pdf
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 8070806176.
- [3] JAKEŠ, Tomáš. Vliv beta záření na mechanické vlastnosti vybraných typů PC. Zlín, 2015, 77s. Diplomová práce. UTB
- [4] PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu I, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 505 s
- [5] OVSIK, Martin. Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů. Zlín, 2013. 196 s. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. [
- [6] Mechanické zkoušky kovů, [online]. [cit. 2016-3-8]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm
- [7] Polymery, Termoplasty, [online]. [cit. 2016-4-10]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [8] PLASTY, [online]. [cit. 2016-4-12]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/plasty.pdf>
- [9] DUŠEK, Jiří. Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost - čisté kovy měřené metodou DSI. Brno, 2008. 171 s. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [10] MÜLLER, M., PERTRŽELKA Z.: Strojírenská technologie část I. – II. OMTO Olomouc, 2011, 125 s.
- [11] MM Průmyslové spektrum – Povlaky, [online]. [cit. 2016-5-2] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-typy-povlaku-umi-zazraky.html>
- [12] BRZOBOHATÝ, T.: Současné trendy v metodách měření tvrdosti, Brno, 2010, 32 s.
- [13] BLÁHOVÁ, O. Nanoindentační měření povrchových vrstev. Plzeň, 2007. 112 s. Habilitační práce na strojní fakultě Západočeské univerzity v Plzni.

[14] ČTVRTLÍK, R. Fyzikální vlastnosti tenkých vrstev. Olomouc, 2012. 145 s. Dizertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci.

[15] CSN EN ISO 14577-1 Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů - Část 1: Zkušební metoda, Říjen 2002. 31s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-----------|--|
| α | Úhel indentoru |
| λ | Přeměnová konstanta |
| ν_i | Poissonův poměr vnikacího tělesa |
| ν_s | Poissonův poměr |
| A | Skutečná plocha |
| C_{IT} | Vtiskové tečení |
| d | Střední průměr |
| D | Průměr kuličky |
| DSI | Instrumentovaná zkouška tvrdosti – Depth Sensing Indentation |
| E | Youngův modul |
| E_i | Modul vnikacího tělesa |
| E_{IT} | Vtiskový modul |
| E^* | Komplexní modul |
| E_r | Redukovaný modul |
| F | Zatěžující síla |
| g | Gravitační zrychlení |
| h | Hloubka vtisku |
| h_c | Hloubka indentace |
| h_{max} | Maximální indentační hloubka |
| H | Tvrдость |
| HBS | Tvrдость podle Brinella (kalení) |
| HBW | Tvrдость podle Brinella (slinutý karbid) |
| H_{IT} | Vtisková tvrдость |
| HR | Tvrдость podle Rockwella |
| HV | Tvrдость podle Vickerse |

| | |
|-------------|-----------------------------------|
| l | Délka stěny úhlopříčky vtisku |
| LS | Lexan |
| n_{it} | Koeficient zpětné deformace |
| PC | Polykarbonát |
| W_{elast} | Deformační práce – elastická část |
| W_{plast} | Deformační práce – plastická část |
| W_{total} | Deformační práce |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|-----------|
| <i>Obr. 1 : Makromolekuly – schématické znázornění.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Obr. 2 : Syntéza polykarbonátu</i> | <i>14</i> |
| <i>Obr. 3 : Zkouška podle Brinella</i> | <i>17</i> |
| <i>Obr. 4 : Průběh zatížení - metoda Brinell</i> | <i>18</i> |
| <i>Obr. 5 : Zkouška podle Rockwella [5].....</i> | <i>19</i> |
| <i>Obr. 6 : Průběh zkušebního zatížení – metoda Rockwell</i> | <i>20</i> |
| <i>Obr. 7 : Zkouška podle Vickerse</i> | <i>21</i> |
| <i>Obr. 8 : Výběr úhlu Vickersova jehlan [9].....</i> | <i>22</i> |
| <i>Obr. 10 : Zkouška podle Knoop [12].....</i> | <i>23</i> |
| <i>Obr. 11 : Zkouška podle Berkoviche [12]</i> | <i>24</i> |
| <i>Obr. 12 : Indentační křivka (a), časový diagram indentační zkoušky DSI (b) [14]</i> | <i>25</i> |
| <i>Obr. 13 : Průběh zatěžování a odlehčování indentoru: a) zatížení, b) odlehčení, c)opětovné zatížení [5].....</i> | <i>26</i> |
| <i>Obr. 14 : Schéma zatěžování a odlehčování [5].....</i> | <i>27</i> |
| <i>Obr. 15 : Indentační křivka [5]</i> | <i>27</i> |
| <i>Obr. 16 : Vyjádření vtiskového tečení [5].....</i> | <i>29</i> |
| <i>Obr. 17 : Indentační křivka - deformační práce [5].....</i> | <i>30</i> |
| <i>Obr. 18 : Zjednodušené schéma polykarbonátu</i> | <i>35</i> |
| <i>Obr. 19 : ARBURG 420C Allrounder Advance</i> | <i>36</i> |
| <i>Obr. 20 : Rozměry a tvar zkušebního tělesa.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Obr. 21 : CMS Micro-Combi Tester</i> | <i>37</i> |
| <i>Obr. 22 : Vtisková tvrdost při zatížení 0,5 N</i> | <i>41</i> |
| <i>Obr. 23 : Vtisková tvrdost při zatížení 1 N</i> | <i>41</i> |
| <i>Obr. 24 : Vtisková tvrdost při zatížení 5 N</i> | <i>42</i> |
| <i>Obr. 25 : Vtiskový modul pružnosti při zatížení 0,5 N</i> | <i>43</i> |
| <i>Obr. 26 : Vtiskový modul pružnosti při zatížení 1 N</i> | <i>44</i> |
| <i>Obr. 27 : Vtiskový modul pružnosti při zatížení 5 N</i> | <i>44</i> |
| <i>Obr. 28 : Vtiskové tečení (Creep) při zatížení 0,5 N.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Obr. 29 : Vtiskové tečení (Creep) při zatížení 1 N.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Obr. 30 : Vtiskové tečení (Creep) při zatížení 5 N.....</i> | <i>46</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Obr. 31 : Deformační práce při zatížení 0,5 N.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Obr. 32 : Deformační práce při zatížení 1N.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Obr. 33 : Deformační práce při zatížení 5 N.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Obr. 34 : Závislost indentační síly na indentační hloubce při zatížení 0,5 N.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Obr. 35 : Závislost indentační hloubky na indentačním čase při zatížení 0,5 N.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Obr. 36 : Závislost indentační síly na indentační hloubce 1 N</i> | <i>51</i> |
| <i>Obr. 37 : Závislost indentační hloubky na indentačním čase při zatížení 1 N.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Obr. 38 : Závislost indentační síly na indentační hloubce 5 N</i> | <i>52</i> |
| <i>Obr. 39 : Závislost indentační hloubky na indentačním čase při zatížení 5 N.....</i> | <i>53</i> |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|-----------|
| <i>Tab. 1 : Základní rozdělení polymerů [2] [8]</i> | <i>13</i> |
| <i>Tab. 2 : Typické vlastnosti polykarbonátu (PC)</i> | <i>15</i> |
| <i>Tab. 3 : Způsob výpočtu tvrdosti podle Rockwella pro jednotlivé stupnice</i> | <i>20</i> |
| <i>Tab. 4 : Rozsah zkušebního zatížení [5]</i> | <i>21</i> |
| <i>Tab. 5 : Vlastnosti použitých materiálů</i> | <i>35</i> |
| <i>Tab. 6 : Měřené materiálové parametry</i> | <i>39</i> |
| <i>Tab. 7 : Vlastnosti použitých materiálů</i> | <i>39</i> |
| <i>Tab. 8 : Pořadí zkoušených lakovaných polykarbonátů</i> | <i>40</i> |
| <i>Tab. 9 : Rozdíl etalonových vzorků u jednotlivých parametrů v %</i> | <i>55</i> |

SEZNAM PŘÍLOH

