

Vliv procesních parametrů na mikrotvrdost polymerních materiálů

Vojtěch Nevrlka

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch NEVRLKA**
Osobní číslo: **T10303**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv procesních parametrů na mikrotvrdost
polymerních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava zkušebních těles pro experimentální část.
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:

Ing. Martin Ovsík

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

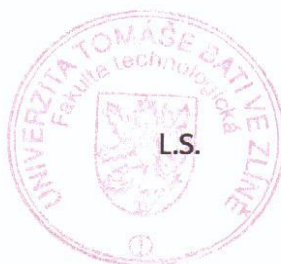
10. února 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek 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, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 5.5.2014


.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá mikrotvrdostí zkoumaného vzorku, v našem případě PP. Práce je rozdělena na dvě části, a to teoretickou a praktickou. V teoretické části jsem se věnoval základnímu rozdělení polymerů, popsání zkoušek tvrdosti, instrumentované zkoušce tvrdosti DSI a vstřikování. V praktické části byl polymer (PP) zkoumán při změnách doby chlazení, dotlaku, teploty formy a teploty taveniny při zatížení 0,5N. Vyhodnocené hodnoty byly zpracovány a jsou uvedeny v grafech.

Klíčová slova: Instrumentovaná zkouška DSI, mikrotvrdost, tvrdost, polypropylen

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with microhardness of the research sample, in our case the PP. The work is divided into two parts: theoretical and practical. The theoretical part is devoted to the basic division of polymers, the description of the hardness tests, instrumented hardness test DSI and injection. In the practical part the polymer (PP) was researched in regards to changes of the cooling time, holding pressure, mould temperature and melt temperature under a load of 0.5 N. Assessed values have been processed and are shown in the graphs.

Keywords: Instrumented test DSI, microhardness, hardness, polypropylene

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Martinu Ovsíkovi Ph.D. za vynaložený čas, ochotu a cenné rady, které mi pomohly porozumět a řešit danou problematiku. Také bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu při studiu.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 ÚVOD DO POLYMERŮ.....	12
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....	12
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ DLE VÝCHOZÍ SUROVINY.....	13
2 VSTŘIKOVÁNÍ.....	14
2.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY VSTŘIKOVACÍHO STROJE.....	14
2.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	14
2.3 ČINNOST VSTŘIKOVACÍHO STROJE.....	15
2.4 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	16
2.5 PROCESNÍ PARAMETRY.....	17
3 TVRDOST.....	18
3.1 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	18
3.2 VLVIVY NA MĚŘENÍ.....	19
3.3 TVRDOST PODLE ROCKWELLA.....	19
3.3.1 Normalizované zkoušky tvrdosti:.....	20
3.3.2 Provedení zkoušky.....	21
3.4 TVRDOST PODLE BRINELLA.....	21
3.5 TVRDOST PODLE VICKERSE.....	24
3.5.1 Provedení zkoušky.....	25
4 MIKROTVRDOST.....	27
4.1 ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI.....	27
4.1.1 Měření mikrotvrdomi podle Vickerse.....	27
4.1.2 Měření mikrotvrdomi podle Knoopa.....	29
4.1.3 Měření mikrotvrdomi podle Berkoviche.....	30
5 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI (DSI).....	31
5.1 PRINCIP.....	32
5.1.1 Vtisková tvrdost H_{IT}	32
5.1.2 Vtiskový modul E_{IT}	32
5.1.3 Vtiskové tečení C_{IT}	33
5.1.4 Plastická a pružná část práce při vnikacím procesu.....	33
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	34
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	35
6.1 PROCESNÍ PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ.....	35
6.1.1 Teplota formy.....	35
6.1.2 Teplota taveniny.....	36
6.1.3 Dotlak.....	37
6.1.4 Doba chlazení.....	38
6.2 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	39
6.3 POLYPROPYLEN.....	39
6.3.1 Vlastnosti polypropylenu.....	40

6.3.2	Využití.....	40
7	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝSLEDKŮ.....	42
7.1	DOBA CHLAZENÍ PŘI ZATÍŽENÍ 0,5N	42
7.2	DOTLAK FORMY PŘI ZATÍŽENÍ 0,5N.....	47
7.3	TEPLOTA FORMY PŘI ZATÍŽENÍ 0,5N.....	51
7.4	TEPLOTA TAVENINY PŘI ZATÍŽENÍ 0,5N.....	56
	ZÁVĚR	61
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	67
	SEZNAM TABULEK	69
	SEZNAM PŘÍLOH.....	70

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce bylo měření mikrotvrlosti vzorku, v našem případě polypropylenu. Polymery patří v dnešní době mezi nejvíce využívané, můžeme se s nimi setkat v automobilovém průmyslu, domácnostech, elektronice, sportovním vybavením atd.

Tvrlost řadíme mezi významné mechanické vlastnosti. V technické praxi patří tvrdost mezi velmi využívané. Velkou předností u zkoušek tvrdosti je jejich relativní jednoduchost, opakovatelnost a také skutečnost, že měření můžeme v mnoha případech provádět přímo na výrobku a jeho polotovarech, nebo také na zkušebních tělesech určených pro jiné druhy mechanických zkoušek.

Tvrlost definujeme jako odolnost materiálu proti místní deformaci, která je vyvozená konkrétním zatěžovacím tělesem (indentorem). Mírou tvrdost je konkrétní velikost trvalé plastické deformace.

K nejnovějším metodám pro měření mikrotvrlosti patří metoda DSI, která se díky propojení měřicího přístroje s počítačem stala jednou z nejpoužívanějších metod při zjišťování vlastností materiálu.

Měření mikrotvrlosti v bakalářské práci se provádí na přístroji Micro-Combi-Tester, za přesně daných podmínek a rozměrech součástí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

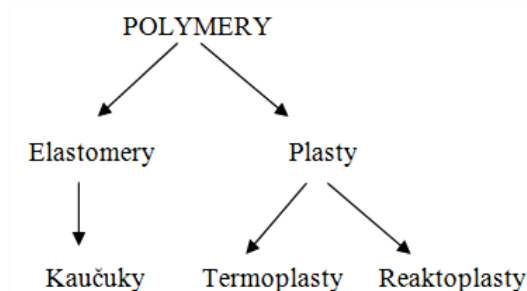
1 ÚVOD DO POLYMERŮ

Slovo polymer je složeno ze dvou částí. *Poly* znamená mnoho a *mer* značí jednotku. Polymerní materiály se tedy skládají z velkých molekul. Tyto obsahují mnoho opakujících se stejných jednotek. Ony velké molekuly se nazývají makromolekuly neboli polymerní řetězce. Z hlediska chemického jsou polymery nejčastěji sloučeniny uhlíku a vodíku. Často obsahují také kyslík, dusík, síru, chlór a další. [1]

Plasty tvoří nejen makromolekulární látka, jenž se skládá z hlavní složky. Je v nich zakomponována řada přísad (aditiv). Každá přísada, ať se jedná o plniva, stabilizátory, změkčovadla, maziva, barviva a další látky, ovlivňují vlastnosti polymerní směsi. [2]

1.1 Základní rozdělení polymerů

Polymery se povětšinou dělí do dvou základních skupin (Obr. 1). Jsou to elastomery a plasty. Samotné plasty můžeme rozdělit na termoplasty a reaktoplasty.



Obr. 1 Základní rozdělení polymerů

Elastomery (kaučuky) – jedná se o látky, které vykazují velmi velké deformace při mechanickém zatížení. Tato deformace je elastická tzn. pružná. Po odlehčení se materiál vrací do původního tvaru. Dominantní skupinou elastomerů jsou kaučuky. Jedná se například o styrenbutadienový kaučuk nebo isoprenový kaučuk. [2]

Termoplasty – jsou polymerní materiály, které za zvýšených teplot měknou, přecházejí do plastického stavu. Za těchto popsaných podmínek je možné je tvarovat. Zástupcem této skupiny je polyetylén (PE), polyvinylchlorid (PVC), polypropylén, polystyren aj.

Reaktoplasty – vykazují odlišné chování. Při zahřátí polotovaru, jenž má tvar budoucího výrobku, následně dojde k jeho vytvrzení, změní se jeho struktura (zesíťování). Tento proces je nevratný. Výsledkem je tuhý a tvrdý materiál. Tento materiál při opakovaném zahřátí neměkne a netaví se. Mezi reaktoplasty se řadí: epoxidové pryskyřice, polyesterové pryskyřice atd.

1.2 Rozdělení polymerů dle výchozí suroviny

- *přírodní* – organické polymery, mohou to být původní např. bílkoviny, škrob, celulóza, kaučuk nebo chemicky upravované jako celulooid, umělé hedvábí, umělá rohovina apod.
- *syntetické* – vyrábí se z nízkomolekulárních sloučenin chemickými reakcemi. Podle typu reakce je můžeme rozdělit na polymery vznikající: [3]
 - polymerací,
 - polyadící,
 - polykondenzací.

2 VSTŘIKOVÁNÍ

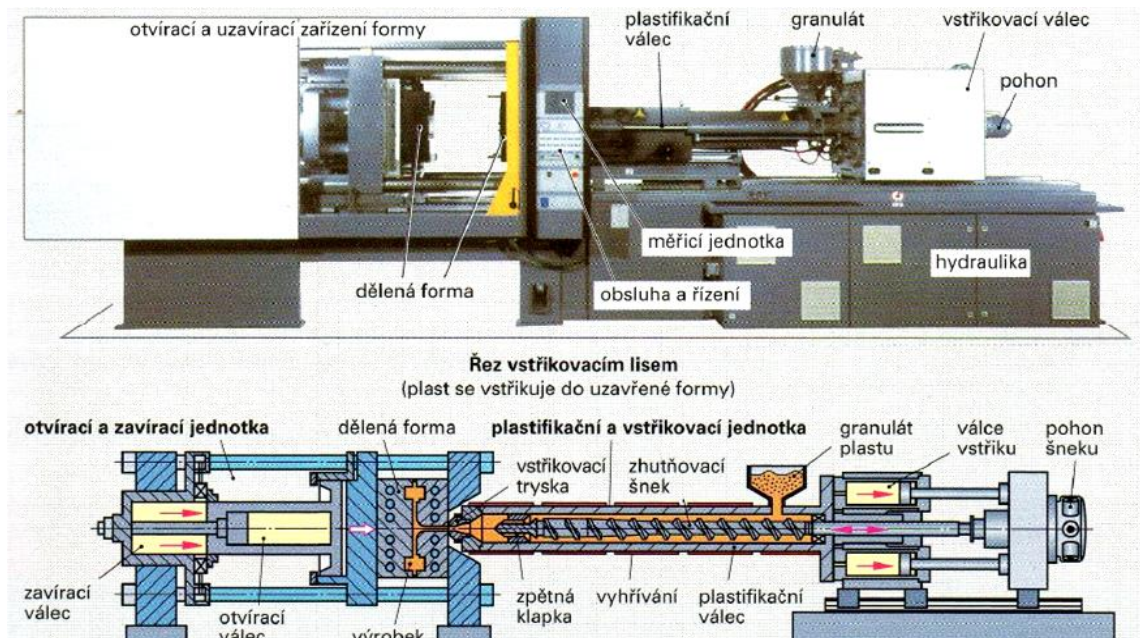
Je způsob tváření plastů, při kterém je dávka zpracovávaného materiálu vstříknuta velkou rychlostí do uzavřené dutiny formy, kde ztuhne v konečný díl.

- Výhodou vstřikování je krátký časový cyklus, schopnost vyrábět složité součásti s drobnými tolerancemi rozměrů a velmi dobrou povrchovou úpravou.
- Nevýhodou vstřikování jsou vysoké investiční náklady, dlouhá doba pro výrobu formy a potřeba používat strojní zařízení, které je neúměrně velké v porovnání s vyráběným dílem. [4]

2.1 Základní parametry vstřikovacího stroje

- maximální vstřikovaný objem výstřiku,
- plastikační kapacita stroje,
- vstřikovací tlak,
- uzavírací síla.

2.2 Vstřikovací stroj



Obr. 2 Vstřikovací stroj [5]

Vstřikovací stroj je složen ze dvou jednotek, které jsou umístěny na společném podstavci. Jedná se o plastikační a vstřikovací jednotky. Dále z dělené formy s uzavíracím a otevíracím (hydraulickým) zařízením. Vstřikovací stroje se vyznačují tím, že na nich lze vyrábět výrobky velmi složitých tvarů ve velmi malých výrobních tolerancích a ve velkých sériích. Vstřikované výrobky nacházejí obecné využití v domácnostech, strojírenství, automobilovém průmyslu, ve spotřebním průmyslu, elektrotechnice atd.

- **Plastikační jednotka:** je složena z plastikačního válce a vytlačovacího šneku. Šnek má obdobný tvar jako šnek extrudéru, jenž je určen pro vytlačování. Má navíc zpětnou klapku, plastikační válec má navíc uzavíratelnou vstřikovací trysku.
- **Otvírací a zavírací jednotka:** skládá se z hydraulického válce pro otevírání formy a hydraulického válce určeného pro pevné uzavření dělené formy. Zavírací válce jsou učeny k přidržení obou částí formy v zavřeném stavu. Musí odolat tlaku vtlačovaného plastu. Otvírací válce otevrou formu po potřebném zchlazení výstřiku. Plastikační šnek (jednota) pracuje v kontinuálním cyklu. Jeho úkolem je ohřev, mísení a vytlačování hmoty plastu o požadovaných vlastnostech (teplota, viskozita). [5]

2.3 Činnost vstřikovacího stroje

Vstřikování do formy probíhá jako koordinovaná činnost. Spolupracují zde vstřikovací jednotka a jednotka uzavírací.

Uzavření formy a vstříknutí polymeru

První částí vstřikovacího cyklu je uzavření dvojdílné formy. Následně se k ní přisune plastikační válec a vtlačí vstřikovací trysku do vstřikovacího otvoru formy. Dále píst plastikační jednotky posune šnek směrem k trysce a prudce vytlačí polymer, který se v tento moment nachází v tekutém stavu. Tím se vyplní dutina formy, která nese tvar budoucího výrobku, plus je zvětšeno smrštěním použitého polymeru. Šnek se stále otáčí a vytlačuje do formy další taveninu. Tímto se vyrovnává pokles objemu způsobený chladnutím plastu ve formě, užívá se pojem dotlak. Tlak stoupne až na 200MPa. Vzduch při tomto unikne od vzdušňovacími drážkami a kanálky.

Chlazení a otevření formy

Při procesu vstřikování termoplastu jsou obě poloviny formy temperovány, u termoplastů chlazené. Vstříknutý polymer postupně od stěn formy vychladne a tím získá svůj finální tvar. Vstříkovací tryska se uzavře, plastikační válec se navrátí do výchozí polohy. Následuje otevření formy a vyhození vylisku (užívá se vyhazovací mechanismus, vyfouknutí stlačeným vzduchem nebo manuální vyjmutí).

Uzavření formy a přisunutí válce

Dvoudílná forma se uzavře. Otáčející se šnek zhutňuje temperovaný plast před sebou, odjíždí do přední polohy a vytváří v prostoru před sebou roztavený polymerní materiál pro vstřík do formy. [5]

2.4 Vstříkovací cyklus

Vstříkovací cyklus můžeme rozdělit do několika fází, které jsou znázorněny na obrázku (Obr. 3). Plastikační a uzavírací jednotky pak vykonávají jednotlivé kroky tak, aby nedocházelo v žádném cyklu ke zbytečným prodlevám. [15]



Obr. 3 Schéma vstříkovacího cyklu

Nejprve se materiál převede v taveninu v plastikační jednotce, přitom šnek koná přímočarý a rotační vratný pohyb, tavenina se shlukuje před čelem šneku. Plastikační jednotka se přisune k uzavírací jednotce a pohybem hydraulického pístu působícího na šnek je tavenina vstříknuta do zavřené dutiny formy. Po naplnění dutiny působí stále dotlak, kterým eliminujeme smrštění vylisku. Dotlak je převážně menší než vstříkovací tlak a působí do zatuhnutí vtokového ústí. Během dotlaku začíná chlazení vylisku, po ukončení dotlaku plastikační jednotka odjíždí a plastikuje se nový materiál. Po ochlazení na vyhazovací teplotu

se forma otevře, výstřik je vyhozen, provedena příprava nebo kontrola formy. Forma se uzavře a dochází k novému vstřikování. [15]

2.5 Procesní parametry

Vlastnosti výstřiku značně ovlivňují technologické podmínky. Pro rozměr, fyzikální a mechanické vlastnosti a též na izotropii mají vliv následující zpracovatelské podmínky. Jsou to teplota, tlak a čas. Při vstřikování dochází ve tvarových dutinách formy k orientaci makromolekul, při níž jsou řetězce vyrovnány po směru proudění taveniny polymeru. Popsaná orientace je po ztuhnutí hlavní příčinou anizotropie, tzn. nepravidelné smrštění a vnitřní napětí.

3 TVRDOST

Tvrdot je nejčastěji definována jako odpor, který klade zkoušený materiál proti vnikání cizího tělesa. Při vnikání k tomuto účelu určeného tělíška do povrchu zkoušeného předmětu vzniká tzv. deformace. Dle velikosti této deformace posuzujeme tvrdost. Vždy když vzniká při měření vtisk o rozměrech menších než desetina milimetru až milimetrů, hovoříme o makrotvrdosti.

O mikrotvrdosti hovoříme tehdy, máme-li určovat tvrdost jednotlivých strukturních složek (vtisky mají rozměry setin milimetru). Za pomoci zkoušek tvrdosti lze získat na malých vzorcích určité charakteristiky zkoušených materiálů. Tyto zkoušky jsou rychlé a jednoduché. Nevyžadují nikterak náročnou přípravu vzorků. Materiál je porušen minimálně. [6]

3.1 Zkoušky tvrdosti

Zkoušky tvrdosti můžeme rozdělit podle různých metod: [7]

- vrypové (Martens),
- vnikající (Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop),
- odrazové (Shore),
- kyvadlové.

Podle charakteru zatěžující síly: [7]

- statické (tvrdost podle Brinella, Rockwella, Vickerse, Knoopa),
- dynamické (Baumanovo kladivo, Poldiho kladivo, Shoreho skleroskop).

Nejrozšířenější je statická zkouška tvrdosti. Při této zkoušce vnikají do testovaného materiálu kulička, kužel nebo jehlan. Vztahy mezi zatížením a plochou nebo hloubkou vpichu jsou odpovídající hodnotě tvrdosti dle Brinella, Vickerse a Rockwella. Rozdílné metody a jinak tvarované vnikací tělesa používaná např. při zkoušce podle Brinella a Rockwella vykazují na stejném otestovaném materiálu rozdílné výsledky. Užíváme-li převáděcí tabulky mezi hodnotami HRC a HB výsledky jsou pouze přibližné. Není zde užíván přesný matematický vztah vysvětlující převod z jedné stupnice tvrdosti do jiné stupnice tvrdosti. Převodové tabulky musejí být určeny praktickým změřením testovaného materiálu za pomoci různých metod. Potřebujeme-li srovnání tvrdosti dvou odlišných vzorků, musejí být oba

měřeny stejnou metodou. To znamená ve stejné stupnici tvrdosti. Případně je jedna stupnice převedena do druhé. [6]

3.2 Vlivy na měření

Měření tvrdosti ovlivňují nejrůznější vnější faktory. Jedná se zejména o přípravu povrchu materiálu, přičemž všeobecně platí, že čím větší hodnota drsnosti povrchu, tím větší odchylka měření. Zajistíme-li zkoušení pomocí metody, kde je užito velké plochy otisku, lze zavést i pro odlitky s vysokou hodnotou drsnosti povrchu. [6]

3.3 Tvrdost podle Rockwella

Patří mezi statické zkoušky tvrdosti materiálu a je určována na Rockwellově tvrdoměru. Jedná se o rozdíl hloubky vtisku vnikajícího tělesa typu ocelová kulička nebo diamantový kužel mezi dvěma stupni zatížení. Tyto stupně slouží k tomu, abychom vyloučili z měřené hloubky nepřesnosti povrchové struktury.

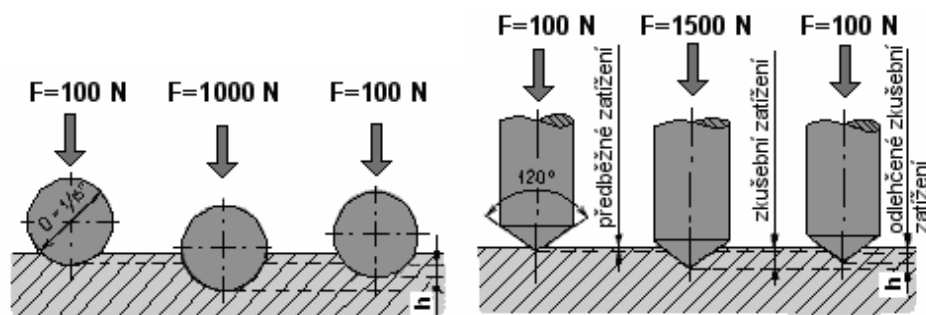


Obr. 4 Digitální stolní tvrdoměr Rockwell

Kužel má vrcholový úhel 120° a poloměr kulové části 0,2 mm (HRA, HRC). Kulička má průměr 1,5875 mm (HRB). Diamantový kužel nebo ocelovou kuličku, dotýkající se povrchu zkoušeného předmětu, se nejprve předběžně zatíží silou 100 N (výchozí poloha pro

měření hloubky vtisku). Následně se pozvolna zvyšuje zatěžovací síla tak, aby se za 3 až 6 sekund dosáhlo zatížení předepsaného normou (např. předběžné zatížení silou 100 N + zkušební zatížení silou 1400 N = celkové zatížení silou 1500 N). Následně se zatěžující síla opět zmenšuje, až na 100 N. V tomto stavu se zjistí přírůstek hloubky vtisku, který nastal proti původní poloze při 100 N.

Zkouška tvrdosti dle Rockwella se vyznačuje rychlostí, relativní jednoduchostí. Vpichy (důlky) jsou velmi malé, jejich maximální hloubka činí 0,2 mm. Je vhodná jako běžná kontrola velkých sérií. [8]



Obr. 5 Zkouška tvrdosti podle Rockwella (HRB, HRC) [19]

3.3.1 Normalizované zkoušky tvrdosti:

HRA

- Tvrdost určená diamantovým kuželem při celkovém zatížení 600 N.
- Pro slinuté karbidy a tenké povrchové vrstvy.

HRB

- Tvrdost určená ocelovou kuličkou (B = ball) při celkovém zatížení 1000 N.
- Pro měkčí kovy (20 – 100 HRB).

HRC

- Tvrdost určená diamantovým kuželem (C = cone) při celkovém zatížení 1500 N.
- Doporučuje se používat pro rozsah HRC= 20 – 67.

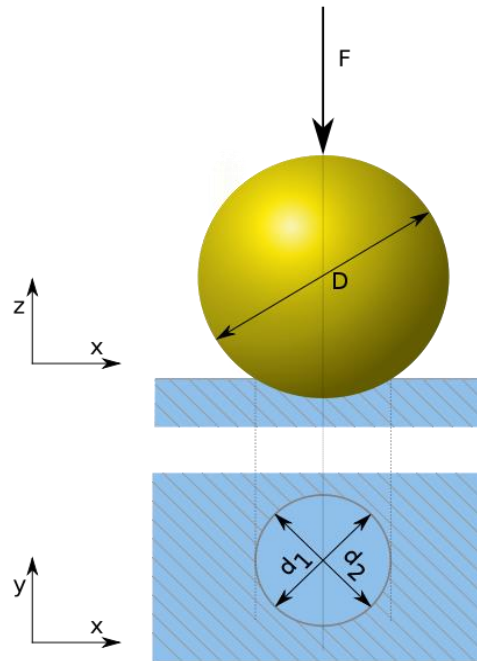
3.3.2 Provedení zkoušky

- Zkouška se provádí standardně při teplotách mezi 10 až 35°C
- Je podmínkou, aby zkušební těleso bylo umístěno na tuhé podložce, a taktéž je podmíněno, aby bylo umístěno v rovině kolmé k ose vnikajícího tělesa a rovněž směru zatížení. Je nutno vyloučit posunutí zkušební tělesa – pevné upnutí!
- Zatížíme-li zkušební vzorek předběžným zatížením F0 a vyloučíme-li rázy, chvění a kmitání. Podmínkou je rovněž doba působení předběžného zatížení F0. Nesmí překročit 3 sekundy.
- Na měřicím zařízení se nastaví do počáteční polohy. Rovněž vyloučíme rázy, chvění a také kmitání. Zvýší se zatížení z F0 na F v čase od 1 do 8 s. Po dosažení předzatížení se vynuluje měřicí zařízení hloubky vtisku.
- Celkového zatížení musí působit 4 ± 2 s. Odlehčíme-li přídavné zatížení F1, následuje po něm předběžné zatížení F0. Následuje krátká doba stabilizace.
- Hodnotu tvrdosti podle Rockwella stanovíme z trvalé hloubky vtisku h. Užijeme vzorců z tabulky, u moderních přístrojů čteme hodnoty na měřicím zařízení.
- Vyloučíme rázy a chvění při zkoušce.
- Vzdálenost, která se nachází mezi samostatnými středy dvou sousedících vtisků, by měla být alespoň 4 násobný průměr vtisku (ale nejméně 2 mm). Vzdálenost středu vtisku od kraje tělesa je povolena na hodnotu alespoň 2,5 násobnou daného průměru vtisku (nejméně však 1 mm). [13]

3.4 Tvrdost podle Brinella

Podstata zkoušky spočívá ve vlačování ocelové kalené kuličky o průměru D do zkušebního tělesa silou F, která směřuje kolmo k povrchu tělesa po normou stanovenou dobu. Následně se po odlehčení změří průměr vtisku d.

Průměr D bývá 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Průměr kuličky závisí na tloušťce měřeného materiálu. Platí, že minimální tloušťka materiálu je desetinásobek hloubky vtisku. V opačném případě by se mohla projevit tvrdost podložky. [8]



Obr. 6 Zouška tvrdosti podle Brinella [20]

Tvrdość podle Brinella je definována podle následujícího vztahu: [9]

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h} \quad [MPa] \quad (1)$$

Kde:

F...síla, kterou je kulička vtlačena do zkušebního tělesa

S...plocha důlku, který vznikne po vytlačení kuličkou [mm^2]

h...hloubka vzniklého důlku [mm]

D...průměr kuličky [mm]

Doba působení síly o dané velikosti závisí na struktuře materiálu. Měkčí materiály se zatěžují delší dobu. U slitin železa je zatížení od 10 do 15 s. U neželezných slitin od 10 do 180 sekund.

Přesnost měření závisí na správném proměření vtisku. U Brinellovy zkoušky je měření vtisku mnohdy poměrně nepřesné. Vtisk bývá často nezřetelný a nesouměrný. Příčinou chyby je leckdy deformace použité vtačované kuličky (je z kalené oceli). Pro materiály tvrdší než $HB=400$ není ocelová kulička vhodná a používají se kuličky ze slinutých karbidů. Na průměr vtisku má velký vliv také vtažení materiálu po kraji vtisku (u materiálu neztpevněného) nebo naopak vytlačení obvodového valu (u materiálu zpevněného).



Obr. 7 Přenosný tvrdoměr Brinell

Brinellův tvrdoměr:

Brinellův tvrdoměr má různé provedení i velikost. V laboratořích jsou velké stabilní přístroje. Pro sklady, malé dílny, montáže, případně pro zkušební účely byly zkonstruovány malé jednoduché přístroje. Nejpoužívanější bývá ruční přenosný tvrdoměr Poldi o kapesní velikosti. Principem je porovnání známé pevnosti materiálu pomocí porovnávací tyčinky o pevnosti zkoušeného materiálu.

Provedení zkoušky: [13]

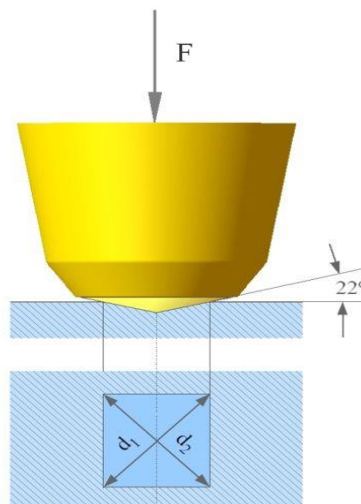
- Zkouška se provádí nejčastěji při teplotách mezi 10 až 35°C, v krajních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Při zkoušce je nutno použít zkušební zatížení, které odpovídá zkoušenému materiálu a také velikosti kuličky.
- Zkušební zatížení vybíráme tak, aby průměr vtisku byl v rozmezí hodnot mezi 0,24 D a 0,6 D.
- Vzorek pokládáme vždy na tuhou podložku. Styčné plochy musí být čisté a být bez cizích tělísek, je nadmíru důležité ustavit vzorek pevně, bez možnosti pohybu.
- Vnikající těleso se zatlačuje kolmo na povrch. Vyloučit se musí rázů a chvění. Doba od začátku zatěžování do dosažení zkušební síly se musí pohybovat v rozmezí 2s až 8s.

- Doba působení zkušební síly je definována rozmezím 10 až 15s. Pro některé speciální materiály mohou být použity delší časy. Tyto však musíme dodržovat s tolerancí $\pm 2s$.
- Vzdálenost středu vtisku a okraje vzorku musí být v minimálním případě 2,5 násobek průměru vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její další slitiny. Vzdálenost středů dvou sousedících vtisků musí být nejméně 4 násobná průměru vtisku. Toto platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny.
- Po zkoušce se změří průměr každého vtisku ve dvou směrech na sebe kolmých. Pro stanovení tvrdosti počítáme jako směrodatnou průměrnou hodnotu velikosti vtisku.

3.5 Tvrdost podle Vickerse

Metoda je obdobná jako zkouška podle Brinella. U této zkoušky podle Vickerse se užívá pravidelný čtyřboký jehlan.

Zkouška spočívá ve vtažení diamantového jehlanu do vzorku daným zkušebním zatížením F po stanovenou dobu. Dále se změří úhlopříčka vtisku. Zkušební zatěžující síla bývá od 10 do 1000 N. Doba zatížení se volí od 10 do 180 s.



Obr. 8 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [20]

Tvrдость podle Vickerse se vyjadřuje bezrozměrně, je určena poměrem vlačovací síly F a povrchu vtisku.

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

F - síla vlačování,

d - úhlopříčka vtisku.

Pro praktickou potřebu používáme tabulek, kde podle délky úhlopříčky d a použité síly F je uvedena odpovídající tvrďost.

Měření tvrďosti podle Vickerse můžeme použít pro všechny tvrďosti. Metoda je minimálně závislá na zatížení a je velmi přesná. [8]



Obr. 9 Digitální tvrdoměr Vickers

3.5.1 Provedení zkoušky

- Zkouška se standardně provádí při teplotě 10 až 35°C, ve výjimečných případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Po celou zkoušku je nutno, aby byl zkušební přístroj chráněn proti rázům a chvění.
- Vzorek musí být položen na tvrdé a pevné podložce. Je důležité, aby se během zkoušky nehnul. Styčné plochy musí být čisté.
- Vnikající těleso se vlačuje kolmo k povrchu do zkušebního vzorku. Je definováno zatížením. Omezíme rázy a bez chvění na minimum, popřípadě zcela vyloučíme.

-
- Doba, po kterou zatěžujeme vzorek zkušební silou, nesmí být menší než 2 s a delší než 8 s.
 - Při zkouškách, u nichž je používáno nízké zatížení, nesmíme celkovou dobou zkoušky překročit 10 s. Doba působení síly se musí pohybovat od 10 s do 15 s. [14]

4 MIKROTVRDOST

Tyto zkoušky jsou užívány pro měření tvrdosti velmi malých předmětů a tenkých vrstev. Popřípadě v metalografii. Zde na měření tvrdosti jednotlivých struktur. Indentor ve tvaru čtyřbokého jehlanu je do zkušebního tělesa vtlačován pod zkušebním zatížením. Toto působí v kolmém směru a stanovenou dobu. Po odlehčení se změří úhlopříčka vtisku. Zkušební zatížení je maximálně 2 N. [6]

Protože vtisky při zkoušení mikrotvrdomosti jsou malé, je použití této metody vhodné pro:

- měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušebního vzorku,
- malé či tenké součásti,
- měření mikrotvrdomosti strukturních složek a fází,
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků,
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování,
- hodnocení svarových spojů,
- pro hodnocení oduhličujících procesů,
- měření křehkých materiálů,
- studium difúzních pochodů.

4.1 Zkoušky mikrotvrdomosti

Oblast pro použití zkoušek mikrotvrdomosti je vcelku velice široká. Například pro zjišťování tvrdosti v břitu nástroje či velmi blízko jeho hrany. Dále pro zjišťování tvrdosti jemných drátů, plechů a nejvíce pro kontrolu povrchových tvrdých vrstev. Jedná se především o kontrolu pokovovaných předmětů, ochranných nátěrů atd.

Pomocí síly, která vtlačuje zkušební těleso do zkušebního vzorku, zjišťujeme hodnoty mikrotvrdomosti. Hodnota použité síly je v tomto případě daleko menší než u zkoušek makrotvrdomosti. Makrotvrdomost nám ukazuje tvrdost jednotlivých kovů jako celku, ale při měření mikrotvrdomosti lze stanovit tvrdost jednotlivých vrstev struktury kovů. [2]

4.1.1 Měření mikrotvrdomosti podle Vickerse

Podstatou zkoušky je diamantové vnikající těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a daným vrcholovým úhlem (136°). Mezi protilehlými stěnami je vtlačováno do povrchu zkušebního tělesa. Následně je měřena úhlopříčka vtisku. [10]

Mikrotvrdotost vyjadřujeme jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku. Ten se uvažuje jako pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a s vrcholovým úhlem, který je roven úhlu vnikajícího tělesa (136°) :

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2} \quad (3)$$

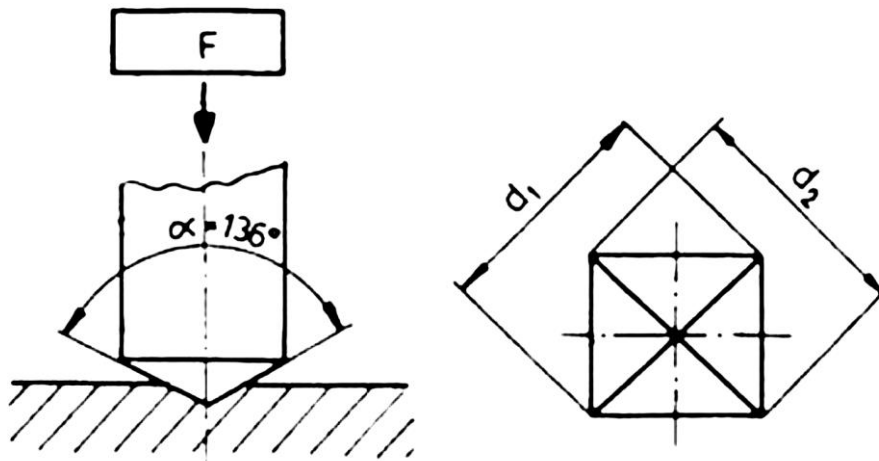
$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

Kde:

d je aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1, d_2 v mm (obr. 10)

F je zkušební zatížení v newtonech

$0,102$ je konstanta $9,80662^{-1}$



Obr. 10 Zkouška podle vickerse [18]

Zkouška tvrdosti dle Vickerse je předepsána evropskou normou ČSN ISO 6507-1, a to pro tři rozdílné oblasti zkušebního zatížení (viz. Tabulka 1). [10]

Tab. 1. Tvrdotost dle Vickerse – oblasti zkušebního zatížení pro kovové materiály

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 mikrotvrdotosti dle Vickerse

4.1.2 Měření mikrotvrdosti podle Knoop

Do povrchu materiálu se vtláčeje pod zatížením silou F (působí kolmo na povrch vzorku) čtyřboký diamantový jehlan (poměr úhlopříček 7:1, úhly 130° a $172,5^\circ$, poměr délky úhlopříčky k hloubce je 30).

Metoda podle Knoop patří mezi metody měření mikrotvrdosti. Metoda je vhodná pro tenké plastové desky, tenké kovové desky, křehké materiály nebo pro materiály, u kterých nesmí být použita síla větší než 3,6 kgf.

Zátěžová síla u metody podle Knoop pohybuje mezi 25 - 3600 gf.

Otisky u metody podle Knoop jsou při stejném zatížení téměř trojnásobně delší a mělkčí než u zkoušky podle Vickerse - mělkost otisku může působit problémy při odčítání velikosti otisku.

Při měření tvrdosti podle Knoop jsou kladeny vysoké nároky na úpravu povrchu zkoušeného materiálu a na ostrost hran vnikajícího tělesa. [11]

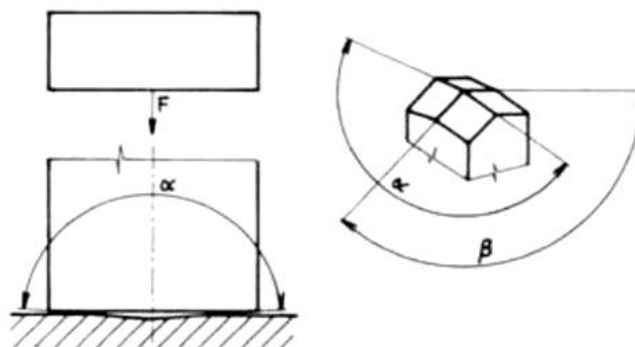
$$HK = 0,102 \frac{F}{l^2 \cdot c} = 0,102 \frac{F}{0,07028 \cdot l^2} = 1,451 \frac{F}{l^2} \quad (5)$$

Kde:

l - délka úhlopříčky [mm],
 F - zkušební zatížení [N].

$$\text{konstanta: } \frac{-1}{g \eta \cdot 9,80665} = 0,102 \quad (6)$$

$$\text{konstanta vnikajícího tělesa: } -c = \frac{\tan \frac{\beta}{2}}{2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (7)$$



Obr. 11 Zkouška podle Knoop

4.1.3 Měření mikrotvrlosti podle Berkoviche

Podstata a průběh této zkoušky je totožný se zkouškou podle Vickerse. Rozdíl je ve vnikajícím tělese. Indentor pro Berkovichovu zkoušku představuje nepravidelný trojboký jehlan. Materiálem je diamant. Užívá se modifikovaného Berkovichova indentoru, kde má úhel $65,27^\circ$. [12]

Tvrlost dle Berkoviche vypočítáme dle vztahu:

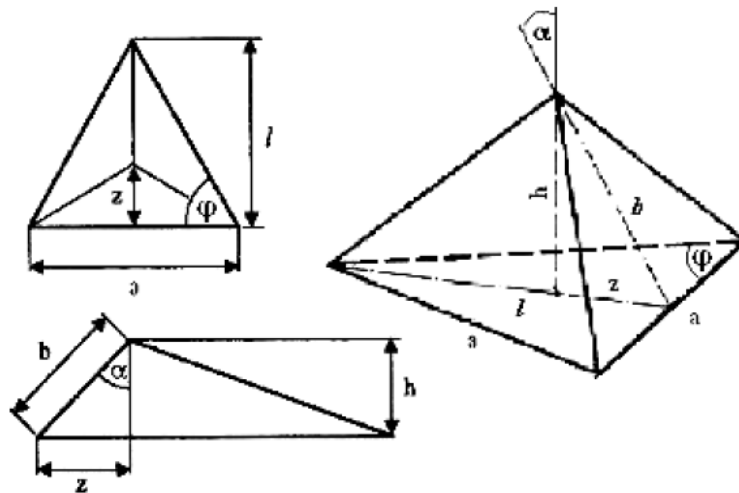
$$H_{ch} = 1570 \frac{W}{l^2} \quad (8)$$

Kde:

H_{ch} : mikrotvrlost podle Berkoviche,

W : zkušební zatížení [N],

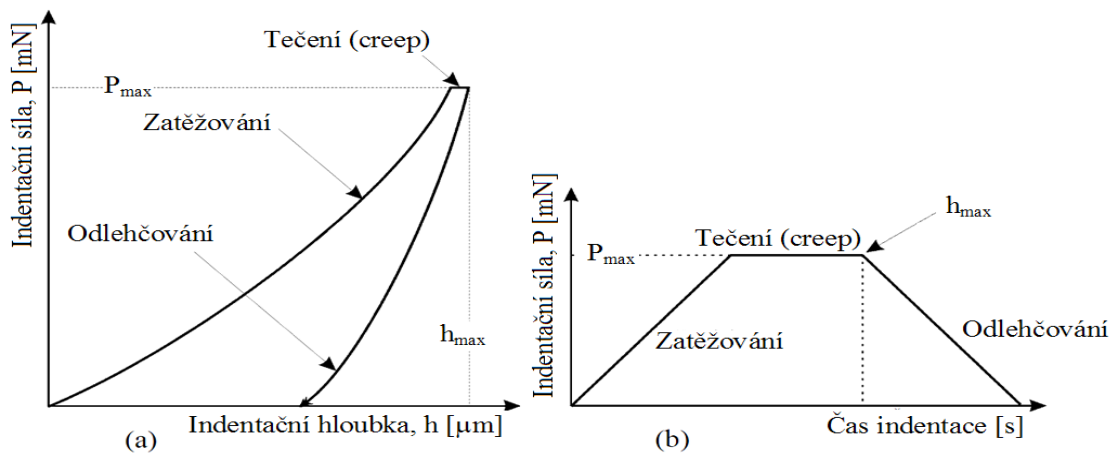
l : výška trojúhelníku změřená na vtisku [mm].



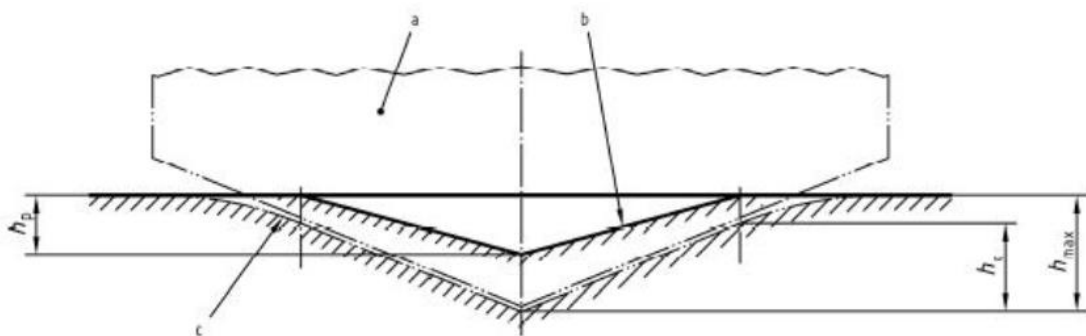
Obr. 12 Berkovichův indentor [12]

5 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI (DSI)

Principem metody je současná detekce okamžité změny hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu a nárůstu/poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Grafickým zpracováním dat vzniká charakteristická indentační křivka zatížení-hloubka vtisku (obr. 13). První fází klasického indentačního cyklu je řízené zatěžování, během kterého je na indentor definovanou rychlostí aplikována zatěžující síla. Druhá fáze cyklu se označuje jako odlehčování a spočívá v postupném snižování zatěžující síly až na nulovou hodnotu. Často se mezi zatěžování a odlehčování vkládá prodleva (výdrž na aplikovaném zatížení), během které je vzorek vystaven maximální zatěžující síle, což umožňuje zkoumat creep (tečení).



Obr. 13 Berkovichův indentor Indentační křivka (a), časovým diagramem indentační zkoušky (b). [16]



Obr. 14 Schématické znázornění příčného řezu vtisku [16]

a - Vnikací těleso, b - Povrch zbytkového plastického vtisku ve zkušební tělese, c - Povrch zkušební tělesa při maximální hloubce vtisku a maximálním zkušebním zatížení

5.1 Princip

Stanovení tvrdosti a materiálových vlastností (viz obr. 13 a obr. 14) se děje za pomoci nepřetržitého monitorování zatížení a hloubky vtisku.

Zkušební postup může být řízen buď zatížením, nebo posunem. Zkušební zatížení F , odpovídající hloubka h a čas jsou zaznamenávány v průběhu celého zkušební postupu. Výsledkem zkoušky je soubor údajů zkušební zatížení a příslušné hloubky vtisku jako funkce času.

K zajištění reprodukovatelného stanovení zatížení a odpovídající hloubky vtisku se musí určit nulový bod měření zatížení/hloubka vtisku samostatně pro každou zkoušku. [16]

5.1.1 Vtisková tvrdost H_{IT}

Vtisková tvrdost je mírou odporu k trvalé deformace nebo poškození.

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (9)$$

Kde:

F_{max} - je maximální zkušební zatížení.

A_p - je průmět (příčný řez) kontaktní plochy vnikacího tělesa a zkušební tělesa určený z křivky zatížení-hloubka vtisku a ze znalosti funkce plochy vnikacího tělesa.

Rovnice definuje tvrdost jako maximální vložené zatížení podělené průmětem kontaktní plochy vnikacího tělesa s tělesem zkušebním. [16]

5.1.2 Vtiskový modul E_{IT}

Vtiskový modul se může vypočítat pomocí směrnice tečny sloužící k výpočtu vtiskové tvrdosti H_{IT} a je srovnatelný s Youngovým modulem materiálu. [16]

$$E_{IT} = \frac{1-(\nu_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1-(\nu_i)^2}{E_i}} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (10)$$

ν_s ...Poissonův poměr zkušební tělesa

ν_i ...Poissonův poměr vnikacího tělesa

E_r ...redukovaný modul vtiskového kontaktu

E_i ...modul vnikacího tělesa

5.1.3 Vtiskové tečení C_{IT}

Jestliže se při konstantním zatížení měří změna hloubky vtisku, může se vypočítat relativní změna hloubky vtisku. Jedná se o hodnotu tečení materiálu. [16]

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (11)$$

Kde:

h_1 je hloubka vtisku v milimetrech v čase (t_1), kdy je dosaženo zkušebního zatížení,

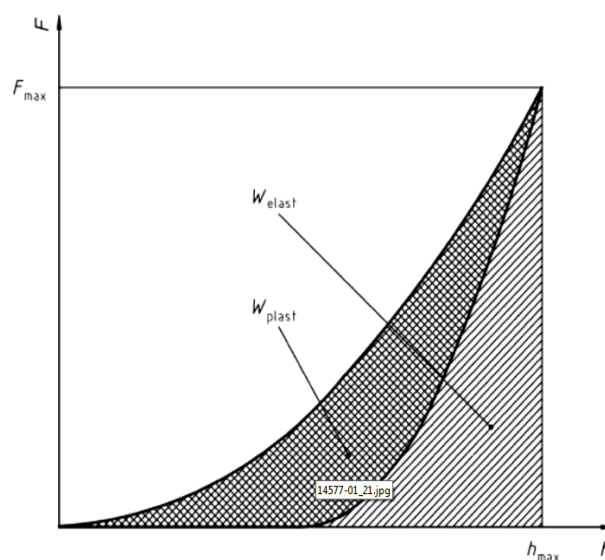
h_2 je hloubka vtisku v milimetrech v čase (t_2) výdrže na konstantní úrovni zkušebního zatížení.

5.1.4 Plastická a pružná část práce při vnikacím procesu

Celková práce W_{total} je pouze částečně spotřebována jako deformační plastická práce W_{plast} . V průběhu odlehčování zkušebního zatížení se zbytková část považuje za práci pružné zpětné deformace W_{elast} . [16]

$$W_{total} = W_{elast} + W_{plast} \quad (12)$$

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 \quad (13)$$



Obr. 15 Plastická a pružná část práce vnikacího procesu [16]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6.1 Procesní parametry vstřikování

Typ polymeru: PP IM 5580 TST

Příprava zkušebních těles proběhla vstřikováním na vstřikovacích strojích firmy ARBURG typu Allrounder 170 U. Parametry stroje byly nastaveny dle doporučení výrobců.

V průběhu vstřikování byly měněny procesní parametry a bylo posuzováno, do jaké míry ovlivňuje změna procesních parametrů mikro-mechanické vlastnosti testovaného PP.

6.1.1 Teplota formy

Teplota formy byla měněna v rozsahu 30-90°C. V tab. 2 můžeme vidět nastavené parametry.

Tab. 2. Hodnoty teploty formy

Procesní parametry vstřikování:	
Vstřikovací tlak:	900 bar
Dotlak:	700 bar
Doba působení dotlaku:	15s
Doba chlazení:	35s
Rychlost plnění:	40mm/s
Teplota T1:	200°C
Teplota T2:	210°C
Teplota T3:	220°C
Teplota T4:	230°C
Teplota formy:	30°C 40°C 50°C 60°C 70°C 80°C 90°C

6.1.2 Teplota taveniny

Tab. 3. Hodnoty teploty taveniny

Procesní parametry vstřikování:				
Vstřikovací tlak:	900 bar			
Dotlak:	700 bar			
Doba působení dotlaku:	15s			
Doba chlazení:	35s			
Rychlost plnění:	40mm/s			
Teplota T1:	175°C	195°C	215°C	235°C
Teplota T2:	180°C	200°C	220°C	240°C
Teplota T3:	195°C	215°C	235°C	255°C
Teplota T4:	200°C	220°C	240°C	260°C

6.1.3 Dotlak

Dotlak byl měřen v rozmezí 300-800 barů.

Tab. 4. Hodnoty dotlaku

Procesní parametry vstřikování:						
Vstříkovací tlak:	900bar					
Dotlak:	300 bar	400bar	500bar	600bar	700bar	800bar
Doba působení dotlaku:	15s					
Doba chlazení:	35s					
Rychlost plnění:	40mm/s					
Teplota T1:	200°C					
Teplota T2:	210°C					
Teplota T3:	220°C					
Teplota T4:	230°C					

6.1.4 Doba chlazení

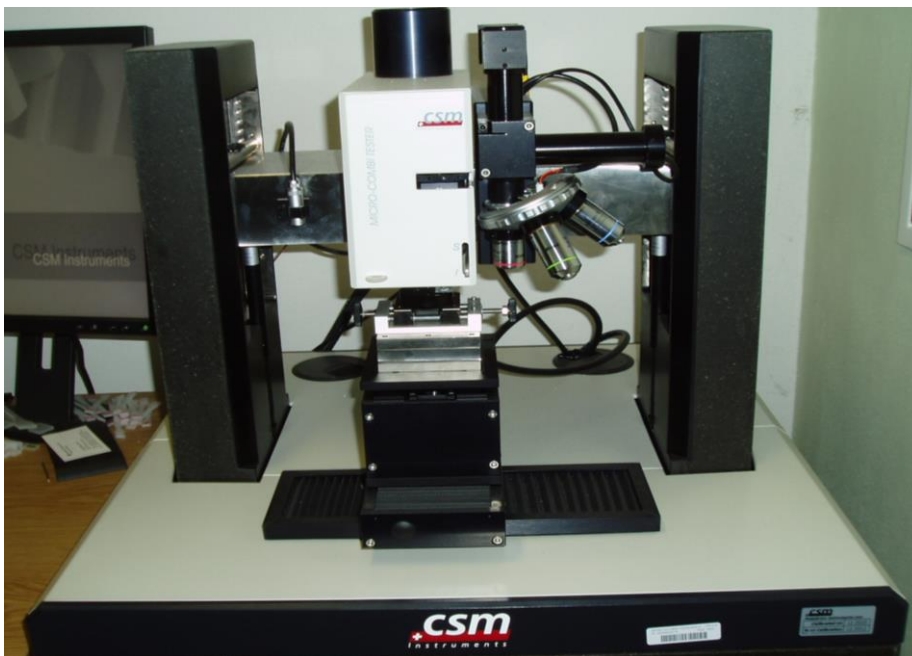
Doba chlazení polymeru v dutině formy byla měněna v rozsahu 5 – 35 s.

Tab. 5. Hodnoty doby chlazení

Procesní parametry vstřikování:				
Vstřikovací tlak:	900bar			
Dotlak:	700 bar			
Doba působení dotlaku:	15s			
Doba chlazení:	5s	15s	25s	35s
Rychlost plnění:	40mm/s			
Teplota T1:	200°C			
Teplota T2:	210°C			
Teplota T3:	220°C			
Teplota T4:	230°C			

6.2 Instrumentovaná zkouška tvrdosti

Měření Instrumentované zkoušky tvrdosti bylo provedeno na přístroji Micro - Combi Tester od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 14577-1.



Obr. 16 Přístroj Micro – Combi Tester

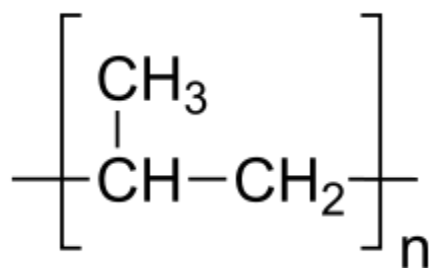
Zvolené parametry zkoušky:

- aplikované zatížení – 0,5 N,
- výdrž na maximálním zatížení - 90 s (mikrotvrdot),
- zatěžující a odtěžující rychlost – 1N/min,
- Poissonovo číslo - 0,3.

Jako vnikací tělísko byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° (Vickersův indentor). Měření byla provedena metodou DSI a vyhodnocení mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.

6.3 Polypropylen

Polypropylen (PP) patří mezi polyolefiny a je jeden z ekonomicky nejdůležitějších termoplastických materiálů. Je využíván ve velmi široké škále aplikací. Může být průhledný nebo se zabarvenými pigmenty. Např.: automobilové součástky, tkaniny, lékařské přístroje a obaly na potraviny.



Obr. 17 Chemický vzorec

Podle struktury dále můžeme polypropylen rozdělit na:

- ataktický - má methylové skupiny nepravidelně uspořádány vzhledem k rovině proložené řetězcem,
- izotaktický - má methylové skupiny na jedné straně vzhledem k rovině proložené řetězcem,
- syndiotaktický - má methylové skupiny pravidelně se střídající po obou stranách roviny proložené řetězce. [17]

6.3.1 Vlastnosti polypropylenu

Polypropylen je nepolární materiál, který je částečně krystalický. Stupeň krystalinity značně ovlivňuje vlastnosti polypropylenu. Při zvyšující se krystalinitě roste modul pružnosti, pevnost v ohybu, mez kluzu, chemická odolnost. Rázová houževnatost klesá. Teplota skelného přechodu je 0°C (platí pro čistý PP), má vysokou teplotu tání (170°C). Tyto parametry omezují použitelnost PP v rozmezí nad bodem mrazu do 130°C. Je vysoce chemicky odolný (kyseliny, zásady), má nižší odolnost vůči aromatickým a alifatickým rozpouštědlům. Díky své nepolární struktuře má dobré elektroizolační vlastnosti.

6.3.2 Využití

Mezi technologie, kterými můžeme zpracovávat polypropylen, patří následující:

- vyfukování - fólie, duté nádoby,
- vstřikování - složitější výrobky,
- vytlačování - profily, trubky,
- svařování, tepelné tvarování.

Výrobky z polypropylenu nachází uplatnění v mnoha odvětvích, konkrétně v automobilovém a chemickém průmyslu, výrobě domácích spotřebičů, hraček, obalů, umělých vláken a mnoha dalších.

7 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝSLEDKŮ

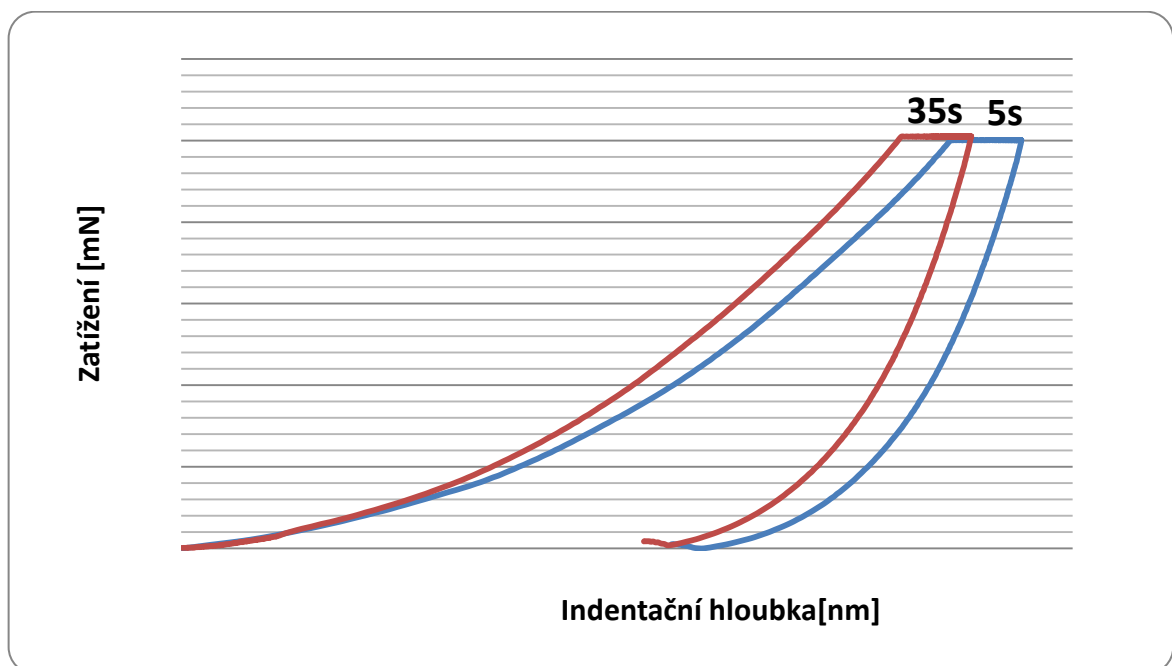
7.1 Doba chlazení při zatížení 0,5N

Při měření mikrotvrdomosti bylo provedeno 10 měření. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a znázorněny v grafech.

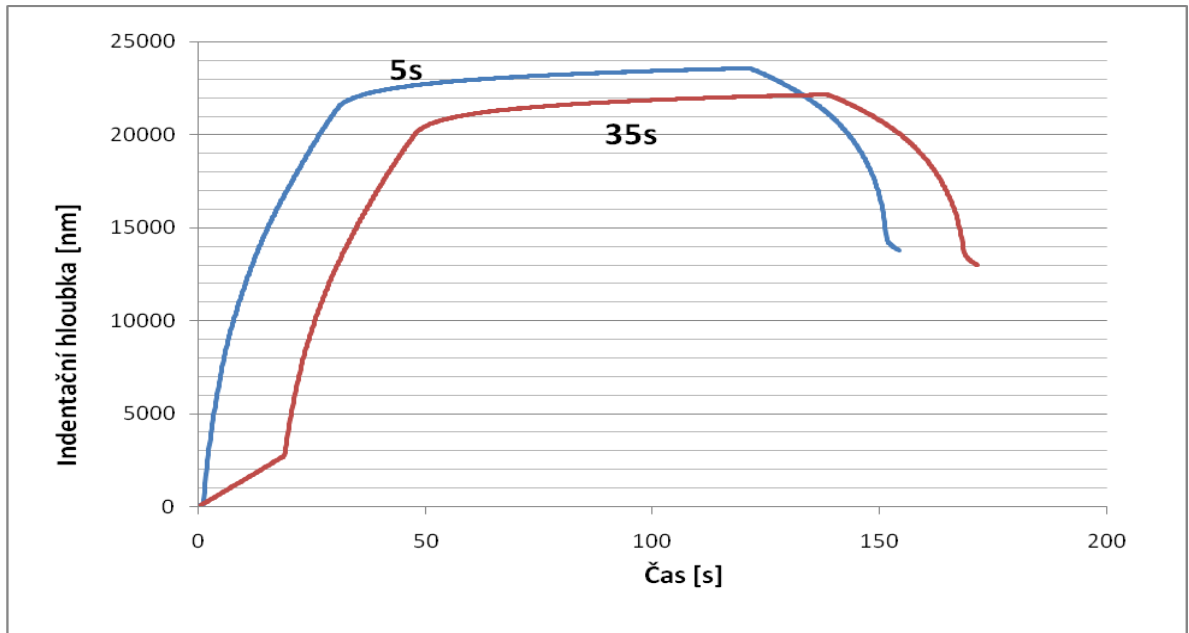
V grafech můžeme vidět znázorněnou směrodatnou odchylku v podobě úsečky na vrcholu sloupce. Délka úsečky znázorňuje velikost chyby měření.

Tab. 6. Hodnoty doby chlazení při zatížení 0,5N

	5s	15s	25s	35s
H_{IT} [Mpa]	47,8141	48,7975	54,4734	55,0053
E_{IT} [Gpa]	0,99341	0,96672	1,04646	1,14909
C_{IT} [%]	9,669	10,02	10,372	10,74
HV_{IT} [Vickers]	4,51296	4,60579	5,14153	5,19171
W_{elast} [μ J]	1,2814	1,30474	1,28123	1,29662
W_{plast} [μ J]	3,33635	3,31191	3,2167	3,25244
n_{IT} [%]	27,793	28,33	28,518	28,516



Obr. 18 Závislost zatížení na indentační hloubce

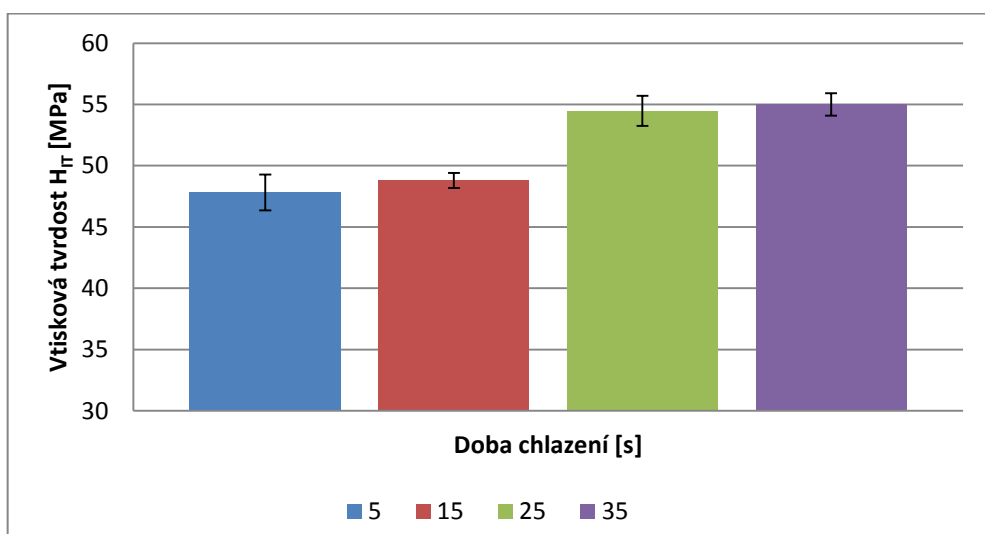


Obr. 19 Závislost indentační hloubky na čase

Na obr. 17 a 18 můžeme vidět graficky znázorněny indentační charakteristiky stanovené metodou DSI. Máme zde zaznamenány nejvíce rozdílné hodnoty měření.

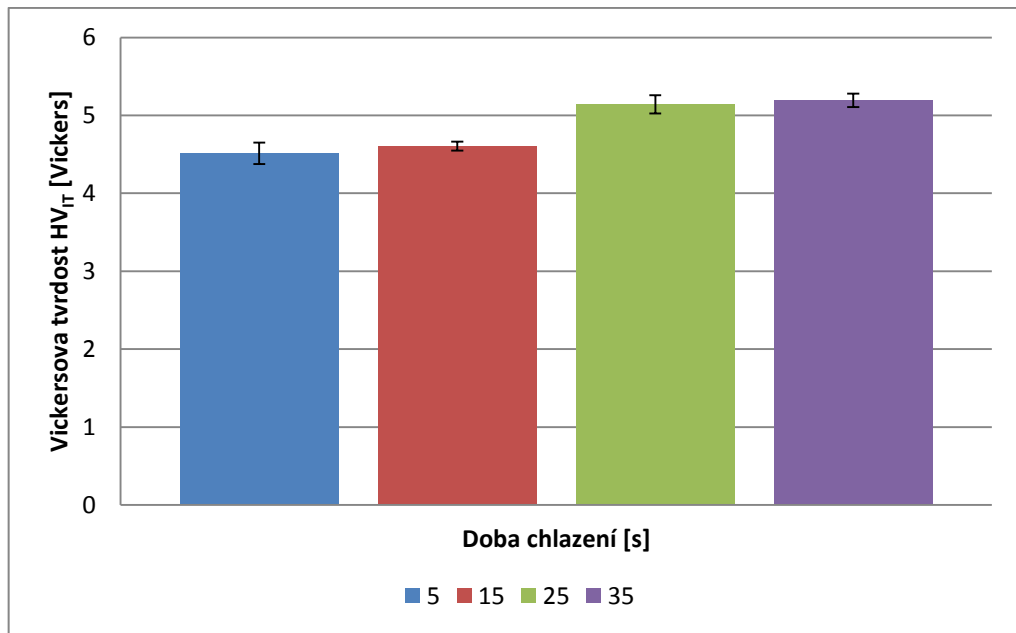
Závislost indentační hloubky na zatěžující síle je znázorněna na obr. 17. Tyto indentační křivky dávají možnost získat hodnoty vtiskové tvrdosti, vtiskového modulu a velikosti deformační elastické, plastické a celkové práce potřebné pro vytvoření vtisku.

Obrázek 18 znázorňuje závislost indentační hloubky na čase indentace. Díky tomu můžeme určit například creepové chování testovaného materiálu nebo také relaxaci materiálu.



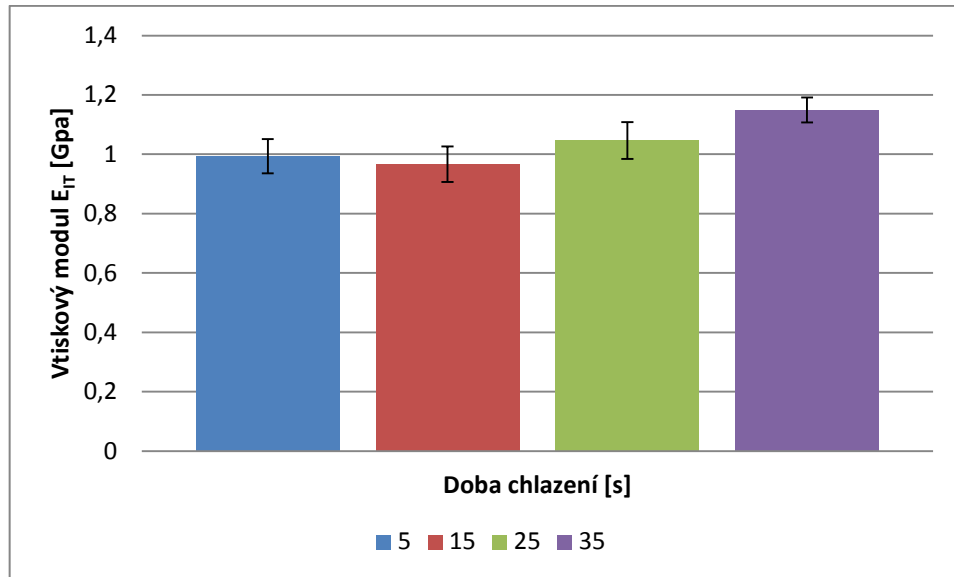
Obr. 20 Vtisková tvrdost

Vtisková tvrdost patří mezi základní mechanické vlastnosti určené pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti. Je definována jako maximální zatěžující síla, která je podělena průmětem kontaktní plochy. Z výsledků měření mikrotvrdosti bylo zjištěno, že nejmenší vtisková tvrdost byla při čase vstřikování 5s, naopak největší vtisková tvrdost byla naměřena při čase vstřikování 35s. Rozdíl mezi nejmenší a naopak nejvyšší hodnotou je 13%.



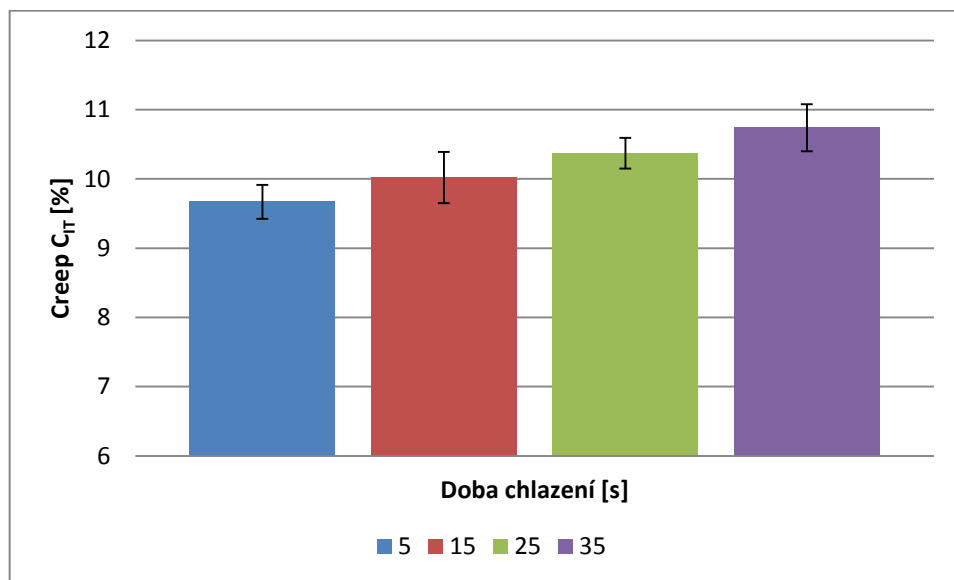
Obr. 21 Vickersova tvrdost

Metodou DSI je možné kromě vtiskové tvrdosti také určit hodnotu Vickersovy tvrdosti. Vickersova tvrdost patří mezi standardně používané metody pro určování tvrdosti. Při měření mikrotvrdosti Vickersovou metodou byla naměřena nejmenší tvrdost při čase vstřikování 5s, naopak největší tvrdost byla při době chlazení 35s. Rozdíl mezi nejmenší a největší hodnotou je 13%.



Obr. 22 Vtiskový modul

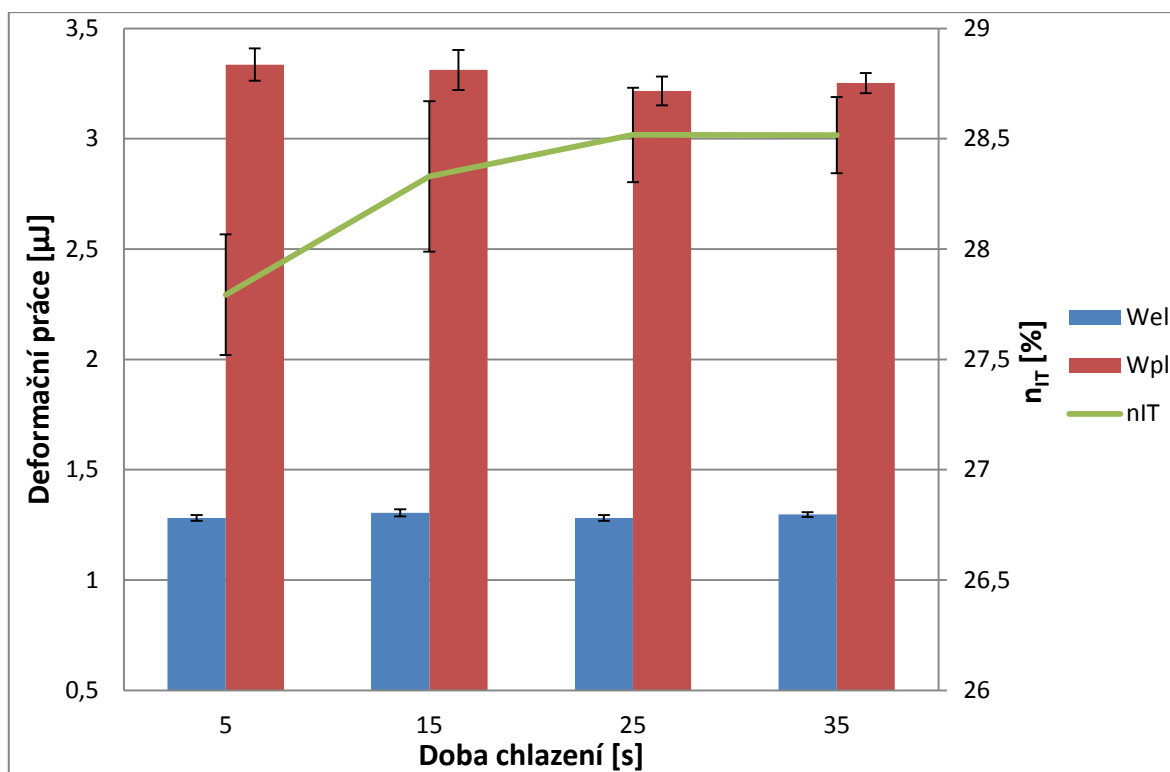
Mezi velmi důležité materiálové vlastnosti patří modul pružnosti. Pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti je možné určit vtiskový modul, který do značné míry odpovídá modulu pružnosti určený z tahové zkoušky. Můžeme vidět, že nejmenší vtiskový modul je při čase vstřikování 15s. Avšak největší vtiskový modul je při době chlazení 35s. Rozdíl mezi nejmenší a největší hodnotou je 13,5%.



Obr. 23 Vtiskové tečení

Pro popis chování polymerních materiálů je velmi důležitou vlastností creepové chování, které určuje, jak materiál teče v čase. Vtiskové tečení určené metodou DSI se projeví postupným propadáváním indentoru při dosaženém zatížení a následné výdrží na tomto zatí-

žení. Za pomoci metody DSI můžeme vtiskové tečení zjistit během pár desítek minut. Na rozdíl od konvenčních zkoušek, které trvají řádově několik hodin. Vtiskové tečení se nám projevuje postupným propadáváním indentoru, je určeno ze závislosti indentační hloubky na indentačním čase. Pozorujeme, že vtiskové tečení materiálu je nejmenší při 5s, avšak největší vtiskové tečení nastává při 35s.



Obr. 24 Deformační práce

Z naměřených výsledků je zjevné, že došlo ke změně deformační práce. Největší elastická deformační práce byla naměřena při čase vstřikování 15s. Naopak nejmenší deformační elastická práce byla naměřena při čase vstřikování 25s. U plastické deformační práce byla naměřena největší hodnota při čase vstřikování 5s. Nejmenší hodnota plastické deformační práce byla při čase vstřikování 25s. Největší hodnota u koeficientu zpětné deformace byla naměřena při 25s, naopak nejmenší hodnota byla naměřena při čase vstřikování 5s.

Z naměřených výsledků je zřejmé, že změna doby chlazení má vliv na mikro-mechanické vlastnosti určené metodou DSI. Jak bylo určeno při měření, nízká doba chlazení se projevila ve výsledcích tvrdosti, modulu i creepu snížením všech hodnot v porovnání s delší dobou chlazení. Jako ideální doba chlazení pro PP se jeví 25 a 35 sekund, kdy mechanické vlastnosti byly nejvyšší.

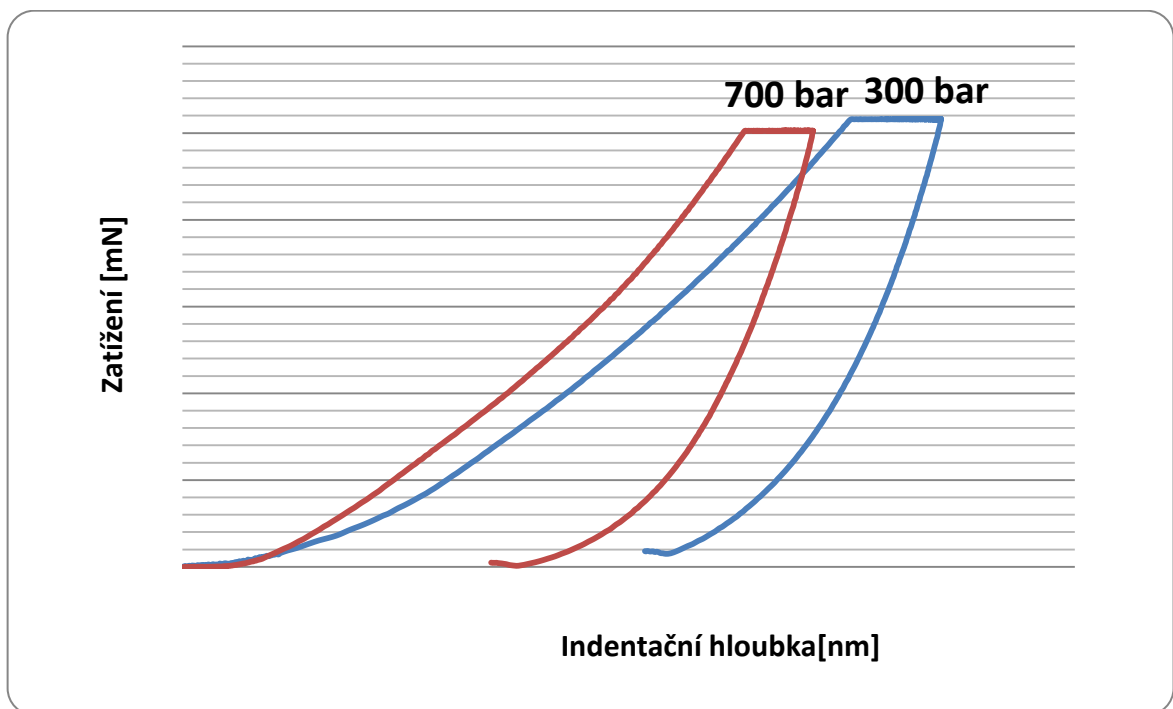
Při době chlazení 5s byl vyhozen výrobek z dutiny formy ještě ne zcela zchlazen a tudíž došlo k deformacím vzorku z důvodu, že vzorek nebyl při chladnutí fixován v dutině formy.

7.2 Dotlak formy při zatížení 0,5N

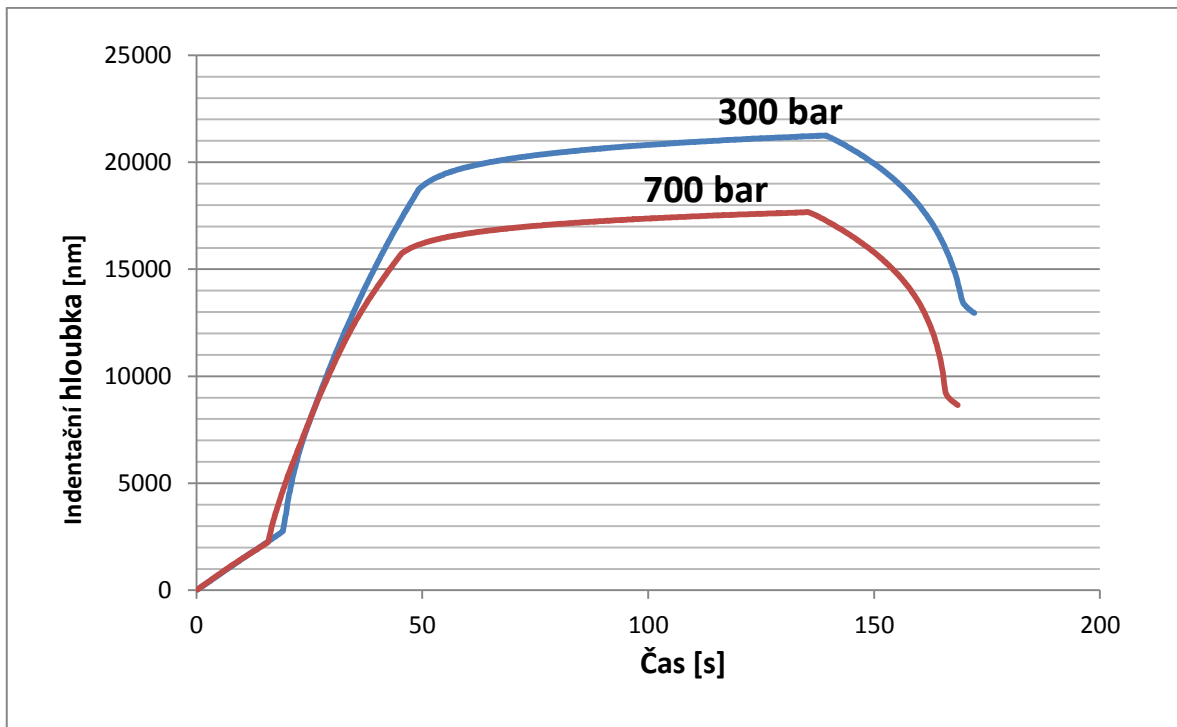
Dalším měřeným parametrem byla změna dotlaku, která se pohybovala v rozmezí 300-800 barů.

Tab. 7. Hodnoty dotlaku formy při zatížení 0,5N

	300bar	400bar	500bar	600bar	700bar	800bar
H_{IT} [Mpa]	59,5366	63,433	66,9611	81,1233	84,8414	62,9522
E_{IT} [Gpa]	1,10887	1,19638	1,43127	1,56156	1,62692	1,18787
C_{IT} [%]	15,689	13,476	13,378	15,126	13,817	13,911
HV_{IT} [Vickers]	5,6194	5,98721	6,32019	7,65691	8,00785	5,94181
W_{elast} [μ J]	1,39523	1,33124	1,33565	1,27425	1,26014	1,3376
W_{plast} [μ J]	3,73538	3,16112	2,97986	2,84266	2,76885	3,46702
η_{IT} [%]	27,22	29,671	30,958	31,003	31,302	27,853

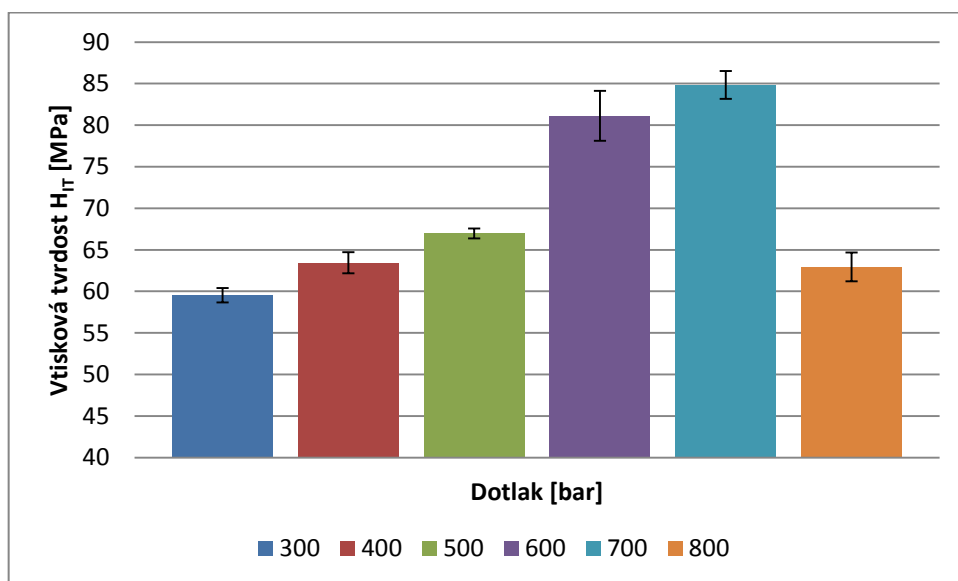


Obr. 25 Závislost zatížení na indentační hloubce



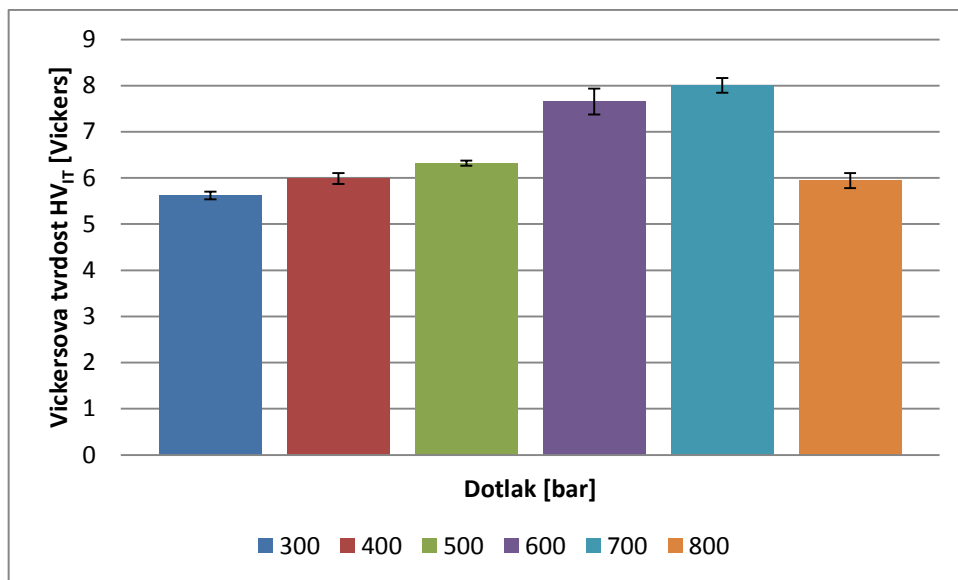
Obr. 26 Závislost indentační hloubky na čase

Na obr. 24 a 25 pozorujeme změnu dotlaku formy – jeden z nejdůležitějších parametrů. Při malém dotlaku díl není naplněn, při velkém dotlaku dochází k tzv. přestřikům – uzavírací síla stroje není schopna udržet materiál uvnitř formy.



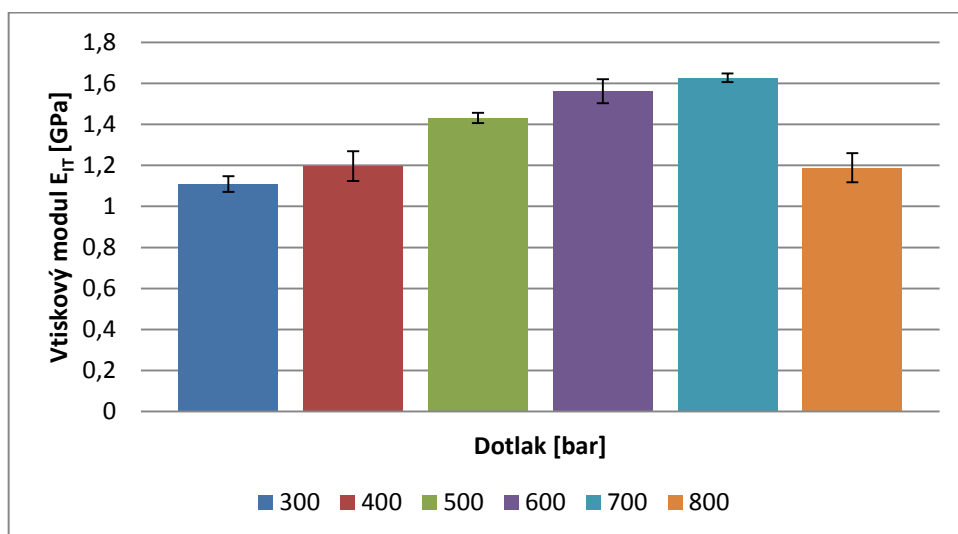
Obr. 27 Vtisková tvrdost

Jak je zřejmé z obrázku 27 změna dotlaku má podstatný vliv na mechanické vlastnosti (vtiskovou tvrdost). Při instrumentované zkoušce mikrotvrdości byla naměřena nejmenší vtisková tvrdost při dotlaku 300bar naopak největší hodnota nastává při dotlaku 700bar. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou je 30%. Vyšší hodnota dotlaku způsobila snížení vtiskové tvrdosti.



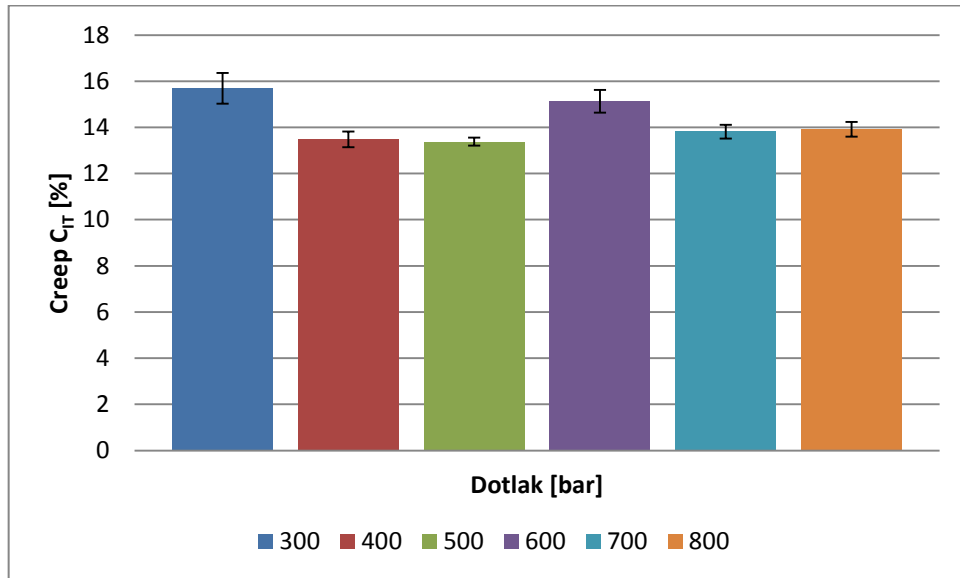
Obr. 28 Vickersova tvrdost

Podobných výsledků jako u vtiskové tvrdosti bylo naměřeno u Vickersovy tvrdosti. Největší Vickersova tvrdost nastává při dotlaku 700bar, nejnižší Vickersova tvrdost při dotlaku 300bar. Jako neoptimálnější se nám jeví dotlak 600 a 700bar.



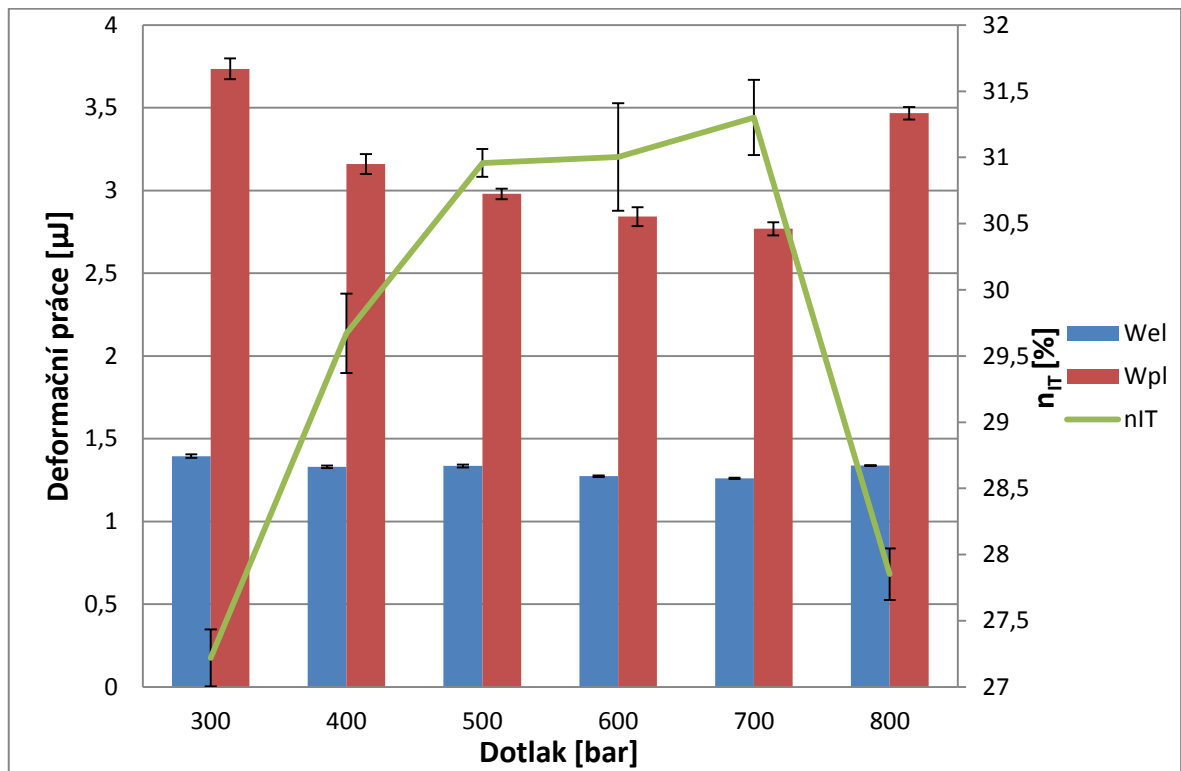
Obr. 29 Vtiskový modul

Vtiskový modul se nám vyvíjí podobně jako při vtiskové tvrdosti a Vickersově tvrdosti. Největší hodnota je při dotlaku 700bar. Nejnižší při 300bar.



Obr. 30 Vtiskové tečení

Vtiskové tečení se až na malé výjimky liší jen minimálně. Největší hodnota je při 300 barech, nejmenší hodnota při 500 barech.



Obr. 31 Deformační práce

Práce elastická je na nejnižší úrovni při dotlaku 700bar nejvyšší při dotlaku 300bar. Práce plastická má nejnižší a nejvyšší hodnoty stejně jako u práce elastické při 700bar a 300bar. Koeficient zpětné deformace je nejnižší při dotlaku 300bar a nejvyšší při 700bar.

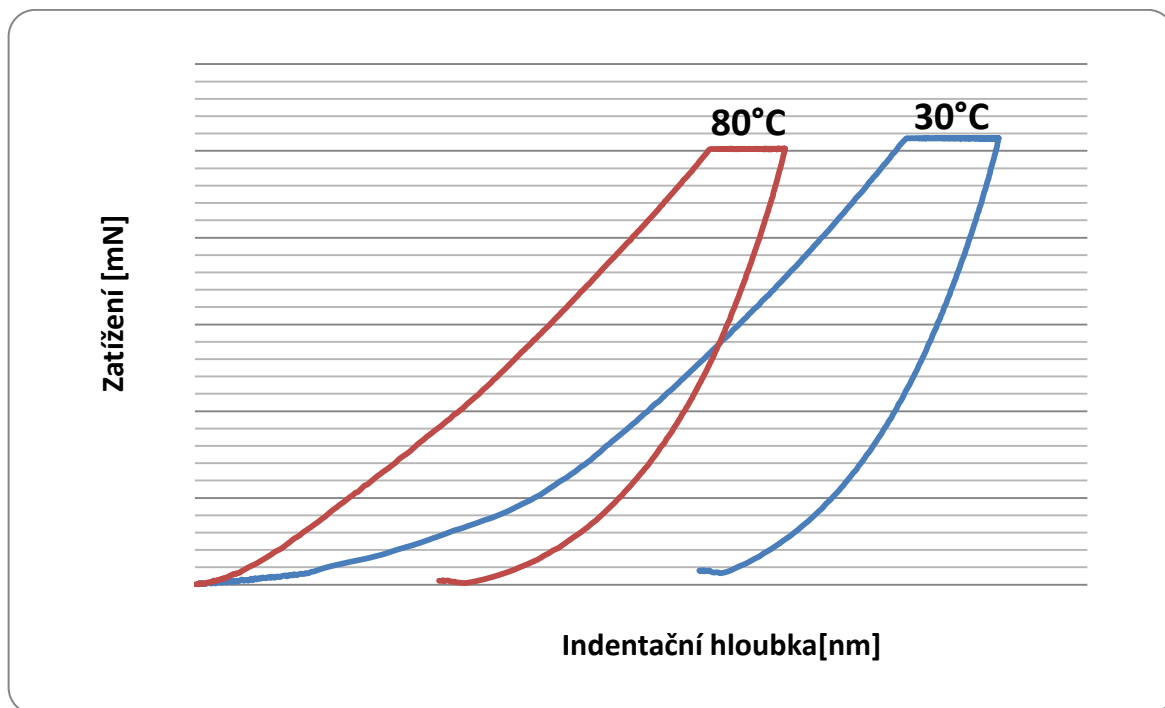
Z naměřených výsledků pozorujeme, že při změně dotlaku formy se mění mikro-mechanické vlastnosti. Nízký dotlak formy se projevil v hodnotách tvrdosti a modulu snížením hodnot v porovnání s větším dotlakem formy. Jako ideální dotlak formy se nabízí 600 a 700barů. Za tohoto dotlaku jsou jeho mechanické vlastnosti nejvyšší. Nízká hodnota dotlaku může mít za následek nedostatečné doplnění materiálu do dutiny formy a tím snížení hodnot tvrdosti. Naopak vysoká hodnota dotlaku může způsobit vytlačení taveniny ven z dutiny formy.

7.3 Teplota formy při zatížení 0,5N

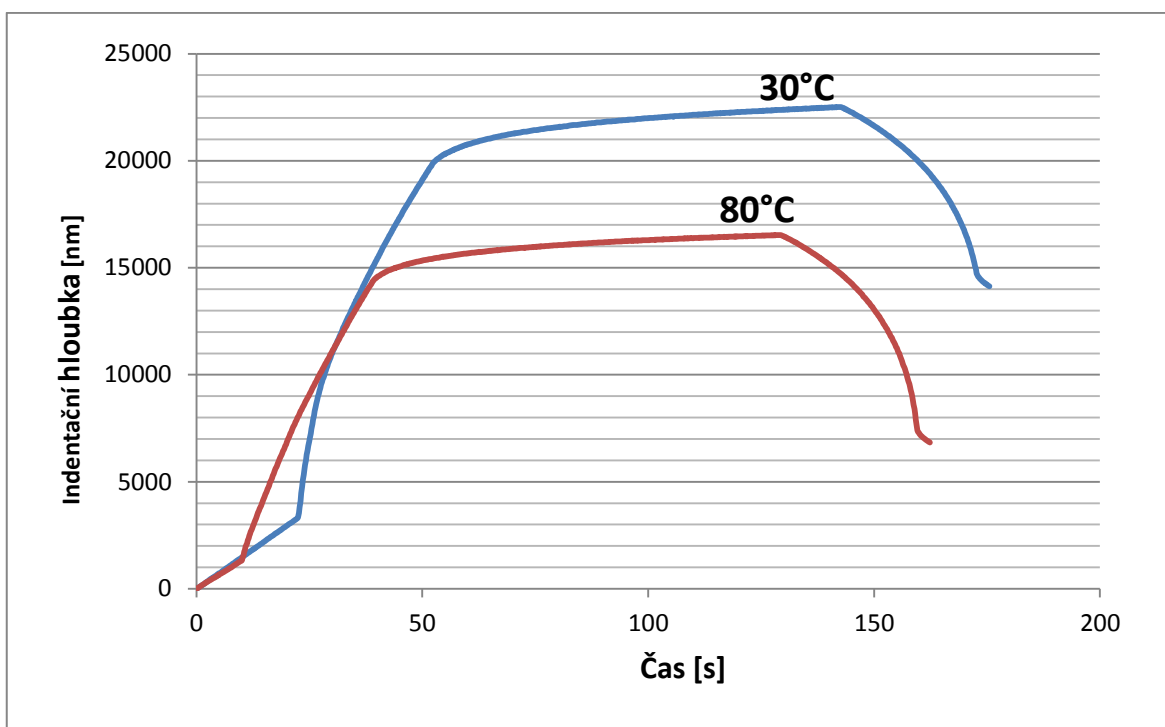
Jako velmi důležitý parametr při vstřikování polymerů do dutiny formy je její teplota. Teplota formy byla naměřena v rozsahu od 30°C až do 90°C, což je maximální možná hodnota, kterou umožňuje teplota.

Tab. 8. Hodnoty teploty formy při zatížení 0,5N

	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
H_{IT} [Mpa]	59,5505	61,1284	84,2685	97,035	94,0219	102,957	82,7047
E_{IT} [Gpa]	1,17923	1,1878	1,48893	1,59079	1,61375	1,76453	1,58356
C_{IT} [%]	14,59	13,645	17,74	17,466	14,351	14,603	12,897
HV_{IT} [Vickers]	5,62073	5,76966	7,95376	9,15866	8,87436	9,71771	7,80615
W_{elast} [μ J]	1,39798	1,2855	1,40546	1,36861	1,36925	1,35201	1,3284
W_{plast} [μ J]	3,38206	3,13482	3,04464	2,68347	2,75962	2,68	2,7716
n_{IT} [%]	29,275	29,116	31,599	33,788	33,178	33,545	32,436

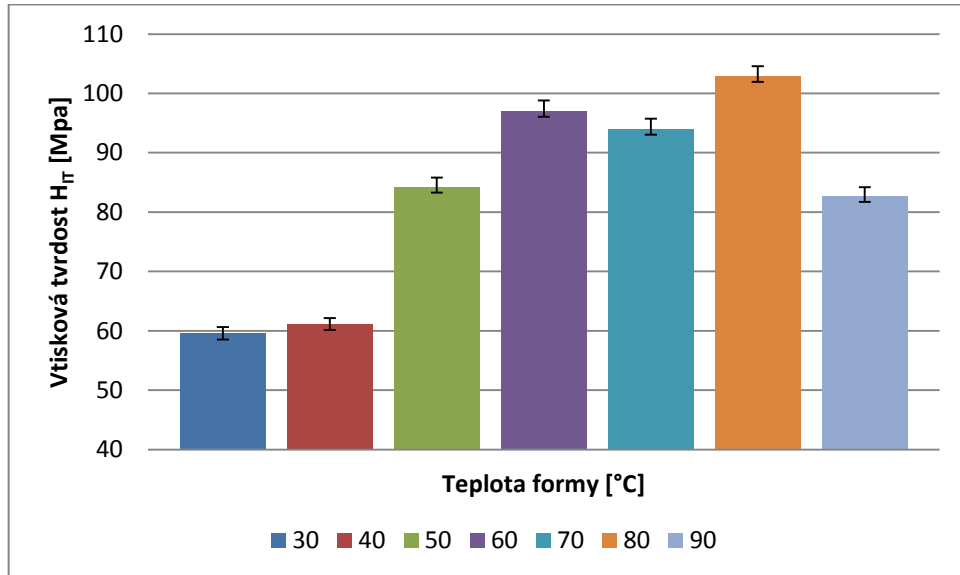


Obr. 32 Závislost zatížení na indentační hloubce



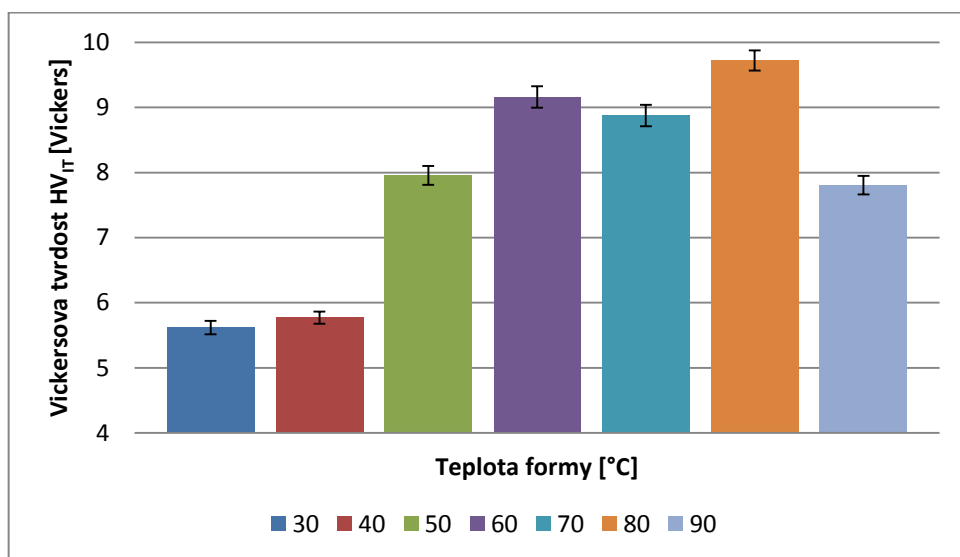
Obr. 33 Závislost indentační hloubky na čase

Na obrázku 31 a 32 pozorujeme nejmenší a největší teplotu formy. Tedy 30°C a 80°C. Jak můžeme vidět z rozdílů hloubek u teploty formy 30°C a 80°C, došlo k významným změnám v mikro-mechanických vlastnostech.



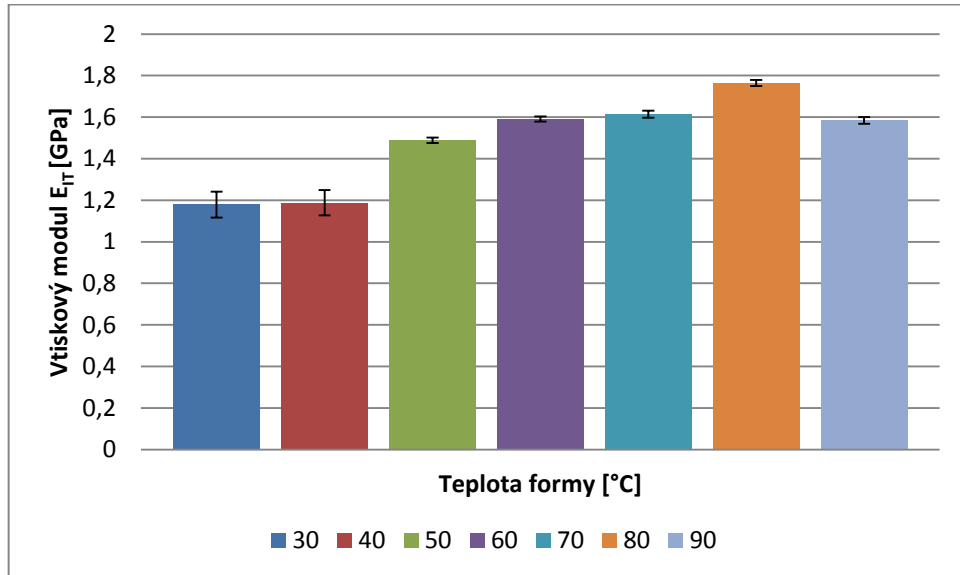
Obr. 34 Vtisková tvrdost

Jak je vidět v obr. 34 teplota formy má podstatný vliv na vtiskovou tvrdost potažmo na všechny mechanické vlastnosti. Nízká teplota formy zapříčiňuje snížení tvrdosti. Naopak vyšší teplota formy má za následek zvýšení tvrdosti. Vtisková tvrdost je nejnižší při teplotě formy 30°C, naopak největší při teplotě 80°C. Jako optimální oblast teploty formy pro vstřikování PP se jeví 60°C až 80°C, kdy tvrdost byla nejvyšší. Rozdíl mezi teplotou formy při 30°C a 80°C je 42 %.



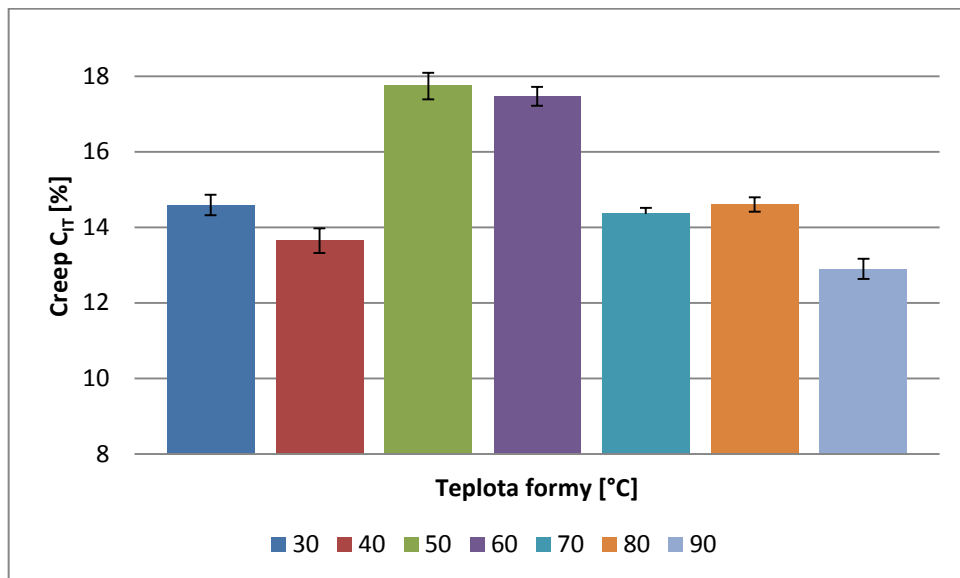
Obr. 35 Vickersova tvrdost

Vickersova tvrdost z hlediska grafu vypadá více méně stejně jako vtisková tvrdost. Nejmenší hodnota je při teplotě 30°C. Naopak největší Vickersova tvrdost je při teplotě formy 80°C.



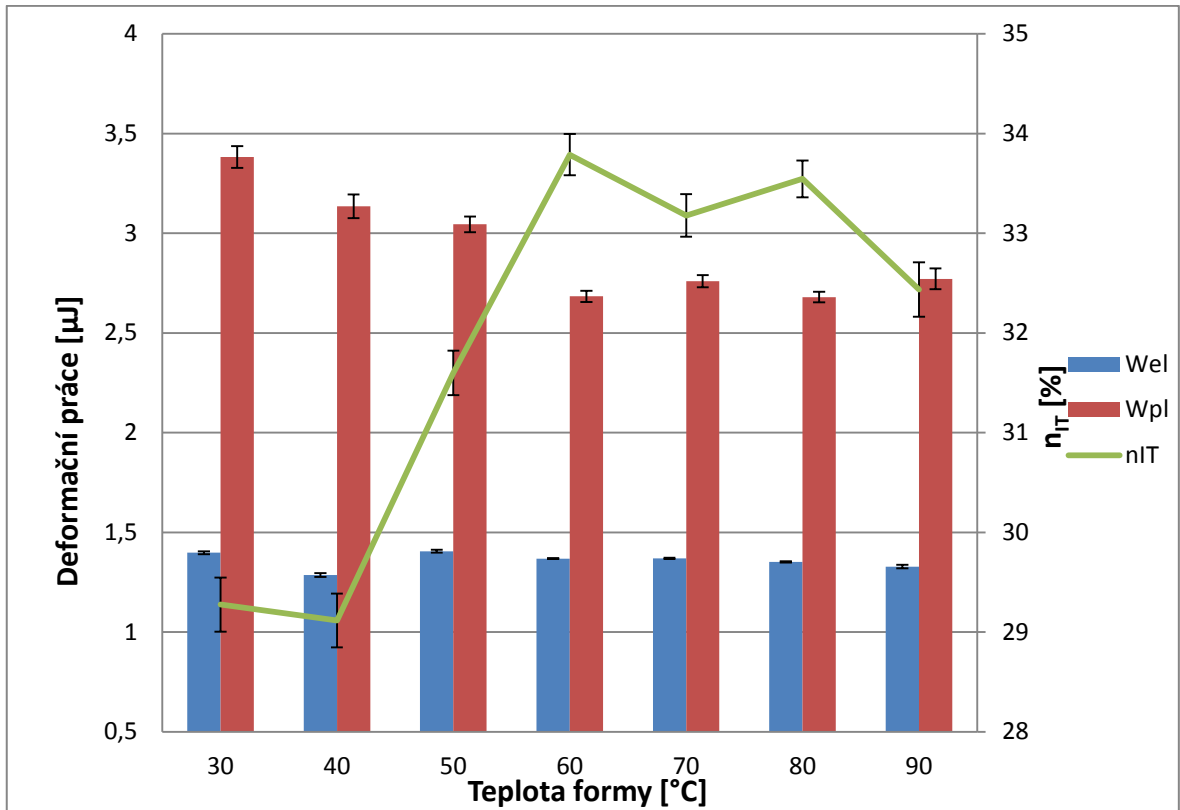
Obr. 36 Vtiskový modul

Vtiskový modul je nejnižší při teplotě formy 30°C, nejvyšší při teplotě formy 80°C. Rozdíl mezi teplotou formy 30°C a 80°C u vtiskového modulu činí 33 %.



Obr. 37 Vtiskové tečení

Vtiskové tečení creep má nejnižší hodnotu při teplotě formy 90°C, naopak nejvyšší vtiskové tečení nastává při teplotě formy 50°C.



Obr. 38 Deformační práce

K významným materiálovým parametrům získaných při měření mikrotvrdosti je práce elastická a plastická. Práce elastická má nejnižší hodnotu při 40°C a nejvyšší při 50°C. Práce plastická má nejnižší hodnotu při 60°C a nejvyšší při 30°C. Koeficient zpětné deformace má nejnižší hodnotu při 40°C, naopak nejvyšší při 60°C.

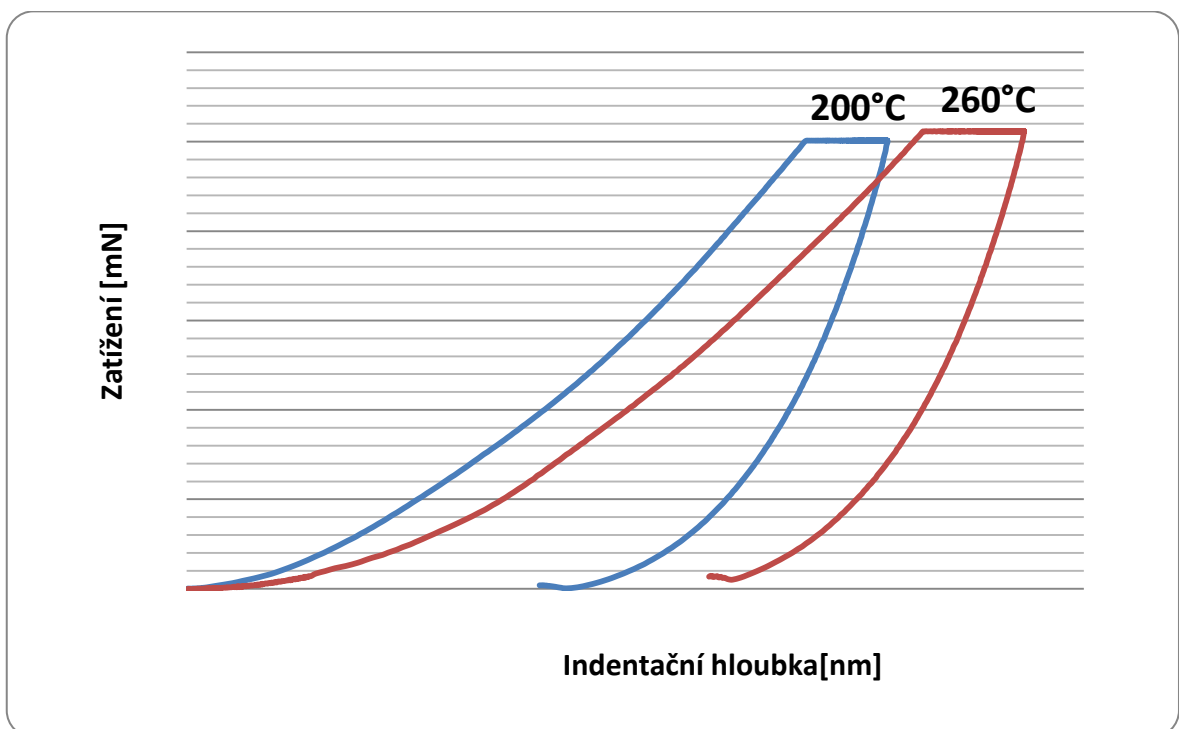
Z výsledků je vidět, že se změnou teploty formy došlo ke změně vlastností určené metodou DSI. Pozorujeme, že při nízkých teplotách jsou hodnoty tvrdosti, modulu a creepu hodně malé v porovnání s rostoucí teplotou formy. Ideální teplota formy nastává při 80°C, zde dosahuje maximum svých mechanických vlastností. Při 90°C nám nastává propad a hodnoty klesají, tudíž již tato teplota formy není vhodná.

7.4 Teplota taveniny při zatížení 0,5N

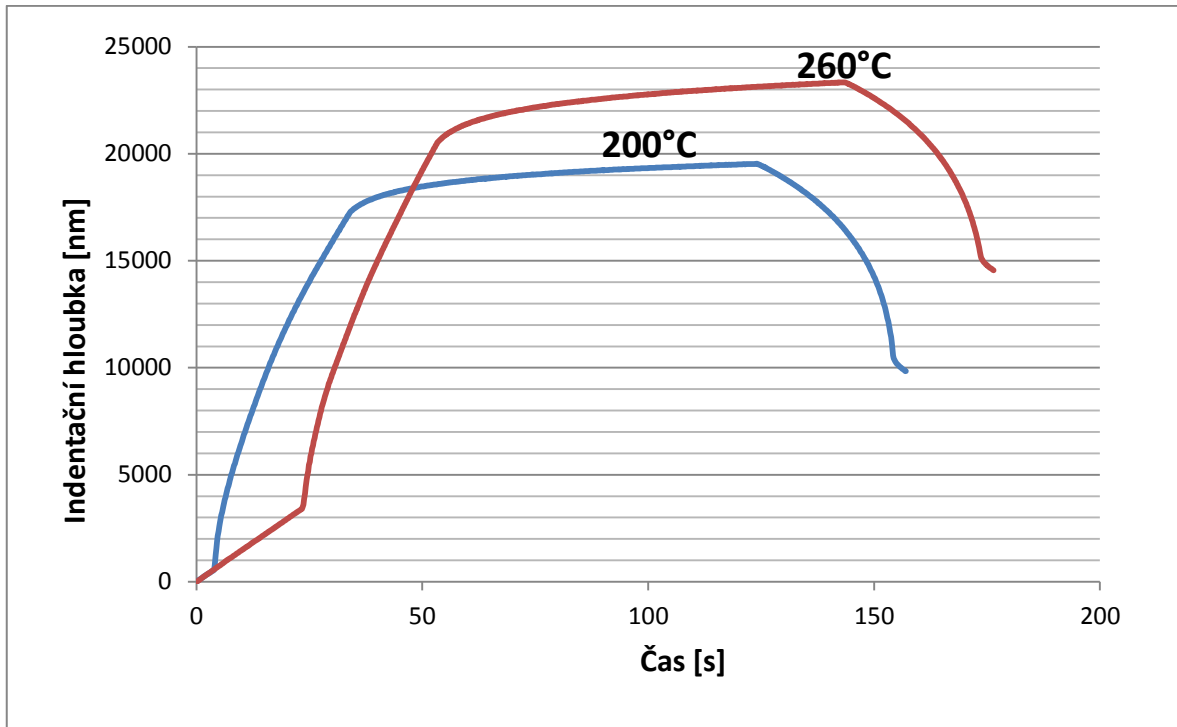
Teplota taveniny byla měněna v rozsahu teplot 200°C až 260°C.

Tab. 9. Hodnoty teploty taveniny při zatížení 0,5N

	200°C	220°C	240°C	260°C
H_{IT} [Mpa]	70,2027	59,0444	57,0015	55,9689
E_{IT} [Gpa]	1,47295	1,11463	0,98569	1,02391
C_{IT} [%]	13,758	13,823	12,498	14,006
HV_{IT} [Vickers]	6,62615	5,57296	5,38015	5,28265
W_{elast} [μ J]	1,31063	1,33469	1,32517	1,36384
W_{plast} [μ J]	3,10142	3,45911	3,3566	3,45591
n_{IT} [%]	29,771	27,841	28,341	28,31

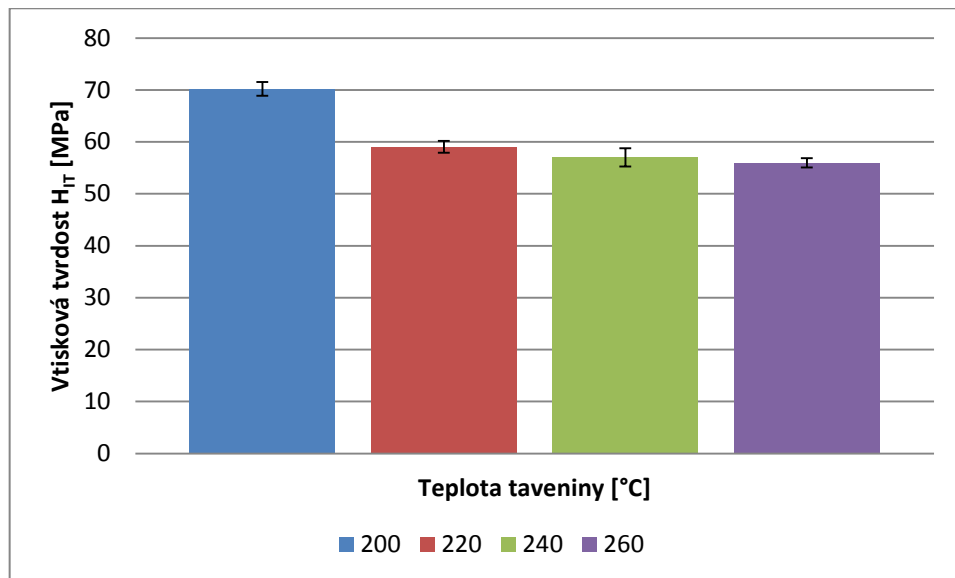


Obr. 39 Závislost zatížení na indentační hloubce



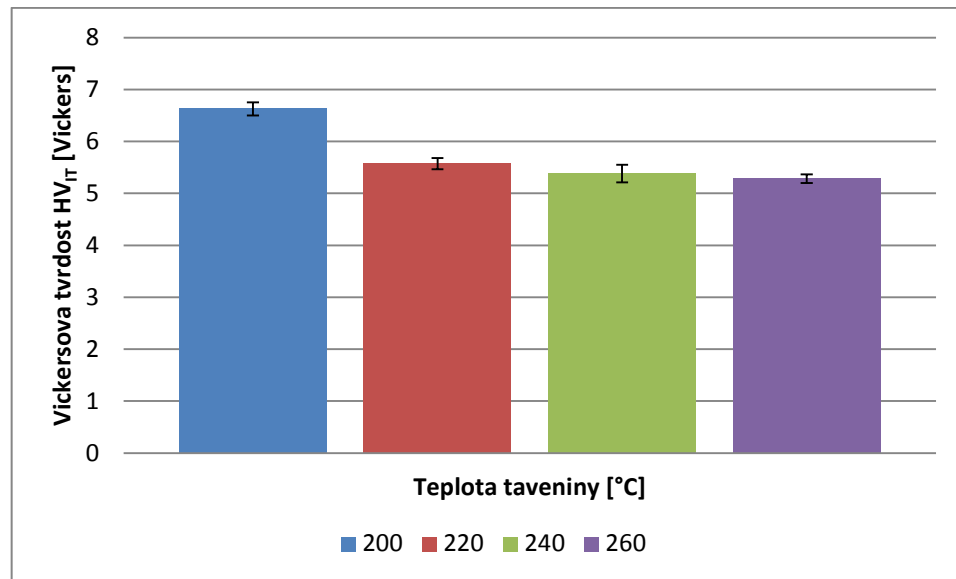
Obr. 40 Závislost indentační hloubky na čase

Na obrázku 38 a 39 porovnáváme nejvyšší hodnotu teploty taveniny, která činí 260°C s nejnižší, která je 200°C. Už při prvotním pohledu je zřejmý rozdíl v mechanických vlastnostech testovaného PP.



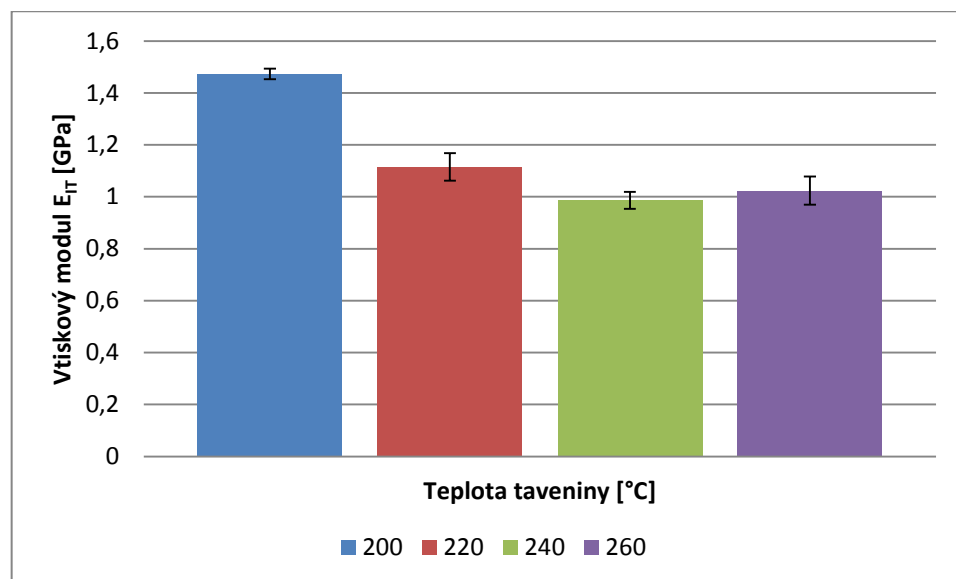
Obr. 41 Vtisková tvrdost

Jak je vidět na obrázku 41 s rostoucí teplotou taveniny klesá vtisková tvrdost. Nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti nastala při 200°C naopak nejnižší při 260°C. Rozdíl maximální a minimální hodnotou je 20%.



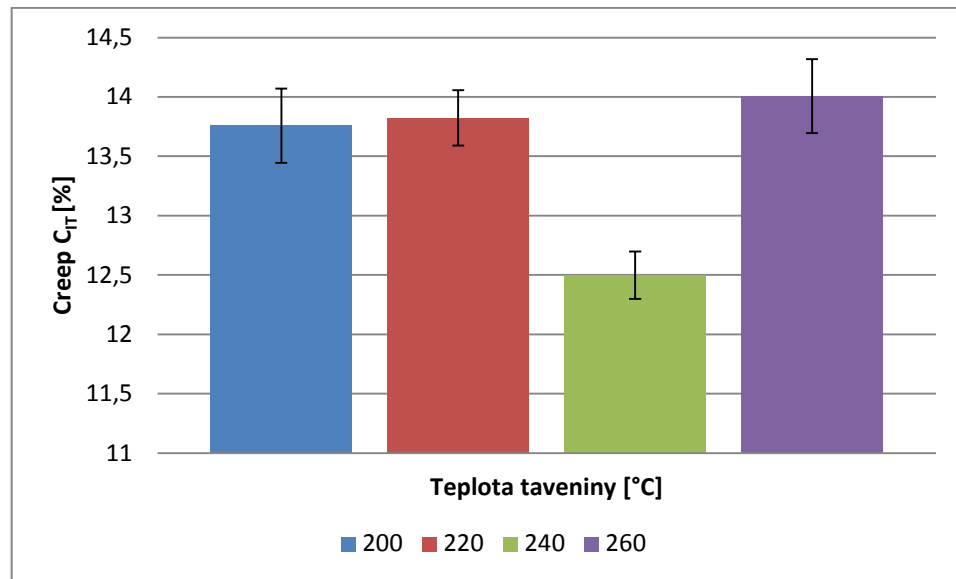
Obr. 42 Vickersova tvrdost

Se zvyšující se teplotou taveniny pozorujeme, že Vickersova tvrdost klesá. Nejvyšší hodnoty dosahuje při 200°C naopak nejmenší při teplotě taveniny 260°C.

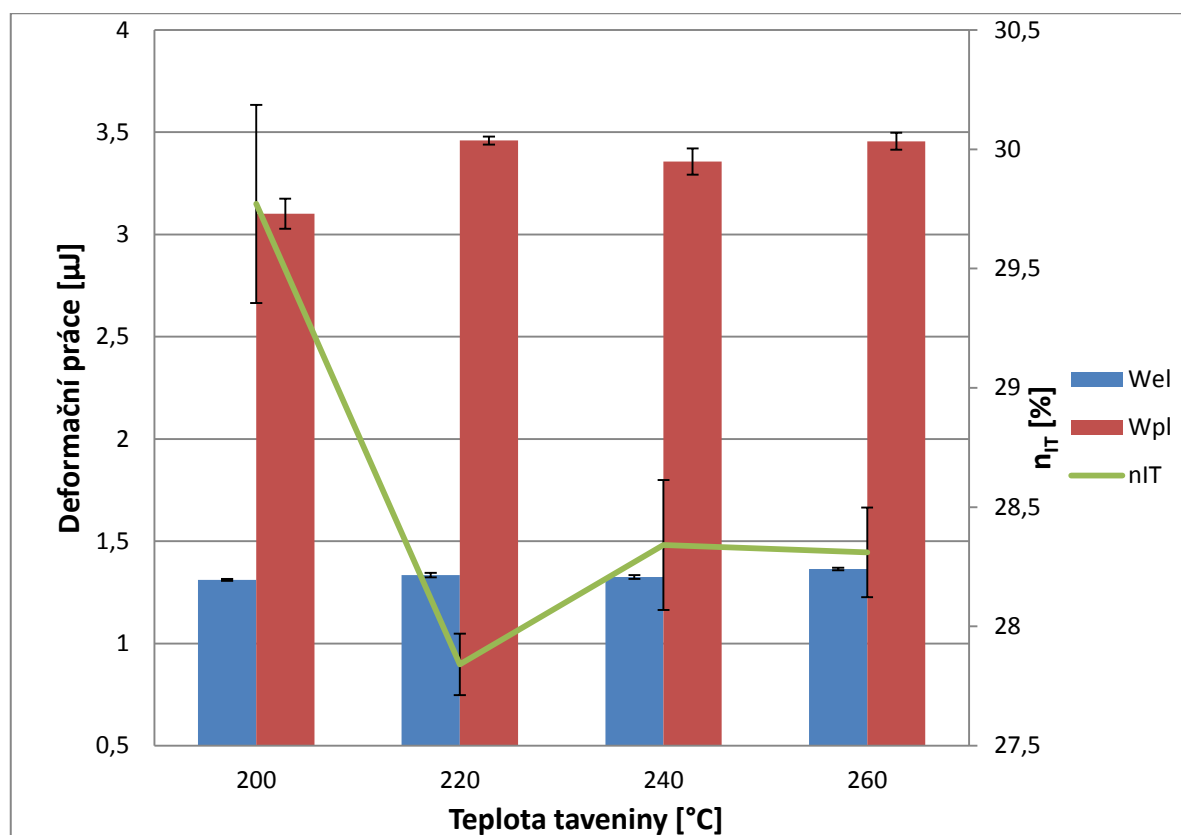


Obr. 43 Vtiskový modul

Z výsledků měření vtiskového modulu je vidět, že největší hodnotu modulu získal vzorek vstříkovaný při teplotě taveniny 200°C, naopak nejmenší při teplotě taveniny 240°C.

*Obr. 44 Vtiskové tečení*

Největší vtiskové tečení nastává při teplotě taveniny 260°C, naopak nejnižší při teplotě taveniny 240°C.

*Obr. 45 Deformační práce*

Práce elastická má nejnižší hodnotu při 200°C, nejvyšší při teplotě taveniny 260°C. Práce plastická má nejnižší hodnotu při 200°C, nejvyšší při teplotě 220°C. Koeficient zpětné deformace je nejvyšší při teplotě taveniny 200°C, naopak nejnižší při teplotě taveniny 220°C.

Z posledních naměřených hodnot je zřejmé, že s rostoucí teplotou taveniny dochází k poklesu modulu i tvrdost. Jako ideální se jeví teplota taveniny 200°C. Za této teploty se tavenina nejlépe pohybuje a zateče do všech míst formy. Creepové chování je zde zcela zvláštní nejprve nám mírně stoupá, poté prudce klesá a následně zase stoupá. Vyšší hodnoty teploty taveniny způsobují pokles mechanických vlastností, což může být způsobeno degradací materiálu díky vysoké teplotě.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním vlivů při změně doby chlazení, dotlaku, teploty formy a teploty taveniny při zatížení 0,5N na výsledné mechanické vlastnosti. Na konci každého cyklu měření byl zhodnocený daný proces. V mém případě jsem se zaměřil na vtiskovou tvrdost, Vickersovu tvrdost, vtiskový modul, vtiskové tečení (creep), koeficient zpětné deformace, plastickou a elastickou deformační práci, které jsou staticky vyhodnoceny.

Pro měření mikrotvrdosti metodou DSI byl vybrán vzorek polypropylen. Měření probíhalo na přístroji Micro-Combi-Tester od společnosti CSM. Vzorky byly zatíženy vždy stejnou silou 0,5N. Jako zkušební indentor byl použit Vickers. Na každém vzorku polypropylenu proběhlo deset měření. Měření probíhalo na různých místech vzorku. Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulky a následně byly vyhodnoceny v grafech.

Při změnách doby chlazení pozorujeme vliv na mikro-mechanické vlastnosti určené metodou DSI. Jak bylo pozorováno při měření, nízká doba chlazení se projevila ve výsledcích tvrdosti, modulu i creepu snížením všech hodnot v porovnání s delší dobou chlazení. Jako ideální doba chlazení pro PP se jeví 25 a 35 sekund, při těchto dobách jsou mechanické vlastnosti nejvyšší.

Při změně dotlaku došlo také ke změně mikro-mechanické vlastnosti. Nízký dotlak formy se projevil v hodnotách tvrdosti a modulu snížením hodnot v porovnání s větším dotlakem formy. Z toho vyplývá, že ideální dotlak formy je při 600 a 700 barech. Za tohoto dotlaku jsou jeho mechanické vlastnosti nejvyšší. Při nízkém dotlaku může dojít k nedostatečnému naplnění formy, což má za následek snížení hodnot tvrdosti. Vysoká hodnota dotlaku se projevila vytlačáním taveniny ven z dutiny formy.

Při změnách teploty formy se mění vlastnosti určené metodou DSI. Bylo zjištěno, že při nízkých teplotách formy jsou hodnoty tvrdosti, modulu i creepu velmi malé v porovnání s rostoucí teplotou formy. Ideální teplota formy je při 80°C, zde dosahuje maximum svých mechanických vlastností. Při 90°C hodnoty prudce klesají, tím pádem teplota formy není vhodná.

Při posledním měření byla pozorována změna teploty taveniny. S rostoucí teplotou taveniny nám tvrdost i modul klesají. Jako ideální teplota taveniny se jeví 200°C. Za teploty 200°C se tavenina nejlépe pohybuje a zateče do všech míst formy. Vyšší hodnoty teploty taveniny nám způsobují pokles mechanických vlastností, což může být způsobeno degradací materiálu vlivem vysoké teploty.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Vyd. 1. Havlíčkův Brod : VŠCHT Praha, 2010. 212 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [2] Materiály ve strojírenství, [online], [cit. 2013-04-08], Dostupný z WWW:
<http://www.fme.vutbr.cz/opory>.
- [3] Navajo: Otevřená encyklopedie, [online], [cit. 2013-04-8], Dostupný z WWW:
<http://navajo.cz/>.
- [4] Technologie II, [online], Dostupný z WWW:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm.
- [5] DILLINGER, Josef, et al. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. PhDr. Miloslava Kučerová; RNDr. Jiří Handlír, CSc.. 1. vyd. Praha : Europa-Sobotáles cz.s.r.o., 2007. 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [6] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1999, 209 s. ISBN 8001015076.
- [7] PÍŠEK, František; VETIŠKA, Aleš; ŠKAREK, Jiří. *Nauka o materiálu II.* Vyd. 1. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. 660 s.
- [8] MĚŘENÍ TVRDOSTI. [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z WWW:
<http://www.merenitvrlosti.cz>.
- [9] SCHATZ, Miroslav, VONDRÁČEK, Petr. *Zkoušení polymeru*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1979. 264 s.
- [10] DOLEŽAL, Pavel; PACAL, Bohumil. *Hodnocení mikrotvrlosti struktur materiálů*. Brno: VUT, 2006. 41 s.
- [11] Tvrdost, [online], Dostupný z WWW:
<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdest-knoop.htm>.
- [12] Současné trendy v metodách měření [online]. 2010 Měření tvrdosti dle Berkovic [cit.2013-1-17]. Dostupné z WWW :

- <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27918>.
- [13] TICHAVA, Miroslav. *Měření tvrdosti pryže a plastů v současném zkušebnictví: Technická zpráva VUGPT Zlín*. Zlín 1985 s 31-34
- [14] Zkoušení materiálů a výrobků [online]. 2005 Měření tvrdosti dle Vickerse [cit. 2013-1-15]. Dostupné z WWW:
<<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/zkouska%20tvrdosti%20podle%20vickerse.doc>>.
- [15] HUDCOVIČ, M., Využití optimalizace vstřikovacího procesu při výrobě plastových dílů. Zlín, 2008. 110s. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [16] ČSN EN ISO 14577. *Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [17] LAPČÍK, Lubomír; RAAB, Miroslav, *Nauka o materiálech II*. Zlín: UTB ve Zlíně, 2004
- [18] DUŠEK, Jiří. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost - čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. 171 s. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [19] Tvrdost Rockwell. [online]. [cit. 2014-04-17]. Dostupné z:
<http://www.convert.cz/jednotky/tvrdost-rockwell.htm>.
- [20] Vickers, Brinell. [online]. [cit. 2014-04-17]. Dostupné z:
<http://www.qpgmbh.de/cz/laborato345/zkousky-tvrdosti.html>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
F_0	Předběžné zatížení
F_1	Přídavné zatížení
F	Zatížení
h	Hloubka vtisku
D, d	Průměr
$d_{1,2}$	Aritmetický průměr úhlopříček
g_f	Síla zatěžování
ČSN	Česká státní norma
ISO	Mezinárodní technická norma
HB	Tvrдость podle Brinella
HR	Tvrдость podle Rockwella
HV	Tvrдость podle Vickerse
°C	Stupeň Celsia
W	Zkušební zatížení
H_{IT}	Vtisková tvrдость
C_{IT}	Vtiskové tečení
E_{IT}	Vtiskový modul
n_{IT}	Koeficient zpětné deformace
F_{max}	Maximální zkušební zatížení
A_p	Průmět (příčný řez)
E_r	Redukovaný modul
E_i	Modul vnikacího tělesa

W_{plast} Práce plastická

W_{elast} Práce elastická

W_{total} Práce celková

PP Polypropylen

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Základní rozdělení polymerů</i>	12
<i>Obr. 2 Vstříkovací stroj [5]</i>	14
<i>Obr. 3 Schéma vstříkovacího cyklu</i>	16
<i>Obr. 4 Digitální stolní tvrdoměr Rockwell</i>	19
<i>Obr. 5 Zkouška tvrdosti podle Rockwella (HRB,HRC) [19]</i>	20
<i>Obr. 6 Zkouška tvrdosti podle Brinella [20]</i>	22
<i>Obr. 7 Přenosný tvrdoměr Brinell</i>	23
<i>Obr. 8 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [20]</i>	24
<i>Obr. 9 Digitální tvrdoměr Vickers</i>	25
<i>Obr. 10 Zkouška podle vickerse [18]</i>	28
<i>Obr. 11 Zkouška podle Knoop</i>	29
<i>Obr. 12 Berkovichův indentor [12]</i>	30
<i>Obr. 13 Berkovichův indentor Indentační křivka (a), časovým diagramem indentační</i>	31
<i>Obr. 14 Schématické znázornění příčného řezu vtisku [16]</i>	31
<i>Obr. 15 Plastická a pružná část práce vnikacího procesu [16]</i>	33
<i>Obr. 16 Přístroj Micro – Combi Tester</i>	39
<i>Obr. 17 Chemický vzorec</i>	40
<i>Obr. 18 Závislost zatížení na indentační hloubce</i>	42
<i>Obr. 19 Závislost indentační hloubky na čase</i>	43
<i>Obr. 20 Vtisková tvrdost</i>	43
<i>Obr. 21 Vickersova tvrdost</i>	44
<i>Obr. 22 Vtiskový modul</i>	45
<i>Obr. 23 Vtiskové tečení</i>	45
<i>Obr. 24 Deformační práce</i>	46
<i>Obr. 25 Závislost zatížení na indentační hloubce</i>	47
<i>Obr. 26 Závislost indentační hloubky na čase</i>	48
<i>Obr. 27 Vtisková tvrdost</i>	48
<i>Obr. 28 Vickersova tvrdost</i>	49
<i>Obr. 29 Vtiskový modul</i>	49
<i>Obr. 30 Vtiskové tečení</i>	50
<i>Obr. 31 Deformační práce</i>	50
<i>Obr. 32 Závislost zatížení na indentační hloubce</i>	52

<i>Obr. 33 Závislost indentační hloubky na čase</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 34 Vtisková tvrdost</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 35 Vickersova tvrdost</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 36 Vtiskový modul</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 37 Vtiskové tečení</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 38 Deformační práce</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 39 Závislost zatížení na indentační hloubce</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 40 Závislost indentační hloubky na čase</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 41 Vtisková tvrdost</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 42 Vickersova tvrdost</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 43 Vtiskový modul</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 44 Vtiskové tečení</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 45 Deformační práce</i>	<i>59</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Tvrdost dle Vickerse – oblasti zkušebního zatížení pro kovové materiály</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 2. Hodnoty teploty formy</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 3. Hodnoty teploty taveniny</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 4. Hodnoty dotlaku</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 5. Hodnoty doby chlazení</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6. Hodnoty doby chlazení při zatížení 0,5N.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 7. Hodnoty dotlaku formy při zatížení 0,5N.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 8. Hodnoty teploty formy při zatížení 0,5N.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 9. Hodnoty teploty taveniny při zatížení 0,5N</i>	<i>56</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PI CD ROM