

Statistické zhodnocení vlivu parametrů měření rázové houževnatosti polymerů

Melka Petr

Bakalářská práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Petr Melka
Osobní číslo:	T20974
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Statistické zhodnocení vlivu parametrů měření rázové houževnatosti polymerů

Zásady pro vypracování

Vypracujte literární rešerši, která se zabývá vlivy ovlivňující výsledky měření rázové houževnatosti polymerů z hlediska parametrů samotného testování.

Na základě rešerše vyberte vhodné parametry pro testování s ohledem na použitý přístroj Tinius Olsen IT 503.

Příprava vzorků na testování a samotné provedení zkoušek.

Statistické vyhodnocení a zhodnocení vlivů parametrů.

Seznam doporučené literatury:

ISO 179:2000 Plastics ? Determination of Charpy impact properties

ISO 180:2000 Plastics – Determination of Izod impact strength

S. Sahin, P. Yayla / Polymer Testing 24 (2005) 613?619

McKeen, Laurence W.. (2014). Effect of Temperature and other Factors on Plastics and Elastomers (3rd Edition). Elsevier

Moalli, J.. (2001). Plastics Failure – Analysis and Prevention – Factors Affecting Variation in Gardner Impact Testing. William Andrew Publishing/Plastics Design Library.

Hylton, Donald C.. (2004). Understanding Plastics Testing. Hanser Publishers.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.**
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem 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.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje problematice vlivu různých parametrů na měření rázové houževnosti polymerů a jejich následnému statistickému vyhodnocení.

Teoretická část bakalářské práce se zabývá polymery obecně a následně rozebere polypropylen. Dále je věnována metodám měření houževnatosti a normám s nimi spojenými. Jako poslední se teoretická část věnuje rozboru parametrů při měření houževnatosti a možnému selhání materiálu za různých podmínek.

Experimentální část je věnována zkouškám houževnatosti polypropylenu za různých parametrů a testovacímu zařízení. Dále popisuje průběh, parametry a výsledky jednotlivých sérií testování a poslední část je věnována porovnání výsledků měření jednotlivých měření a následnému statistickému vyhodnocení.

Klíčová slova: parametry, vliv, houževnatost

ABSTRACT

The bachelor thesis is dedicated to the problematics of the influence of different parameters for the impact measurement of polymers and the following statistical evaluation.

The theory part of the thesis focuses on polymers in general and then it describes polypropylene. Next Chapter aims to list the measurement methods of the impact resistance and the standards. At last, the thesis is dedicated to the parameters itself during impact testing and the potential failiures under different conditions.

Experimental part is dedicated to the impact measurements of polypropylene under different parameters of the measuring device. It describes the process, parameters and the results of different measurement series. The last chapter focuses on the comparison of different measurement results and its statistical evaluation

Keywords: parameters, influence, impact resistance

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Lubomíru Beníčkoví, Ph.D. za jeho cenné rady a svatou trpělivost a také svému nejbližšímu okolí za nehynoucí podporu během psaní této práce.

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

OBSAH

1	ÚVOD	12
I	TEORETICKÁ ČÁST 13	
2	POLYMERY	14
2.1	DEFINICE POLYMERŮ	14
2.2	VÝHODY A NEVÝHODY PLASTŮ	14
2.3	POLYPROPYLEN	15
2.3.1	Isotaktický polypropylen	15
2.4	MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ	16
2.4.1	Rázová Houževnatost	16
3	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	17
3.1	DĚLENÍ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	17
3.1.1	Statické zkoušky	17
3.1.2	Dynamické zkoušky	17
3.2	ZKOUŠKY RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI	17
3.2.1	Gardnerův rázový test	18
3.2.2	Metoda Dynstat	19
4	MĚŘENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODAMI IZOD – CHARPY	20
4.1	TESTOVÁNÍ METODOU CHARPY	21
4.2	TESTOVÁNÍ METODOU IZOD	24
5	3. Vlivy ovlivňující rázovou houževnatost	28
5.1	Vliv teploty	28
5.2	Teplota skelného přechodu (T_G)	28
5.2.1	Amorfní polymery	29
5.2.2	Semikrystalické polymery	30
5.3	Teplota tání (T_M)	30

5.4	VLIV VLHKOSTI	31
5.5	VLIV VRUBŮ A TLOUŠTKY MATERIÁLU	32
5.6	VLIV HMOTNOSTI A TUHOSTI SESTAVY	34
5.7	VLIV DOPADOVÉ ENERGIE (EXTRÉMY)	35
5.8	VLIV VÝCHOZÍ POLOHY KYVADLA.....	36
5.9	VLIV DOPADOVÉ RYCHLOSTI	37
5.10	POČÁTEČNÍ ÚHEL A TŘENÍ	38
6	STATISTICKÉ POMŮCKY K VYHODNOCENÍ.....	40
6.1	DEFINICE STATISTIKY	40
6.2	ARITMETICKÝ PRŮMĚR.....	40
6.3	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	40
6.4	VARIAČNÍ KOEFICIENT	40
6.5	GRUBBSŮV TEST ODLEHLÝCH HODNOT	41
6.6	TEST ROVNOSTI DVOU STŘEDNÍCH HODNOT NORMÁLOVÉHO ROZDĚLENÍ	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST 43	
7	ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	44
8	PŘÍPRAVA PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	45
8.1	MOSTEN 58.332	45
8.2	VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	46
8.3	ÚPRAVA VZORKŮ A VRUBOVÁNÍ	47
8.3.1	Úprava vzorků	47
8.3.2	Vrubování vzorků	48
9	MĚŘENÍ.....	49
9.1	MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ.....	49
9.2	PODMÍNKY A VÝSLEDKY PRO ISO - 180	49
9.2.1	Měření Izod - 1	50
9.2.2	Testování odlehlosti hodnot Měření Izod - 1	51

9.2.3	Měření Izod - 2	51
9.2.4	Testování odlehlosti hodnot Měření Izod - 2	52
9.2.5	Měření Izod - 3	52
9.2.6	Testování odlehlosti hodnot Měření Izod - 3	53
9.3	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ PRO ISO – 180	56
9.4	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ METODU IZOD.....	58
9.5	PODMÍNKY A VÝSLEDKY PRO ISO - 179	60
9.5.1	Měření charpy - 1	60
9.5.2	Testování odlehlosti hodnot Měření Charpy - 1	61
9.5.3	Měření Charpy - 2	61
9.5.4	Testování odlehlosti hodnot Měření Charpy - 2	62
9.5.5	Měření Charpy - 3	62
9.5.6	Testování odlehlosti hodnot Měření Charpy - 3	63
9.5.7	Měření rozdílných hloubek Vrubu – Charpy 1.	64
9.5.8	Testování odlehlosti hodnot rozdílných hloubek Vrubu – Charpy 1.	64
9.5.9	Měření rozdílných hloubek Vrubu – Charpy 2.	65
9.5.10	Testování odlehlosti hodnot rozdílných hloubek Vrubu – Charpy 2.	66
9.5.11	Verifikace upraveného souboru – 2. Charpy vrub 2 mm	67
9.5.12	Měření rozdílných hloubek Vrubu – charpy 3.	67
9.5.13	Testování odlehlosti hodnot rozdílných hloubek Vrubu – Charpy 3.	68
9.6	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ PRO ISO – 179	68
9.7	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ METODU CHARPY.....	70
9.7.1	Šířka intervalu a test dvou středních hodnot pro rozdílné energie kyvadla – Charpy	71
9.7.2	Šířka intervalu a test dvou středních hodnot pro měření s rozdílnou hloubkou vrubu – Charpy	71
9.8	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ IZOD X CHARPY	72
ZÁVĚR		74
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		75
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		78

SEZNAM OBRÁZKŮ	80
SEZNAM TABULEK.....	82
SEZNAM PŘÍLOH.....	83

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá tématem vlivu parametrů na výsledky měření rázové houževnatosti polymerů. Polymery jsou v dnešní době jedním z nejpoužívanějších materiálů a konkrétní znalost jejich mechanických vlastností je nezbytná pro správnou funkčnost polymerních výrobků.

Práce se věnuje různým vlivům na výsledky zkoušek, a jakým způsobem ovlivňují výslednou naměřenou rázovou houževnatost. Některé tyto vlivy mohou být součástí zkoušek rázové houževnatosti, jako například teplota. Jiné na druhou stranu jsou nežádoucí, jako třeba nedokonale opracované zkušební těleso, nebo nevhodně nastavené měřicí zařízení.

Cíl práce zní: „Cílem této práce je srovnat naměřené výsledky rázové houževnatosti u materiálu Mosten 58.332 s různými vstupními parametry. Jeho zkušební tělíska budou měřena jak metodou Izod podle normy 180-1, tak metodou Charpy podle normy 179-1. Výsledky budou následně verifikovány Grubbsovým testem na odlehlost některých hodnot a porovnány mezi sebou (relevantně) za použití testu středních hodnot“

První část práce shrnuje základní pojmy, souvislosti a význam na měření rázové houževnatosti, které je cílem této práce. Následující část popisuje praktické provedení měření, výsledky, a následné srovnání.

I. TEORETICKÁ ČÁST

2 POLYMERY

Tato kapitola se věnuje jak obecné definici polymerů, tak přiblížení materiálu použitému v praktické části práce (izotaktický polypropylen) a jeho vlastnostem v rámci rázové houževnatosti.

2.1 Definice polymerů

Polymery jsou molekuly sestávající z mnoha stejných chemických útvarů (merů), které se opakují a vytváří řetězec (polymer). Polymery se dají rozdělit podle původu na **přírodní** - DNA, kolagen nebo **umělé** - PVC, polypropylen. Nicméně toto dělení není úplně příhodné, protože přírodní polymery mohou být syntetizovány (například umělý kaučuk), a naopak některé umělé polymery, které se v přírodě volně nevyskytují, mohou vzniknout přirozenou cestou (např. Enzymatická syntéza). Pojem polymer je také spojován s chemickými sloučeninami, které jsou spojeny kovalentními vazbami a jsou chemicky stabilní za běžných podmínek. Polymery se nejčastěji skládají z uhlíku, vodíku, či derivátů uhlovodíku například s kyslíkem, dusíkem, sírou, nebo halogeny. Nejdůležitějším kritériem ovlivňujícím vlastnosti polymerů je pak délka jejich polymerního řetězce. [2,3]

2.2 Výhody a nevýhody plastů

Mezi výhody plastů patří:

- **Tvářitelnost** – plasty mohou být tvářeny do složitých tvarů bez dalších potřebných úprav. Mnoho kovových dílů může být zredukováno do jednoho plastového a tím lze snížit cenu montáže.
- **Opakovatelnost** – několik identických dílců může být lisováno v krátkých cyklech.
- **Barvitelnost** – do plastů se mohou jednoduše přidat barviva, a tím lze změnit jejich barvu bez potřeby dalších úprav.
- **Flexibilita** – plasty jsou pružné, takže dokážou ustát náraz, aniž by se zlomily. Také se dokážou vrátit to původního stavu při ohybu.
- **Nízká cena** – je ovlivněna nejen výrobním objemem, ale obecně jsou plasty mnohokrát levnější než kovy.
- **Odolnost vůči erozi** – plasty jsou běžně vytvářeny tak, aby byly odolné vůči opotřebení.

Mezi nevýhody plastů se řadí:

- **Nízká tvrdost** – plasty jsou mnohem méně odolné vůči škrábancům a oděru než kovy.
- **Nízká houževnatost** – houževnatost je mnohem nižší oproti dřevu nebo kovům.
- **Hořlavost** – většina plastů je vysoce hořlavá, avšak to se dá ovlivnit různými aditivy.
- **Praskání během namáhání** – většina plastů praská podél linií napětí.
- **Nízká odolnost vůči rozpouštědlům** – většina plastů je rozpustná rozpouštědly. Některé dokonce měknou i pod horkou vodou. [10]

2.3 Polypropylen

Polypropylen (PP) vzniká polymerací propylenu a jedná se o nejrozšířenější termoplast. Spadá do skupiny polyolefinových pryskyřic a nejčastějším způsobem následného zpracování je buď lisování, nebo vytlačování do plastových výrobků, které musí být pevné, ohebné a odolné vůči teplu.

Tento materiál se vyznačuje lineární strukturou a nízkou molekulární hmotností. Zvláštností tohoto polymeru je tzv. takticita – jedná se o relativní orientaci každé methylové skupiny s ohledem na jiné methylové skupiny v sousedících monomerech. Tato vlastnost je důležitá pro porozumění jeho chování. Polypropylen se dále dělí podle orientace methylových skupin na řetězci na: isotaktický polypropylen (I-PP), syndiotaktický polypropylen a ataktický polypropylen (a-PP), kdy izotaktický polypropylen má methylové skupiny na jedné straně, skupiny syndiotaktického polymeru alternují a v ataktyckém jsou rozmístěny náhodně. Polypropylen také vyniká svou chemickou odolností vůči organickým chemikáliím a vysokou teplotou hoření. [1]

2.3.1 Isotaktický polypropylen

Isotaktický polypropylen je jednou z modifikací polypropylenu a značí se I-PP. Jeho methylové skupiny jsou orientované jednostranně, což má za následek jeho dobré mechanické vlastnosti. Isotaktický polypropylen spadá do skupiny termoplastů a je velice rozšířeným plastem pro svoji nízkou cenu a poměr chemických i mechanických vlastností. Své uplatnění nachází v textilním průmyslu, jako fólie pro balení potravin nebo při výrobě lahví. Díky svojí univerzalitě začal z trhu vytlačovat PVC a PS. I-PP má také velice zvláštní

vlastnosti týkající se rázové houževnatosti. I-PP má totiž vysokou odolnost proti vzniku prasklin. Naopak jeho odolnost proti šíření již vzniklých prasklin je velmi malá a v případě, kdy prasklina nebo jiné mechanické selhání již existuje v polypropylenové matici, láme se velmi rychle, a to především za nízkých teplot. [7]

2.4 Mechanické vlastnosti polymerů

Mechanickými vlastnostmi se vyjadřuje soubor jevů chování daného materiálu během působení vnějších mechanických vlivů. Základními charakteristikami jsou myšleny: pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost. Mechanické vlastnosti polymerů jsou klíčové pro jejich použití, protože popisují konkrétní možnosti chování polymerů při působení vnějších mechanických vlivů.

2.4.1 Rázová Houževnatost

Rázová houževnatost je mechanická vlastnost, která je definovaná jako množství energie, kterou může materiál absorbovat při okamžitém zatížení. Rázová houževnatost může být také definována jako limit síly ku jednotce oblasti, než materiál praskne. [8]

K tomu se váže obecný mýtus, že materiály s vysokou rázovou houževnatostí mají zároveň vysokou úroveň tvrdosti, to nicméně nebývá pravidlem. [8]

3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Zkoušky mechanických vlastností materiálů jsou nezbytnou součástí dnešní doby. Znalost vlastností, známým díky zkouškám materiálu, zajišťuje bezpečnost, standardy a spolehlivost pozdějších výrobků. Navíc slouží jako důkaz výrobcům, že jejich výrobky splňují všechny požadavky, jak národní, tak zákaznické. Materiály ve formě zkušebních těles mohou být zatíženy například na tah, tlak, krut, stříh, ohyb, či kombinaci uvedených. [8]

3.1 Dělení mechanických zkoušek

Mechanické zkoušky se dělí hned podle několika kritérií. Jednak se dělí podle způsobů zatížení na zkoušky tahem, tlakem, ohybem, krutem a stříhem, dále pak podle stavu napjatosti na zkoušky jednoosé, dvouosé, či trojosé napjatosti. Dalším dělením je dělení zkoušek na destruktivní a nedestruktivní. Nejčastějším dělením je ovšem rozdělení podle zatížení v průběhu času, a to na zkoušky statické a dynamické.[2]

3.1.1 Statické zkoušky

Jedná se o druh zkoušky, kdy je zkoušené těleso zatěžováno tzv. statickou silou, tj. silou, která se v průběhu zkušební doby nemění, nebo se mění jen pozvolna. Do takových zkoušek řadíme například zkoušku tahem nebo tlakem.

3.1.2 Dynamické zkoušky

Dynamické zkoušky jsou zkouškami, kdy je těleso zatěžováno dynamicky. V praxi to znamená, že působící síla se mění. Většinou roste náhle, během velmi krátkého časového úseku, popřípadě dochází k opakování sil. Mezi dynamické zkoušky patří například zkouška rázové houževnatosti či únavové zkoušky materiálu.[2]

3.2 Zkoušky rázové houževnatosti

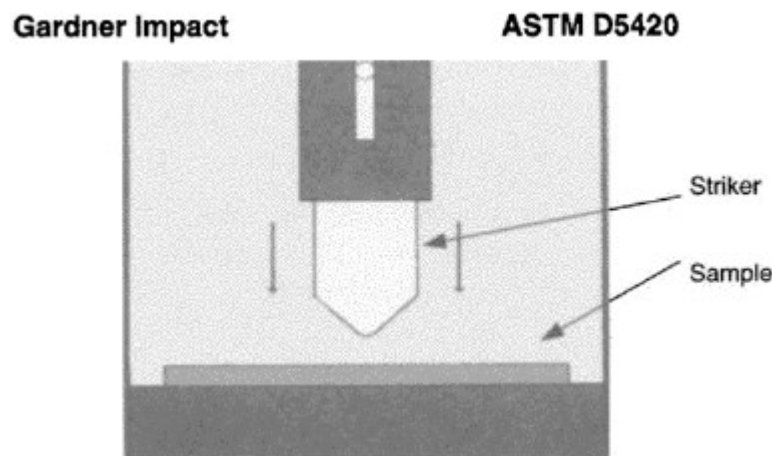
Zkoušky rázem určují schopnost materiálu absorbovat energii, která je nazývána jako houževnatost.

Většina materiálů se láme charakteristickým způsobem podle typu molekul, molekulárních složek, výrobního postupu, tvaru a orientací jak vláken, tak materiálu. Oproti statistickému zatížení, kde dochází k porušení tělesa až během extrémního průhybu nebo vůbec, u zkoušek rázové houževnatosti se materiály stávají křehčími. Existují 4 typy rázového selhání materiálu. Prvním z nich je ohýbání, jehož důkazem je permanentní deformace bez prasklin.

Dalším selháním je praskání, jehož důkazem jsou praskliny nebo ohyb bez ztráty tvaru a integrity. Předposledním selháním je křehkost, jejímž důkazem je katastrofální selhání bez náznaku ohyb. Posledním selháním houževnatosti je tažnost, kdy se materiál ohne, a následně praskne. [8]

3.2.1 Gardnerův rázový test

Mezi zkoušky rázové houževnatosti patří Gardnerův rázový test, který se řadí do rázové zkoušky pádem. Podstata Gardnerova testu je v tom, že se použije šipka na ležící těleso. Energie potřebná k porušení vzorku se odvozuje od váhy šipky a od výšky, ze které padá. Rázová energie je počítána vynásobením výšky a váhy. Výsledek je udáván v joulech. Zkouška je prováděna podle normy ASTM D5420. [20]



Obrázek 1 – Padající šipka během Gardnerova testu[2]

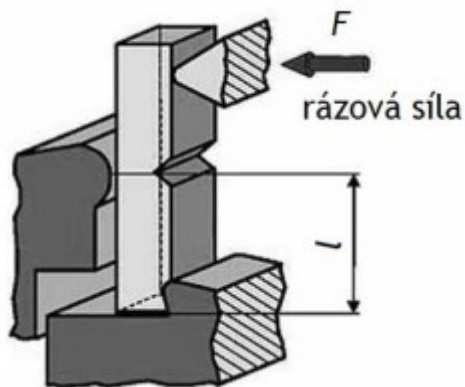
Další možnou zkouškou rázové houževnatosti je rázová zkouška tahem, která se využívá, když je potřeba otestovat vysoce houževnatý vzorek. Ten se pozná tak, že se během ohybových zkoušek neláme, ale pouze prohýbá. Zkušební tělesa mají podobný tvar jako tělesa k měření klasického tahu. Výsledky u vzorků s kratší pracovní částí jsou srovnatelné s ohybovými rázovými zkouškami. U těch delších dochází k protažení, které umožňuje vyhodnocení dynamické tažnosti a trvalé deformace. Houževnatost v tahu je pak počítána ze vztahu $A_{\varepsilon} = \frac{w_{\varepsilon}}{b \cdot h}$, kde se výsledek uvádí v kilojoulech na metr na minus druhou. w_{ε} lze pak vypočítat jako $w_{\varepsilon} = W - (w_k + c)$. Zmíněná trvalá deformace má vzorec $TD = \frac{l-l_0}{l_0} * 100$ a je uváděna v procentech.[20]



Obrázek 2 - schéma kyvadla rázové zkoušky tahem[9]

3.2.2 Metoda Dynstat

Další metodou pro měření vrubové houževnatosti je metoda Dynstat. Mezi její největší výhody patří nastavitelnost kladiva o různých energiích a také to, že je použitelná pro malé zkušební vzorky s rozměry 15 mm x 10 mm a o tloušťkách 1,5 – 4,5 mm, které mohou být získány přímo z konkrétního výrobku. Schéma zkoušky je podobné jako u metody Izod, ovšem její výpočtový model se podobá spíše metodě Charpy. [9]

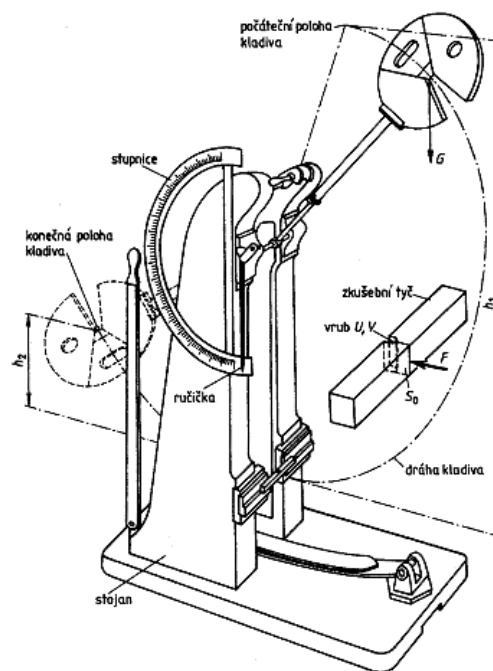


Obrázek 3 - schéma Dynstat[9]

4 MĚŘENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODAMI IZOD – CHARPY

Tento typ měření je zaměřený na náchylnost kyvadlového zatížení. Výsledky jsou poté vyjádřeny jako energie spotřebovaná kyvadlem na přelomení vzorku. Vzorky bývají často vrubované, protože vruby napomáhají prasknutí namísto protažení. Vruby vlastně slouží jako oblast koncentrace zatížení a tím napomáhají prasknutí. Z hlediska praxe jsou zkoušky metodami Izod a Charpy nejpoužívanější ať už pro jednoduchost zkoušky a její opakovatelnost, tak pro potřebu pouze nepatrné energie na porušení materiálu křehkým lomem. Z hlediska bezpečnosti a selhání následného produktu by se jednalo o fatální problém. Metody jsou využívány převážně pro materiály o nízké nebo střední síle – polymery, oceli. Tyto materiály se mohou zlomit při zatížení jak nad, tak pod bodem protažení. Záleží na okolnostech, kterými jsou například teplota, praskliny v materiálu atd. [9,8]

Princip zkoušky je velice jednoduchý. Základem je kyvadlo, ke kterému je upnuta čepel, jež svou kinetickou energií přerazí testovací vzorek. Ty nezákladnější modely testovacích zařízení jsou vlastně jen stojan, na kterém je pomocí ložisek na hřídeli připevněno otočné rameno. Na druhém konci ramene je umístěno protizávaží. Naměřené hodnoty na stupnici ukazuje ručička, která je hnána unašečem připevněným k hřídeli. Abychom dosáhli co nejpřesnějších výsledků, je třeba, aby testovací vzorek dosáhl úplného lomu. [9,8]

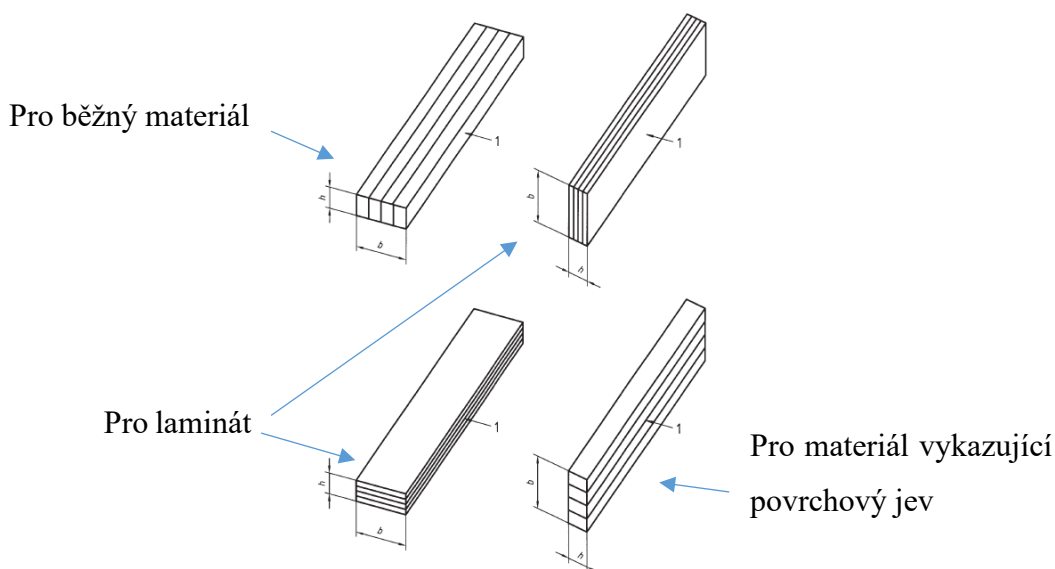


Obrázek 4 - schéma Charpyho kladiva[2]

4.1 Testování metodou Charpy

Metoda Charpy je nejstarší metodou měření rázové houževnatosti a je využívána už od roku 1900. Jedná se o jednu ze dvou nejjednodušších a nejrozšířenějších metod pro měření rázové houževnatosti. Pomocí této metody mohou být testovány jak lamináty, tak plasty a dále pak kovy nebo i jiné materiály jako například dřevo. Měření rázové houževnatosti metodou Charpy může být buď **neinstrumentované**, takové měření je kvantitativního rázu a sděluje nám, jakou rázovou houževnatost má materiál za daných podmínek, a jakým způsobem během takového zatížení selhává, nebo měření **instrumentované**, kde je pomocí moderních snímacích technologií (elektrických impulzů) sledován a zaznamenáván celý průběh zatížení, postupné působení zátěžových sil, energií a celého zatížení. Během instrumentovaného testu také máme větší kontrolu nad správností průběhu testu, protože průběh napětí je zaznamenán do grafu a nežádoucí peaky nebo vibrace jsou tak snadno odhalitelné. [23]

Testování metodou Charpy je primárně dáno normou ISO 179-1:2000, která nám v rámci testování polymerů stanovuje podmínky, za kterých může zkouška proběhnout. Během tohoto typu testování je zkušební těleso upnuto na obou koncích a kyvadlo dopadá do středu testovaného tělesa. Pomocí této metody vyhodnocujeme chování materiálu při rázovém zatížení. Testované těleso být testováno buď naplocho, nebo „naležato“. Záleží, zda jde o běžný testovaný materiál nebo nějaký druh laminátu. [6]



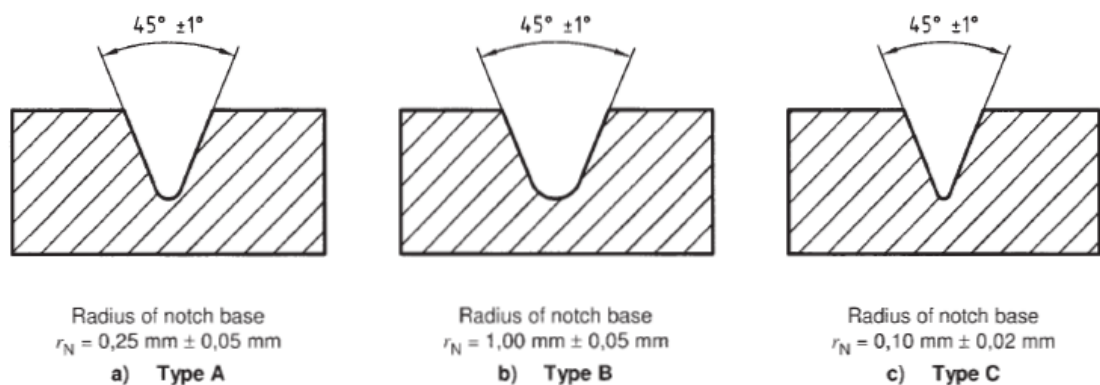
Obrázek 5 - poloha těles pro Charpyho test [6]

Pro testování polymerů pomocí Charpyho metody jsou používána zkušební tělíska, která jsou rozdělena do tří kategorií. První kategorie zahrnuje běžné materiály, kterými jsou například termosety. Zbylé dvě kategorie pak zahrnují laminátové materiály, které mohou v průběhu zkoušky být zatíženy i na mezilamelární stříh. Tělesa by neměla být poškrábaná, mít propadliny, ani stopy po tečení materiálu. Rozměry jsou udávány v milimetrech. [6]

Tabulka 1 - přehled rozměrů zkušebních těles.[6]

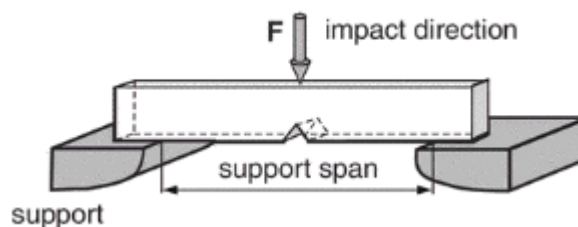
Druh vzorku	Délka l	Šířka b	Tloušťka h	Rozpětí L
1	80±2	10,0±0,2	4,0±0,2	62 ^{+0,5}
2	25h	10 nebo 15 ^c	3 ^d	20h
3	11h nebo 13h			6h nebo 8h

Vruby se na tělese dělají v případě, kdy potřebujeme koncentrovat namáhání v jednom bodě, nebo když potřebujeme změřit vrubovou houževnatost. Opět se dělí do tří kategorií. Vrub A je doporučován pro běžná testování. Za předpokladu, že se těleso s vrubem A nezlomí během testu by mělo použito těleso s vrubem C. Vrub B se používá, pokud chceme znát chování materiálu s daným typem vrubu. [6]



Obrázek 6 - typy vrubů[6]

Samotná zkouška by měla probíhat za pokojové teploty (23°C) a 50% vlhkosti. Absorbovaná energie by měla být v rozmezí 10 – 80% energie dostupné při dopadu. Pokud více kyvadel splňuje toto kritérium, kyvadlo s největší energií by mělo být použito. Dopadová energie se pohybuje v rozmezí 0.5 J – 50 J a rychlost při dopadu bývá 2.9 m/s a 3.8 m/s. Pokud však chceme znát konkrétní chování zkušebního tělesa, parametry mohou být upraveny. [6]



Obrázek 7 - schéma Charpyho zkoušky[10]

Pro zjištění rázové houževnatosti je potřeba ještě udělat výpočet za užití vzorce:[6]

$$A_n = \frac{W}{b \cdot h} \quad (1)$$

Výsledek je v kilojoulech na metr čtvereční.

Pro vrubovou houževnatost je hodnota získaná tělesem oslabeným vrubem, vzorec pro výpočet se přesto moc neliší. [6]

$$A_k = \frac{W}{b \cdot h_k} \quad (2)$$

Výsledek je v kilojoulech na metr čtvereční. Většina digitálních přístrojů v dnešní době předkládá pouze energii spotřebovanou, avšak vzorec pro její výpočet je: [6]

$$W = G * (h_1 - h_2) = G l (\cos \beta - \cos \alpha).$$

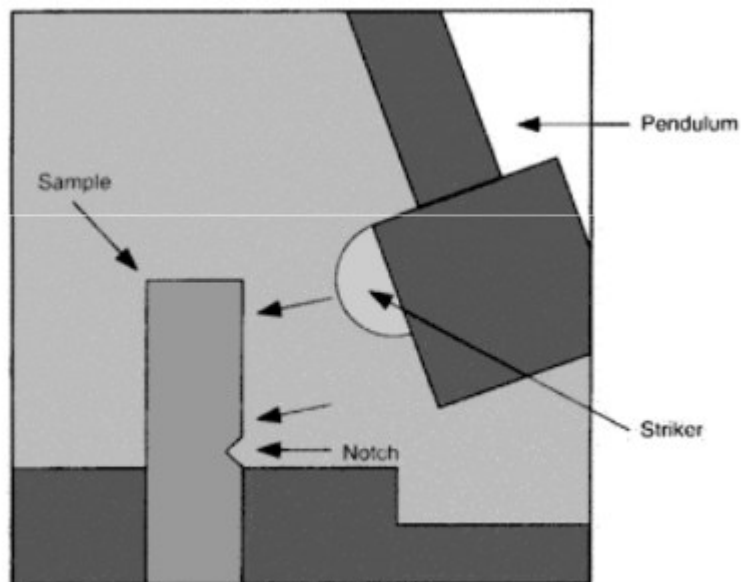
(3)

Nevyužitá energie pak slouží k iniciaci trhliny a jejímu šíření tělesem. [6]

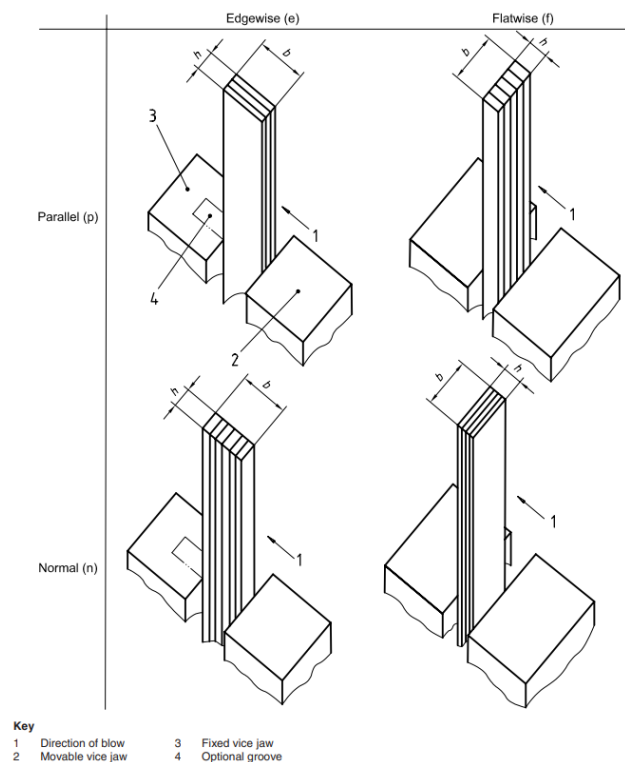
Standardně se Charpy metoda vyhodnocuje na 10 vzorcích nebo na 5, pokud se variace výsledků vleze do 5 %. Poté se napíší parametry, za kterých zkouška probíhala (materiál, teplota, energie kyvadla). Následně se výsledná data zaevidují do tabulky společně s vypočítaným aritmetickým průměrem a odchylkou průměru s datem zkoušky i jednotlivými typy selhání materiálu – kompletní přeražení, částečné přeražení nebo bez poškození. Pokud nedošlo k přeražení, zapíše se pouze N. [6]

4.2 Testování metodou Izod

Metoda Izod je podobná metodě Charpy. Je dána normou ISO 180:2000 pro testování polymerů a definuje nám podobu dané mechanické zkoušky. Oproti metodě Charpy se těleso upíná horizontálně. Zkušební tělíska s vrubem jsou upnuta tak, aby vrub směřoval do přerážené strany. [12]



Obrázek 8 - schéma upnutí tělesa při použití metody Izod[20]



Obrázek 9 - druhy upnutí těles v případě metody Izod[12]

Tato testovací metoda je vhodná pro tuhé termoplastické výlisky, popřípadě vytlačené materiály, včetně materiálů s plnivou. Touto zkouškou se také dají testovat kompozitní materiály nebo například i lamináty. Nicméně tato zkouška není určena pro tuhé buněčné materiály a pro sendvičové struktury obsahující buničinu. Pro kompozity s dlouhými vlákny nelze používat zkušební tělíska s vrubem. [12]

Pro metodu Izod existují 4 typy uchycení zkušebního tělesa: Edgewise a flatwise, které nám určují, zda těleso budeme přerážet s ohledem na jeho tloušťku nebo šířku a uchycení – **Normal**, což se používá na testování běžných polymerů nebo uchycení **Parallel**, které je uchycením pro lamináty. [12]

V případě testovací metody Izod se používají zkušební tělesa buď vyřiznutá, vyfrézovaná nebo vylisovaná. Zkušební tělesa by neměla být zdeformovaná, povrchy by na sebe měly být kolmé a těleso by mělo být o rozměrech uvedených v tabulce níže. [12]

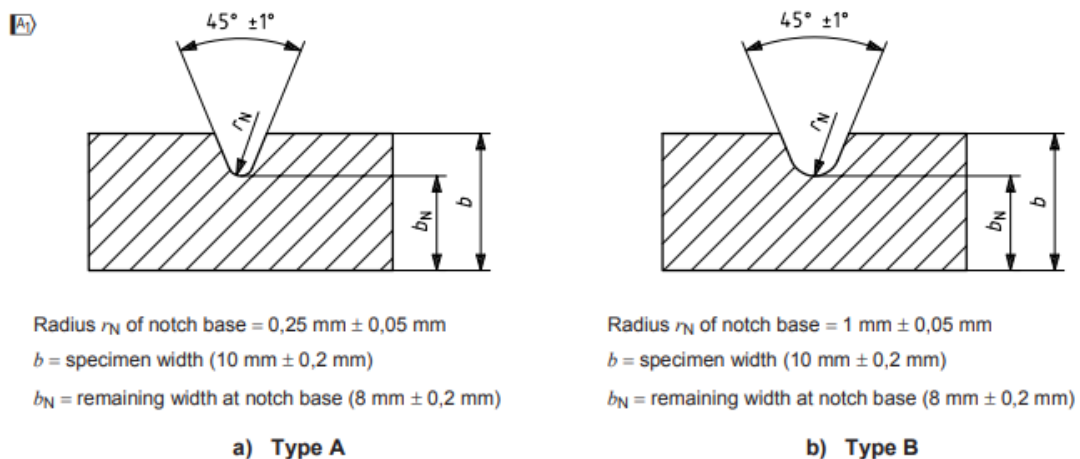
Tabulka 2 - rozměry zkušebních těles Izod [12]

Určení metody	Vzorek	Druh vrubu	poloměr paty vrubu	Zbývá šířka u paty vrubu
ISO 180/U	Délka $l = 80 \pm 2$	Nevrubovaný	-	-
ISO 180/A	Šířka $b = 10,00 \pm 0,2$	A	$0,25 \pm 0,05$	$8,0 \pm 0,2$
ISO 180/B	Tloušťka $h = 4,0 \pm 0,2$	B	$1,00 \pm 0,05$	

Pokud by náhodou bylo potřeba, je možné délku vzorku zkrátit na 63,5 mm. Zároveň platí výjimka, že pokud je vzorek vyříznut z destičky či nějakého druhu struktury, je možné, aby jeho tloušťka dosahovala až 10,2mm. [12]

Pokud jsou vzorky měřeny za běžných podmínek, měly by být alespoň 16 hodin vystaveny stabilní teplotě 16°C a 50% relativní vlhkosti v případě, kdy není potřeba testovat materiál za jiných podmínek. V případě vrubovaných vzorků se čas bere od vytvoření vrubu. [12]

Zkušební těleso metody Izod může být opatřeno vrubem pro měření vrubové houževnatosti zkoušeného vzorku. Metoda Izod využívá 2 druhy vrubů: vrub typu A a vrub typu B viz obrázek níže. [12]



Obrázek 10 - typy vrubů Izod [12]

Obvykle se testuje 10 vzorků na zařízení, které je schopno vyprodukovat takovou rázovou energii, která odpovídá 10% - 80% zbytkové energie po přeražení tělesa.

Následně je potřeba udělat výpočty pro získání výsledné rázové odolnosti, kde je pro nevrubovaná tělesa využít vzorec: [12]

$$A_{iU} = \frac{E_c}{h * b} x 10^3 \quad (4)$$

Pro tělesa s vrubem jak typu A, tak typu B, se pak používá vzorec:

$$A_{iN} = \frac{E_c}{h * b_N} x 10^3 \quad (5)$$

Základem vyhodnocování testování metodou Izod je zaznamenávání výsledků do tabulky. Pokud došlo k rozdílnému chování materiálu při přerážení, je potřeba zaznamenat i druh selhání. Obecně se zaznamenávají všechny informace, které jsou potřeba k identifikaci materiálu – typ, zdroj, šarže, historie. Následně se zaznamenají rozměry materiálu a jak vznikl vzorek. Dále je potřeba zaznamenat parametry proběhlé zkoušky, jako například dopadovou rychlost a nominální energii kyvadla. Jako poslední krok se vypočítá aritmetický průměr, směrodatná odchylka a směrodatná odchylka průměru. Nakonec je zaznamenán také datum testování. [12]

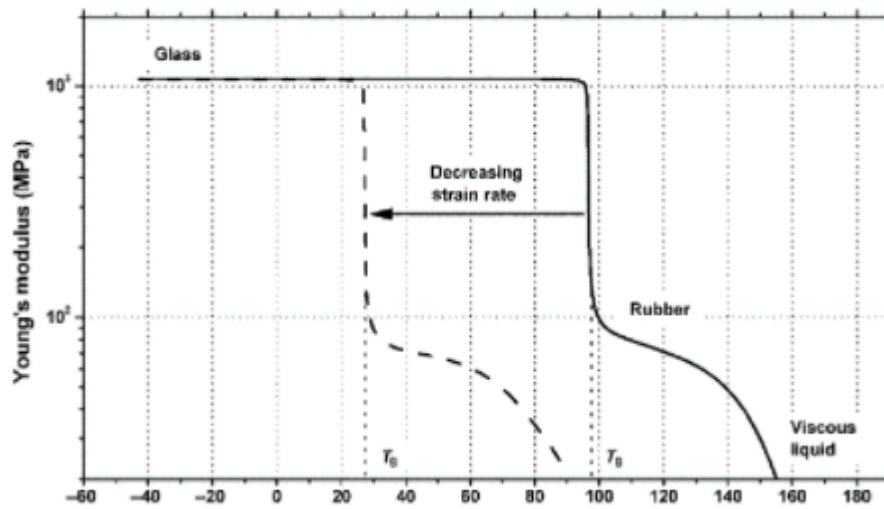
5 3. Vlivy ovlivňující rázovou houževnatost

5.1 Vliv Teploty

Vliv teploty na vlastnosti polymeru je jedním z nejzásadnějších vlivů, ovlivňujících mechanické vlastnosti testovaných polymerů v širokém spektru. S různou teplotou polymerů se pojí jejich různé vlastnosti. Například při nízkých teplotách sice dochází ke zvyšování tvrdosti polymerů, avšak zároveň se stávají křehkými. Naopak s rostoucí teplotou u termosetů dochází ke zvýšení jejich elastických vlastností. Což se projevuje na poměrech deformačních sil a odolnosti materiálu proti různým zatížením, proto bývá volen materiál nejen vzhledem k funkci budoucího výrobku, ale také vzhledem k teplotám, kterým bude vystaven během použití. Když se u těchto plastů překročí teplota tání, stává se z nich tavenina a takové skupenství je ideální pro jejich následné zpracování, a to zvláště v procesech, ve kterých je potřeba, aby byl materiál schopen tečení. Takový proces je vratný a je možné termoplasty tvářet opakovaně. Naopak u reaktoplastů dochází se zvyšující se teplotou k postupnému vytvrzování krystalické mřížky a tento proces je nevratný. Nejčastějším termínem spojovaným s teplotou je **teplota skelného přechodu**. [22]

5.2 Teplota skelného přechodu (T_g)

Teplota skelného přechodu je konkrétní teplota nebo teplotní rozmezí, pod kterým jsou polymery v tzv. sklovitém nebo krystalickém stavu. Zvyšuje se jejich tvrdost a stávají se křehkými, tudíž jsou náchylné na rázové zatížení a jejich schopnost odolat rázu klesá. K tomu dochází z důvodu snížení mobility molekul. Teplota skelného přechodu se dá vypočítat pomocí měření Youngova modulu vzhledem k teplotě materiálu například u torzního kyvadla. Kolem teploty skelného přechodu totiž dochází ke skokovému snížení tohoto modulu. Navíc pod teplotou skelného přechodu se mírně snižuje objem polymeru a jeho dielektrická konstanta. Nad teplotou skelného přechodu může dojít ke dvěma jevům uvedeným níže. [22]



Obr x. – Závislost Youngova modulu pružnosti na teplotě[23]

5.2.1 Amorfní polymery

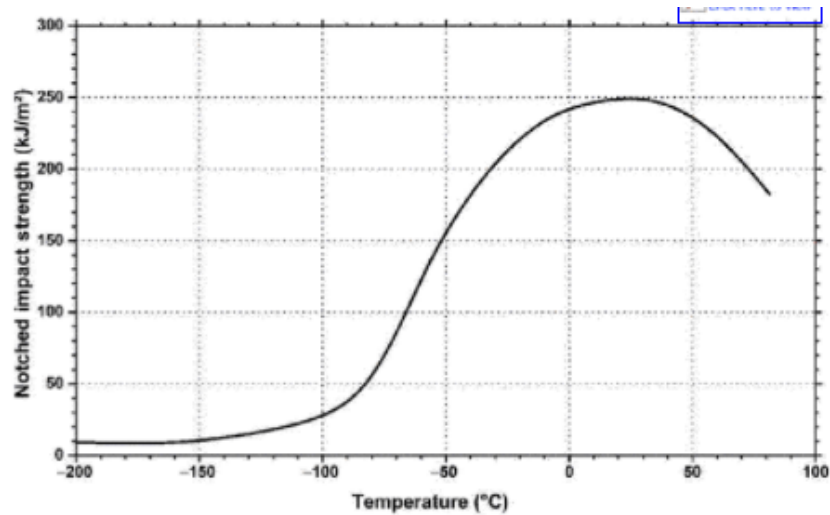
U amorfních polymerů je teplota skelného přechodu vyšší, než u polymerů semikrystalických, při dosažení této teploty dochází k rozpadu molekulárních řetězců a polymer se stává viskózním. [22]

Tabulka 3 - demonstrace rozdílných teplot skelných přechodů vybraných polymerů [22]

Polymer	T_g [°C]
PP	-13,5
HDPE	-35,15
PMA	9,85
PPG	-75,15
PVA	29,85
PS	99,85
PTFE	116,85
PC	173,85
PET	71,85

5.2.2 Semikrystalické polymery

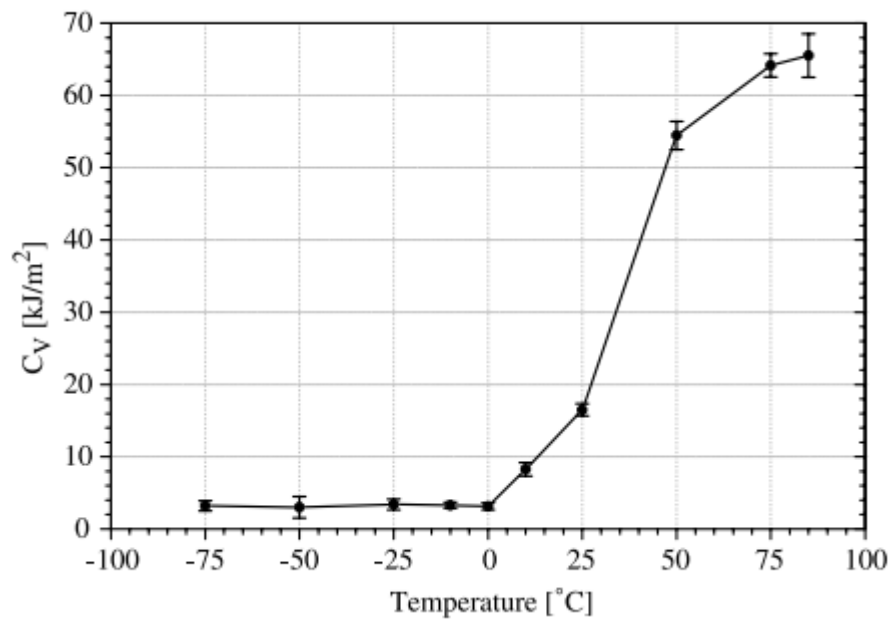
U semikrystalických polymerů je teplota skelného přechodu nízká, zpravidla kolem 0°C. Při běžné teplotě nad teplotou skelného přechodu je semikrystalický polymer elastický, houževnatý a má dobrou odolnost proti rázu. [22]



Obrázek 11 - závislost rázové houževnatosti na teplotě pro PE pryskyřici [2]

5.3 Teplota tání (T_m)

Teplotou tání se rozumí teplota, většinou nad 100°C, kdy semikrystalický polymer ztrácí svou elasticitu a začíná být viskózní. Této teploty se dosahuje například pro lisování plastových výlisků, kdy je polymer ve formě taveniny, aby mohl vtéct do formy.[22]



Obrázek 12 - Vliv teploty na Charpy rázovou energii pro PP-R [21]

5.4 Vliv Vlhkosti

Kromě teploty, která ovlivňuje všechny polymery, může vybrané polymery ovlivňovat i vlhkost. Absorbovaná vlhkost má u různých polymerů lišící se následky. Existují polymery, které díky absorbované vlhkosti dosahují lepších výsledků ve zkouškách rázové houževnatosti. Takovými materiály jsou například polyamidy, u kterých vlhkost sice snižuje jejich tuhost, ale na druhou stranu zvyšuje rázovou odolnost a houževnatost. [17]

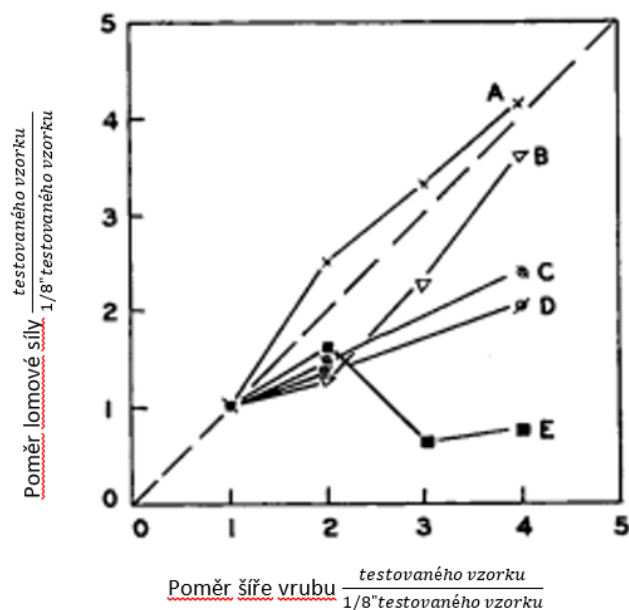
Tabulka 4 - příklady vlivu vlhkosti na rázovou energii Izod [J/m²] Pro rozdílné Polyamidy [17]

Polyamid	Suchý	Kondicionovaný
A	43	69
B	43	107
C	53	75
D	53	112

Naproti tomu existují polymery, jejichž rázové vlastnosti se s přibývajícím vlhkostí zhoršují. Do této skupiny spadají například polykarbonáty či polyestery. Třetí skupina je tvořena polymery, jejichž vlastnosti se s vlhkostí nemění, odborně se říká, že nejsou hygroskopické, tudíž nejsou schopny vlhkost absorbovat. Do této poslední skupiny patří polystyren nebo polypropylen. [18]

5.5 Vliv vrubů a tloušťky materiálu

Dalším předpokládaným vlivem na výsledky zkoušek rázové houževnatosti u polymerů jsou rozdíly ve vrubech u zkušebních těles. Vruby jako takové slouží ke kumulaci napětí v daném vzorku a tím pádem usnadňují jeho přeražení. Když vezmeme v úvahu tento fakt, rozdíl u vrubovaného či nevrubovaného tělesa by měl být znatelný. Co se týče rozdílných velikostí vrubů, předpokládá se druh lineární závislosti podobně jako u tloušťky zkoušeného tělesa. To znamená, že čím je větší vrub nebo menší šíře přeráženého tělíska, tím menší by měla jeho rázová houževnatost. [13]



Obrázek 13 – demonstrace závislosti vrubu na lomové síle [13]

Nicméně tato teorie byla otestována metodou Izod a výsledky těchto testů byly prezentovány v Journal of Applied Polymer Science Vol.8. Zkouška proběhla na komerčně dostupných polymerech s rozdílnou tloušťkou a rozdílnou šířkou vrubů. Předpokládaný vztah se dá vyjádřit rovnicí: [13]

$$B_2/B_1 = w_2/w_1$$

$$B_3/B_1 = w_3/w_1$$

$$B_4/B_1 = w_4/w_1$$

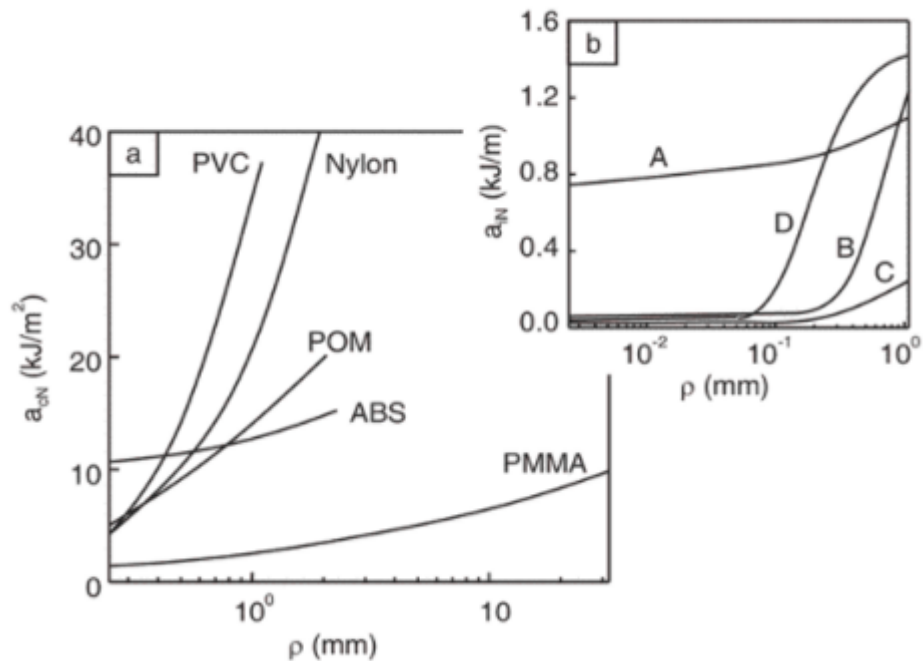
(6)

Kde B_x jsou specifické síly potřebné k přeražení zkušebních těles a w_x označuje šířky jednotlivých vrubů. Pro rázovou energii by tak měl platit vztah: [13]

$$E = \frac{B_1}{w_1} = \frac{B_2}{w_2} = \dots$$

(7)

Kde E je vypočítaná rázová energie potřebná pro přeražení zkušebních těles. Předpoklad podle vzorce byl, že rázová energie bude vždy stejná. Avšak data v grafu níže ukazují, že každý polymer se chová specificky a síla roste neúměrně k šířce vrubu. To znamená, že každý termoplast musí být testován s požadovaným vrubem, aby se předešlo závažným chybám v návrzích výrobků. Rozdíly různých hloubek vrubů nad 20% šířky zkoušeného tělesa již mají zanedbatelný vliv na absorbovanou energii, a proto nejzásadnější rozdíly ve vrubové houževnatosti jsou do 20 %. [13]



Obrázek 14 – Závislost vrubové houževnatosti Charpy na rádiu vrubu pro vybrané plasty (a) a závislost vrubové houževnatosti Izod na rádiu vrubu pro vybrané plasty (b)[14]

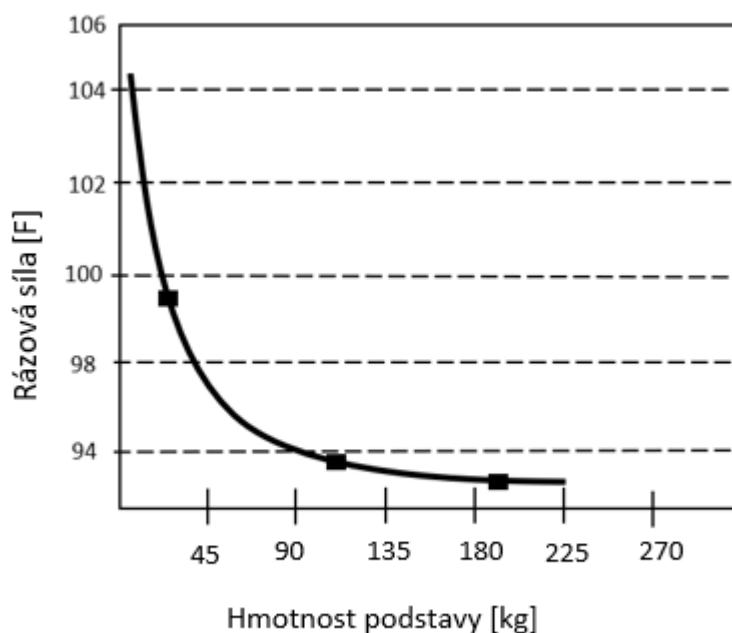
5.5.1 Vliv vytvoření vrubu

Když už jsme obeznámeni s vlivem rozdílných vrubů, je na čase přiblížit si způsoby, jakými by teoreticky vrub mohl vzniknout, a jejich vliv na výsledek parametrů testování. Způsoby vzniku jsou dva. Buď vyfrézovat na certifikované vrubovačce, nebo je mít zanesené už ve výlisku. Běžná lidská úvaha je, že předvylisovaný vrub by měl být přesnější, protože nedochází k porušení vnitřní struktury materiálu frézováním. Nicméně norma uvádí, že vrub má být frézovaný, protože tolerance na tvar, rozměry a rádius vrubu jsou natolik malé, že není možné zajistit rozměrovou stálost vrubu u výlisku, tudíž by docházelo ke zkreslení výsledků při rozměrových niancích vylisovaného vrubu, a tím pádem k ovlivnění výsledné rázové energie a zjištění, že vruby, které jsou mimo toleranci, automaticky vedou k vyřazení výsledků, popřípadě slouží pouze jako orientační výsledek a měly by být pravidelně kontrolovány. [17]

5.6 Vliv hmotnosti a tuhosti sestavy

Jedním z méně předpokládaných vlivů je pevnost a tuhost podpory testovacího zařízení. V případě nedostatečné pevnosti testovací soustavy a nedostatečného upevnění testovacího zařízení může docházet k přenosu rázové energie z testovacího tělesa na celou soustavu,

čímž dojde ke skreslení výsledků. Z tohoto důvodu se doporučuje mít pevnou a tuhou základnu, aby nedocházelo k takovému odklonu a absorpci rázové energie, jak dokazují výsledky pokusu s rozdílnými hmotnostmi podsadového stolu. V případě tohoto pokusu můžeme v tabulce a grafu níže vidět, že ke stabilizaci absorbované rázové energie došlo kolem 440 lbs, což je ekvivalent 201 kg. [5]



Obrázek 15 - Závislost energie na hmotnosti základny[8]

Tabulka 5 - Vliv hmotnosti základny na absorbované rázové zatížení polymerů[8]

Polymer	Dodavatel	Typ hrotu	Hmotnosti podpěr, MFE (Nm)		
			25,85 kg	97,5 kg	199,58 kg
ABS		C.125	30,8	28,9	27,79
HDPE		C.125	21,4	20,9	20,78
HIPS		C.125	20,2	18,5	19,2
PP (0,077“)	A	H.250	13,6	13,55	12,42
PP (0,121“)	B	C.125	22,15	20,9	20,78
PVC		H.250	12,65	11,5	11,4

5.7 Vliv dopadové energie (extrémy)

Dalším ze zásadních vlivů je dopadová energie. Obecně se udává, že při měření rázové houževnatosti polymerů by dopadová energie měla být taková, aby přebytečná energie

byla v rozsahu 10-80 %. Při nízkých dopadových energiích v případě polymerů může dojít místo zlomu k elastické deformaci a tím pádem ke znehodnocení měření. Naopak při vysokých energiích nad 80% může docházet k nežádoucím vibracím, které zkreslí výsledek nebo vedou k odhození částí vzorku. Poslední možností zkreslení výsledku při vysokých energiích je přenesení elastického vlnění skrze polymerní materiál v případě vyšší elasticity vzorku. [23]

5.8 Vliv výchozí polohy kyvadla

Výchozí poloha kyvadla je jedním z hlavních vstupních parametrů a od něj se dále odvozuje dopadová energie a dopadová rychlost. Výchozí poloha kyvadla nám udává výšku, ze které bude kyvadlová hlavice dopadat a tudíž platí, že čím vyšší hodnotu bude výška mít, tím větší bude dopadová rychlost, potenciální energie a poté i kinetická energie. V kombinaci s hmotností kyvadlové soustavy se jedná o vstupní parametr, který je volen testovacím pracovníkem během zkoušky a musí být evidován u výsledků měření. Když dojde ke špatné volbě výchozí polohy, dochází ke změně dopadové rychlosti i energie a tím pádem může dojít ke zkreslení naměřených hodnot, když kvůli právě vysoké či nízké výšce se výsledky dostanou mimo toleranční rozpětí dané normy. Matematické závislosti jsou dány rovnicemi pro dopadovou rychlost: [23]

$$v = \sqrt{2gh} \quad (8)$$

Potenciální energie celé soustavy má pak matematickou závislost: [23]

$$E_p = mgh \quad (9)$$

A nakonec kinetická energie během dopadu se vyjadřuje jako: [23]

$$E_k = 0,5mv^2 \quad (10)$$

Z těchto matematických rovnic můžeme jasně vidět, jak důležité je správné nastavení výchozí polohy kyvadla.

5.9 Vliv Dopadové rychlosti

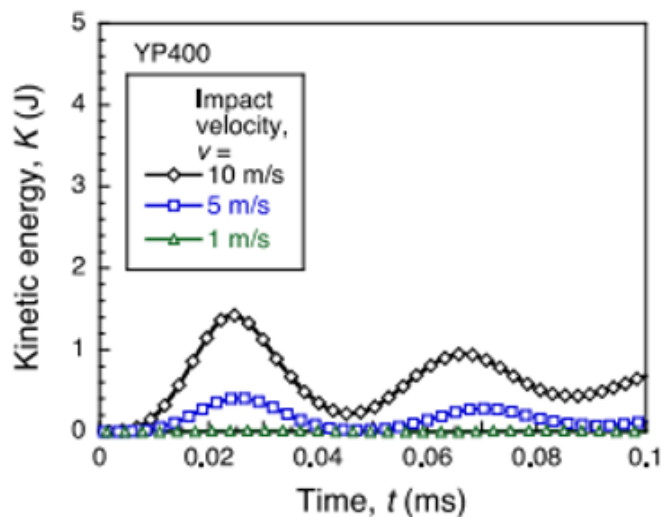
Další fyzikální veličinou, která by mohla ovlivňovat výslednou rázovou energii zkoušky, je dopadová rychlost. Vyšší dopadová rychlost má za následek vyšší kinetickou energii podle vzorce: [14]

$$K = v^2 \quad (11)$$

S vyšší dopadovou rychlostí se zvyšuje i deformační energie, protože ve zkušebním tělese dochází k větším deformacím. Matematický model tohoto vztahu je definován následovně: [14]

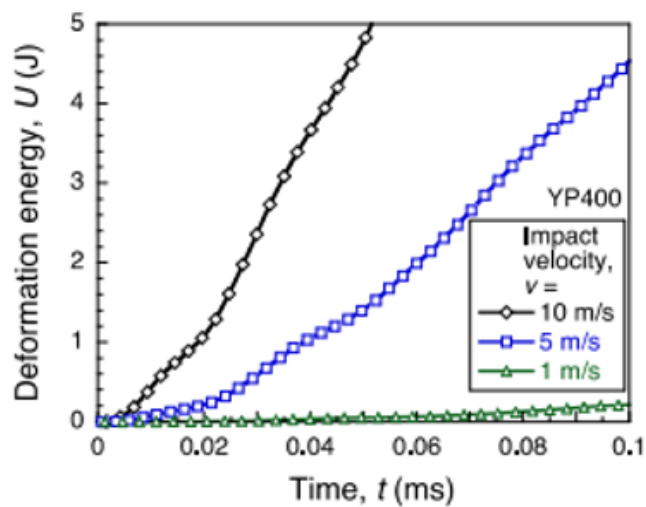
$$U \sim v \quad (12)$$

Tato závislost byla prokázána na simulaci instrumentované zkoušky rázem Charpy, kde tato závislost byla vyjádřena i graficky, viz níže: [14]



Obrázek 16 - vliv dopadové rychlosti na kinetickou energii jako funkce času [15]

U neinstrumentovaných rázových zkoušek kyvadlem je dopadová rychlost pouze složkou celkové kinetické energie, kde hodnota rozdílu kinetické energie před a po přeražení tělesa nám slouží jako výsledek.



Obrázek 17 - Vliv dopadové rychlosti na deformační energii jako funkce času[15]

Avšak dopadová rychlost může mít zásadní vliv na chování tělesa, kdy s vyšší rychlostí a ve vztahu k ní i vyšší hodnotě deformační energie dochází k vyššímu zatížení za kratší časový úsek a tím pádem může materiál směřovat spíše ke křehkému chování, kde dochází spíše ke zlomení zkoušeného vzorku než k jeho plastické deformaci a tím pádem může být finální absorbovaná energie nižší [15,21]

Tabulka 6 - měřený vliv rychlosti na rázovou houževnatost u kovů[16]

Dopadová rychlost [m/s]	Naměřená energie [J]
5,3	21,7
3,2	21,4

Vliv dopadové rychlosti při neinstrumentovaných zkouškách byl již zkoumán u kovů a výsledná zásadní variabilita různých rychlostí se neprokázala. [16]

5.10 Počáteční úhel a tření

Počáteční úhel kyvadlového měření rázové houževnatosti udává výchozí bod, ze kterého bude kyvadlo pouštěno. Platí, že čím větší úhel zvolíme, tím vyšší bude počáteční výška a tudíž i E_p , dopadová rychlost i dopadová energie. S delší dráhou zhoupnutí se ovšem přidává vliv tření a odpor vzduchu u starších měřících zařízení. Digitální přístroje ve své kalkulaci už tyto vlivy za užití výpočetních koeficientů eliminují. [16]

Tabulka 7 - výpočetní koeficienty pro korelaci tření[16]

Pozice ramene, stupně	Počet cyklů	Poměr pro kyvadlo			Poměr pro hrot		
		ztráta	úhel	energie	ztráta	úhel	energie
120	20	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
110	20	0.828	0.965	0.908	0.910	0.965	0.908
100	20	0.684	0.882	0.792	0.830	0.882	0.792
90	40	0.530	0.774	0.647	0.740	0.774	0.647
80	40	0.407	0.691	0.521	0.590	0.691	0.521
70	40	0.297	0.608	0.429	0.510	0.608	0.429
60	60	0.190	0.516	0.319	0.410	0.516	0.319
50	80	0.120	0.426	0.224	0.320	0.426	0.224

6 STATISTICKÉ POMŮCKY K VYHODNOCENÍ

Tato kapitola je poslední kapitolou teoretické části této práce. Jejím obsahem je definice statistických pojmů, následný popis Grubbsova testu a porovnání dvou středních hodnot.

6.1 Definice statistiky

Statistika je vědeckým přístupem ke sběru, prezentaci, analýze a interpretaci číselných dat nebo informací a srozumitelné představení výsledků. Statistice se také říká věda průměrů, protože většinou nepracuje s jednotlivým měřením, ale pracuje spíše s průměrnými hodnotami. [19]

6.2 Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je nejpoužívanější hodnotou ve statistice. Vychází z ní všechny statistické testy a určuje průměrnou hodnotu z daného souboru hodnot. Vypočítá se tak, že sečteme všechny hodnoty z daného počítané souboru a součet vydělíme počtem hodnot. Matematický zápis pak vypadá následovně: [19]

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (13)$$

6.3 Směrodatná odchylka

Když máme vypočítaný průměr je potřeba vypočítat směrodatnou odchylku. Směrodatná odchylka se používá pro výpočet rozptylu, či variaci v rozdělení. Je to hodnota, která nám udává, jak moc se data liší nad a pod průměrem daného vzorku. Směrodatná odchylka se vypočítá jako druhá mocnina ze součtu každé z hodnot v souboru dat odečtených od průměru souboru. tento výraz je na druhou a poté je vydělen počtem datových bodů menších než 1. Matematicky se tato rovnice dá zapsat jako: [19]

$$s = \sqrt{\frac{(\sum X - \frac{\sum X}{n})^2}{n - 1}} \quad (14)$$

6.4 Variační koeficient

Dalším užitečným statistickým termínem je variační koeficient. Je to jednoduše směrodatná odchylka podělená průměrem a je vyjádřen v procentech. Variační koeficient se používá v případech, kdy si nejsme jisti průměrem a říká nám, jak přesná data jsou. V momentě, kdy

je koeficient 30%, jsou data velice rozptýlená a průměr nemusí být spolehlivý. Variační koeficient pod 5% indikuje, že jsou data spolehlivá a přijatelný koeficient je pod 15%. [19]

6.5 Grubbsův test odlehlých hodnot

Grubbsův test odlehlých hodnot nám slouží k verifikaci toho, jestli daná hodnota ještě patří do souboru hodnot, nebo zda při jejím získávání došlo k nějaké extrémní chybě, která hodnotu udělala nezapadající do daného souboru, a proto bude tato hodnota vyřazena, aby nedošlo k negativnímu ovlivnění průměru souboru. [24]

Pro průběh Grubbsova testu je potřeba si soubor seřadit podle velikosti hodnot tak, aby platilo: $x_1 < x_2 < \dots < x_n$. Následně se vypočítají testovací kritéria pro dolní potenciálně odlehlou hodnotu: [24]

$$T_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{S_N} \quad (15)$$

A následně to stejné pro horní odlehlou hodnotu: [24]

$$T_n = \frac{x_n - \bar{x}}{S_N} \quad (16)$$

Kde S_n je matematicky definováno jako: [24]

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (17)$$

Následně se stanoví kritická hodnota Grubbsova rozdělení ze statistické tabulky viz obrázek níže:

Tabulka 8 - kritické hodnoty pro Grubbsovo rozdělení [24]

n	T_α	
	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
3	1,412	1,416
4	1,689	1,723
5	1,869	1,955
6	1,996	2,130
7	2,093	2,265
8	2,172	2,374
9	2,237	2,464
10	2,294	2,540

Poté už jen vyhodnotíme odlehlost, kde když:

$$T_1 \text{ nebo } T_n \leq T_k$$

Tak hodnota není odlehlá. A když:

$$T_1 \text{ nebo } T_n \geq T_k$$

Znamená to, že hodnota je odlehlá. Vyloučíme ji ze souboru a upravený soubor přepočítáme. [24]

6.6 Test rovnosti dvou středních hodnot normálního rozdělení

Test rovnosti dvou středních hodnot slouží k porovnání dvou souborů hodnot, u nichž si nejsme jistí, zda-li jsou stejné nebo rozdílné. V tomto případě bude využit test rovnosti dvou středních hodnot pro porovnání souborů měření a následnou evaluaci. Během tohoto testu je základní hypotézou, že střední hodnoty si jsou rovné. Testovací kritérium pro tento test se vypočítá jako:

$$t = \frac{|\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_2|}{\sqrt{\frac{\widehat{s}_1^2}{n_1} + \frac{\widehat{s}_2^2}{n_2}}} \quad (18)$$

Když $t < T$, potvrzujeme hypotézu, tudíž tvrdíme, že střední hodnoty souborů se rovnají s pravděpodobností, kterou si stanovíme při výpočtu kritické hodnoty T_k . Standardně hladina spolehlivosti 68%, 95% nebo 99%. Když dojde k případu, kdy $t > T_k$, tak hypotézu zamítáme, čímž vlastně říkáme, že střední hodnoty souboru nejsou shodné.

Kritická hodnota pro test rovnosti dvou středních hodnot se dá stanovit vzorcem. Pro účely této práce využijeme funkci v Excelu =T.INV.2T(α ; n_1+n_2-2). [26]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI

Praktická část bakalářské práce je založená na předchozí rešerši, která shrnuje možné vlivy ovlivňující výsledky zkoušek rázové houževnatosti polymerů, průběh těchto zkoušek, metody měření rázové houževnatosti a normy používané pro daná měření. Součástí praktické části je přiblížení specifického granulátu i-PP. Následně tato část popíše proces výroby, úpravy vzorků a jejich měření včetně použitých přístrojů. Dále pak představí výsledky měření, jejich vyhodnocení pomocí statistických metod, a nakonec shrne výsledky.

Cílem této práce je srovnat naměřené výsledky rázové houževnatosti u materiálu Mosten 58.332 s různými vstupními parametry. Jeho zkušební tělíska budou měřena jak metodou Izod podle normy 180-1, tak metodou Charpy podle normy 179-1. Výsledky budou následně verifikovány Grubbsovým testem na odlehlost některých hodnot a porovnány mezi sebou (relevantně) za použití testu středních hodnot

Měření proběhnou pro rozdílné nominální výšky: 430 mm – 610 mm a rozdílné hloubky vrubů 1 mm – 3 mm, pro orientaci zkušebního tělíska mimo normu a pro různá závaží ovlivňující výslednou rázovou energii kyvadla, která bude v rozsahu 1,8 J – 13 J.

8 PŘÍPRAVA PRAKTICKÉ ČÁSTI

Tato kapitola postupně rozebere použitý materiál, techniku výroby a úpravy vzorků a použitá zařízení.

8.1 Mosten 58.332

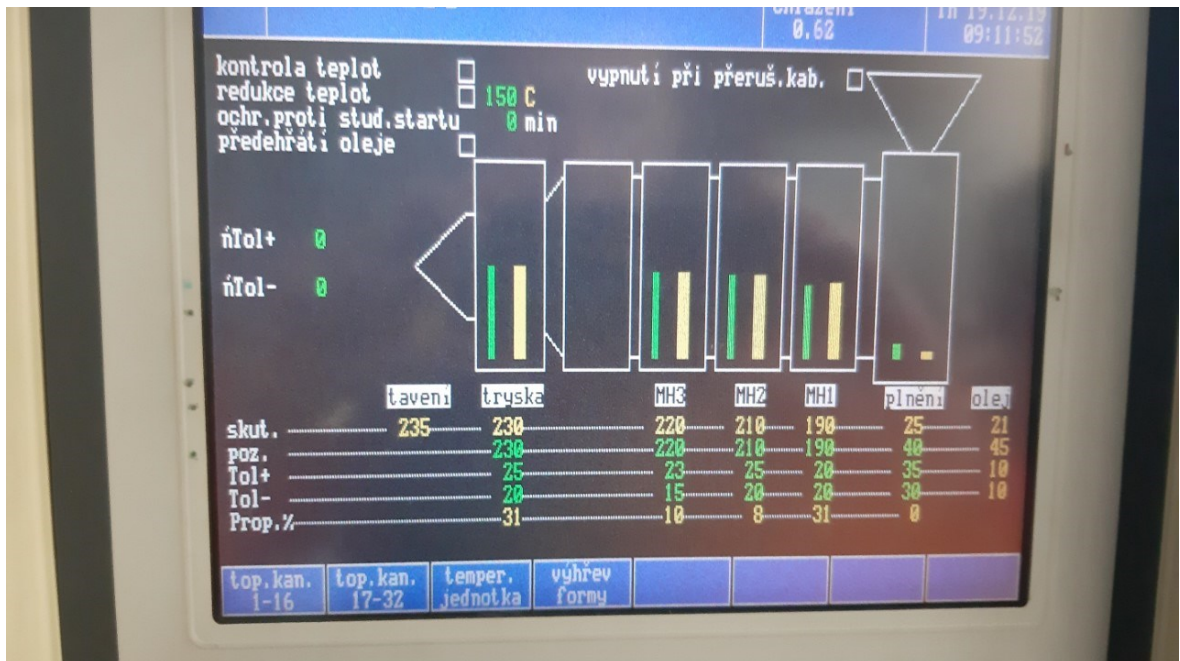
Mosten 58.332 je isotaktický homopolymer polypropylenu s UV aditivací, jehož granulát byl dodáván firmou Chemopetrol a. s. (tato varianta již není na trhu). Materiál je vhodný jak pro vstřikování, tak pro extruzi vláken. Jeho typickou aplikací je výroba motouzů, provazů a lan. Zvolen byl z důvodů relativně nízké vrubové Charpy houževnatosti, stabilním mechanickým vlastnostem a relativně konstantnímu šíření trhlin v případě jeho poškození. Konkrétní vlastnosti jsou zapsány v tabulce níže.

Tabulka 9 - Materiálové vlastnosti Mosten 58.332 viz příloha I.

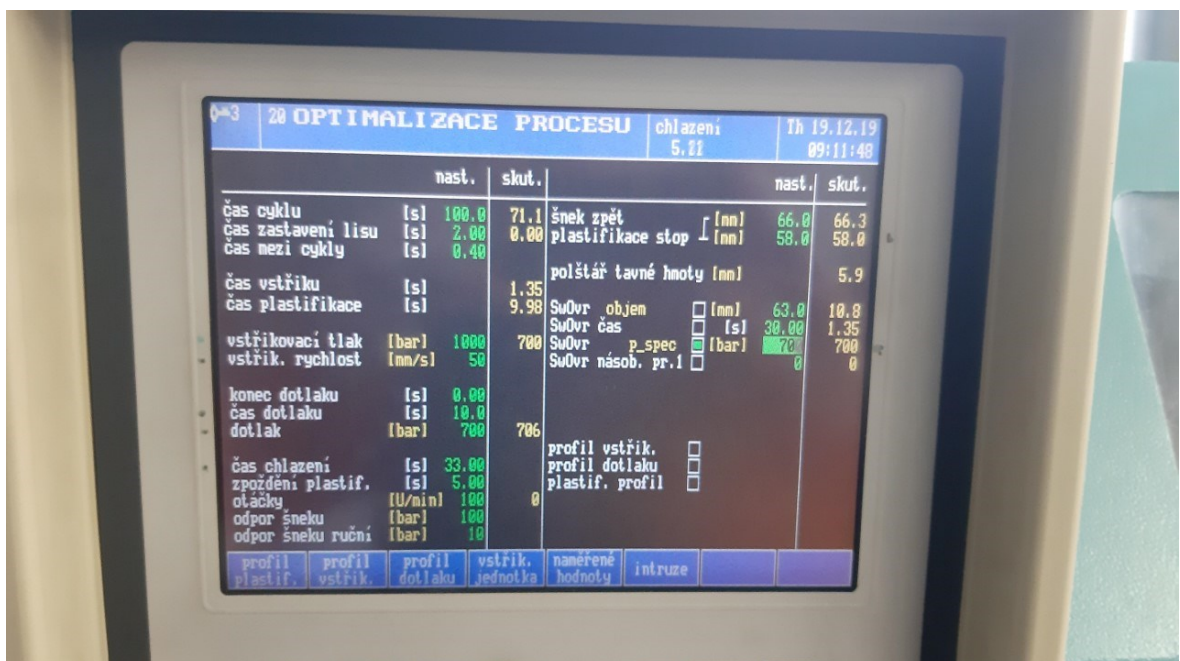
Ukazatele jakosti	Jednotka	Hodnoty
Index toku taveniny (230 / 2,16	$\text{g} \cdot 10^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	1,5 – 2,2
Hustota (23 ± 0,1) °C	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	900 – 915
Obsah těkavých látek	%	Max. 0,2
Index izotakticity	%	Min. 98
Obsah nečistot	$\text{Ks} \cdot \text{kg}^{-1}$	Nepřítomny
Žlutost přírodního granulátu	Standard	Max. B
Napětí na mezi kluzu v tahu	MPa	Min. 30,0
Modul pružnosti v tahu	MPa	Min. 1200
Teplota měknutí dle Vicata	°C	Min. 155
Teplota průhybu při zatížení	°C	Min. 55
Tvrdość Shore D		70
VRH Charpy + 23 °C	Kj / m^2	6,87

8.2 Vstřikování zkušebních těles

Zkušební tělesa, na kterých měření houževnatosti probíhalo, byla vstřikována na vstřikolisu Demag ergotech 50-200. Výsledné výstřiky byly dvou tvarů, trámek a lopatka. Celkem bylo vylisováno 128 vzorků každého tvaru. Lisovací parametry byly zdokumentovány a jsou k nahlédnutí níže.



Obrázek 18 - lisovací parametry 1.



Obrázek 19 – lisovací parametry 2.

8.3 Úprava vzorků a vrubování

8.3.1 Úprava vzorků

Vzhledem k absenci stříhadla ve formě bylo potřeba nejdříve oddělit vzorky od vtokové soustavy, což se dělalo ručními kleštěmi tak, aby nedošlo k poškození integrity vzorku. U „lopatek“ pak bylo potřeba ořezat širší konce, aby tělíska odpovídala testovacím standardům. V tuto chvíli měly vzorky následující rozměry: šířka 10 mm, výška 3,9 mm a délka 80 mm (u lopatek se může délka mírně lišit, protože konce byly ručně upraveny).



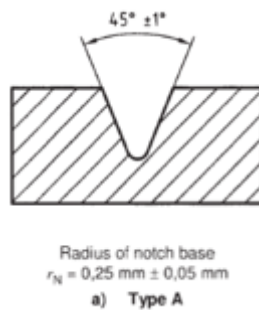
Obrázek 20 - výlisky před oddělením od vtoku



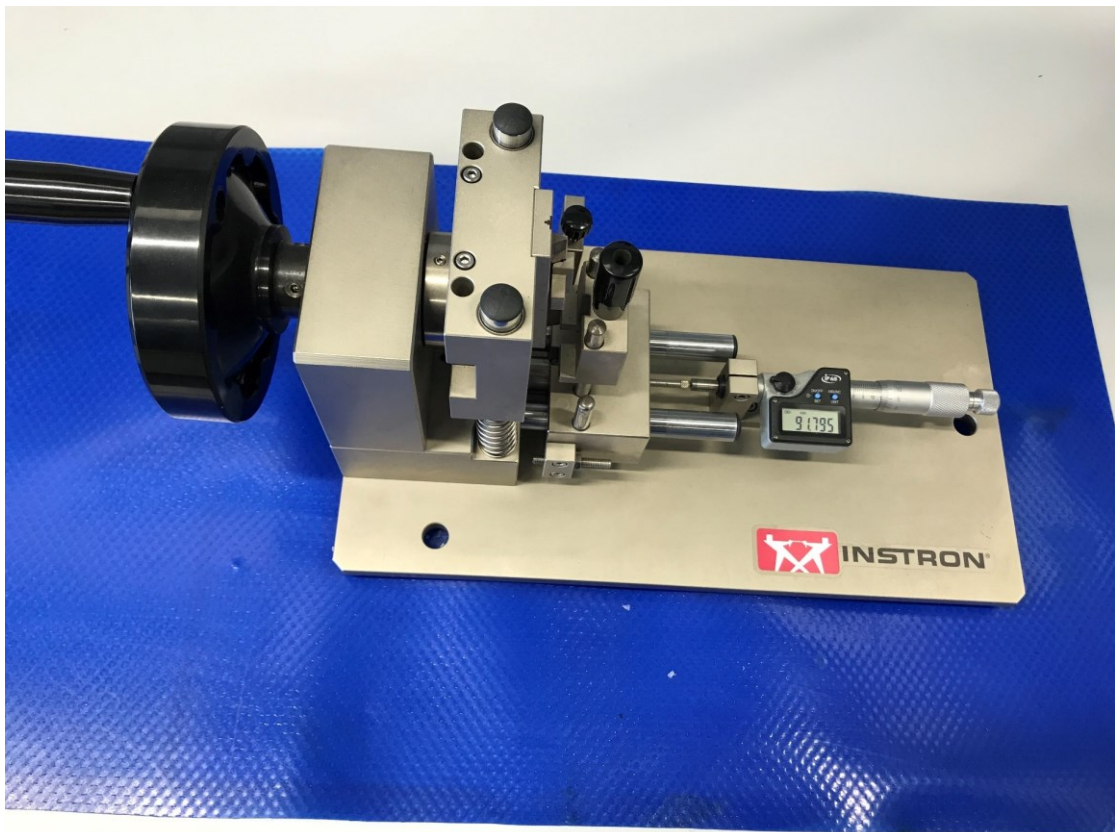
Obrázek 21 - výlisky po oddělení vtoku

8.3.2 Vrubování vzorků

Po úpravě vzorků na požadovaný rozměr bylo pro změření vrubové houževnatosti potřeba vytvořit vruby. Vruby byly vytvořeny pro zkušební tělíska jak pro metodu Izod, tak pro metodu Charpy. Byl zvolen typ vrubu A. Hloubka vrubu se pohybovala od 1 mm do 3 mm podle účelu vzorku. Pro měření rozdílů energie a výchozích výšek dosahovala hloubka vrubu 2 mm. Pro změření vlivu vrubu byl použit i vrub hluboký 1 mm i 2 mm. Vrub A je specifický kořenem vrubu, $r_N = 0,25 \pm 0,05$ mm. Normovaná zbylá šířka tělesa má být 8 mm, proto byla hloubka standardizována na 2 mm. Po navrubování vzorků byly vzorky přeměřeny na úchylkoměru, který slouží jako verifikace správnosti vrubování.



Obrázek 22 - – schéma vrubu typu A



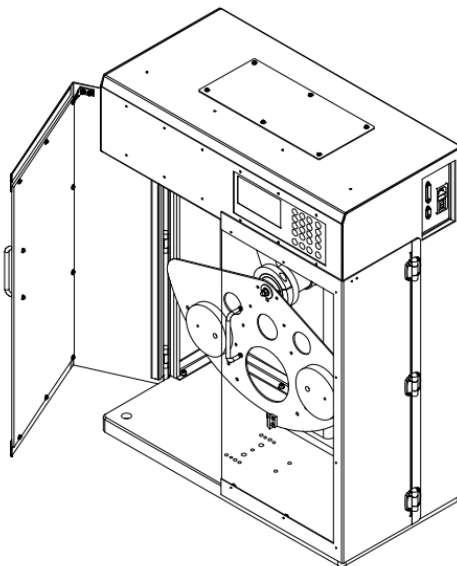
Obrázek 23 - vrubovací zařízení

9 MĚŘENÍ

Tato kapitola je jednou z posledních kapitol této práce a přibližuje způsob měření, podmínky a představuje výsledky jednotlivých sad měření.

9.1 Měřicí zařízení

Pro měření Rázové houževnatosti bylo využito kyvadlové zařízení Tinius Olsen Model – IT 503. Výhodou tohoto zařízení je, že je schopno měřit jak podle metody Izod, tak -metodou Charpy. Také disponuje volitelnými závažími pro zvýšení energie kyvadla. Zařízení je plně digitální, což ulehčuje měření, protože po zadání vstupních parametrů je zařízení schopno předkládat jak informace o energii spotřebované pro přeražení tělesa, tak zároveň předkládá vypočítanou rázovou houževnatost vzorku upravenou dokonce o koeficient tření. Další výhodou tohoto zařízení je, že disponuje uzavíratelnou testovací komorou, která snižuje vliv okolního vzduchu. Bez takto zavřené komory se zařízení neuvede v chod. Energetický rozsah kyvadla tohoto zařízení je v rozmezí od 2 J do 25 J. Nastavitelná výška je v rozmezí 400 mm do 630 mm. Dopadová rychlost se pohybuje v rozmezí od 2,7 m/s do 3,5 m/s. Samotná hmotnost kyvadla je 0,463 kg a je možné přidávat závaží až do hmotnosti celkové soustavy okolo 4.195 kg.



Obrázek 24 - schéma přístroje IT 503[27]

9.2 Podmínky a výsledky pro ISO - 180

Měření probíhalo za stabilních podmínek. V místnosti byla stálá teplota, před i po samotném měření, 22 °C. Všem vzorkům byla ponechána dlouhá doba pro ustálení a použitý materiál

nepodléhá vlivu vlhkosti. Během měření se v místnosti nenacházel žádný jiný přístroj, který by mohl svou činností ovlivnit měření. Kyvadlo bylo dostatečně zatíženo, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků tuhostí soustavy.

9.2.1 Měření Izod - 1

První měření proběhlo metodou Izod na 10 vzorcích. Energie kyvadla při dopadu dosahovala 1,97 J a kyvadlo bylo pouštěno z výšky 430,8 mm. Vrub byl hluboký 2 mm.

Tabulka 10 - hodnoty 1. Izod Měření

No.	Vrubová houževnatost A_{iN} [kJ/m ²]
1	2,871
2	2,890
3	3,003
4	3,040
5	3,134
6	3,191
7	3,210
8	3,228
9	3,266
10	3,267
Aritmetický průměr	3,1105
Směrodatná odchylka	0,142
Koeficient spolehlivosti	4,57 %

9.2.2 Testování odlehlosti hodnot Měření Izod - 1

Pro verifikaci výsledků všech hodnot použijeme Grubbsův test odlehlosti hodnot pro nejnižší a nejvyšší hodnotu v souboru. T_k volíme 2,54 podle tabulky uvedené v teoretické části práce. Pro tento soubor se bavíme o $x_1 = 2,8717 \text{ kJ/m}^2$, kde $T_1 = 1,59$ a $x_{10} = 3,2981 \text{ kJ/m}^2$, kde $T_{10} = 1,08$. Obě hodnoty jsou menší než T_k . To znamená, že ze souboru nemusíme nic vyřazovat a díky koeficientu spolehlivosti 4,6 % víme, že naměřené výsledky jsou spolehlivé.

9.2.3 Měření Izod - 2

Druhé měření metodou Izod proběhlo také na 10 vzorcích. Energie kyvadla při dopadu dosahovala 2,47 J a kyvadlo bylo pouštěno z výšky 540,59 mm. Vrub byl hluboký 2 mm.

Tabulka 11 - hodnoty 2. Izod Měření

No.	Vrubová houževnatost A_{iN} [kJ/m ²]
1	3,0673
2	3,1154
3	3,1154
4	3,1314
5	3,2788
6	3,3141
7	3,3782
8	3,4103
9	3,6891
10	3,8878
Aritmetický průměr	3,3388
Směrodatná odchylka	0,2553
Koeficient spolehlivosti	7,65 %

9.2.4 Testování odlehlosti hodnot Měření Izod - 2

Pro verifikaci výsledků, jestli všechny hodnoty, znovu použijeme Grubbsův test odlehlosti hodnot pro nejnižší a nejvyšší hodnotu v souboru. Opět volíme $T_k = 2,54$ podle tabulky v teoretické části. Pro tento soubor se bavíme o $x_1 = 3,0673 \text{ kJ/m}^2$, kde $T_1 = 1,008$ a $x_{10} = 3,8878 \text{ kJ/m}^2$, kde $T_{10} = 2,04$. Obě hodnoty jsou menší než T_k . To znamená, že ze souboru nemusíme nic vyřazovat a díky koeficientu spolehlivosti 4,6 % víme, že naměřené výsledky jsou ještě přijatelné.

9.2.5 Měření Izod - 3

Poslední měření metodou Izod při změně výchozí pozice kyvadla opět obsahovalo 10 zkušebních těles. Energie kyvadla při dopadu dosahovala 2,76 J a kyvadlo bylo pouštěno z výšky 603 mm. Vrub byl hluboký 2 mm.

Tabulka 12 - hodnoty 3. Izod Měření

No.	Vrubová houževnatost A_{iN} [kJ/m ²]
1	3,26
2	3,27
3	3,28
4	3,30
5	3,31
6	3,39
7	3,42
8	3,66
9	3,70
10	3,87
Aritmetický průměr	3,45
Směrodatná odchylka	0,20
Koeficient spolehlivosti	5,98 %

9.2.6 Testování odlehlosti hodnot Měření Izod - 3

Pro verifikaci výsledků, jestli všechny hodnoty, znovu použijeme Grubbsův test odlehlosti hodnot pro nejnižší a nejvyšší hodnotu v souboru. Opět volíme $T_k = 2,54$ podle tabulky v teoretické části. Pro tento soubor se bavíme o $x_1 = 3,2628 \text{ kJ/m}^2$, kde $T_1 = 0,8659$ a $x_{10} = 3,8718 \text{ kJ/m}^2$, kde $T_{10} = 1,9321$. Obě hodnoty jsou menší než T_k . To znamená, že ze souboru nemusíme nic vyřazovat. Koeficient spolehlivosti 5,98 % nám říká, že data jsou přijatelná a blíží se k hranici spolehlivosti.

9.2.7 Měření rozdílných hloubek Vrubu – Izod 1.

Pro měření vlivu hloubky vrubu byla zvolena výchozí poloha kladiva 430,8 mm a energie kyvadla 1,97 J. První měření proběhlo na 10 vzorcích metodou Izod s hloubkou vrubu 1 mm. Vrubová houževnatost byla přepočítána s odpovídající zbývající šířkou tělesa.

Tabulka 13 - hodnoty 1. Měření Izod – vrub 1 mm

No.	Vrubová houževnatost A_{iN} [kJ/m ²]
1	4,20
2	3,69
3	3,90
4	3,90
5	4,01
6	4,22
7	4,27
8	4,66
9	4,70
10	4,91
Aritmetický průměr	4,25
Směrodatná odchylka	0,37
Koeficient spolehlivosti	8,90 %

9.2.8 Testování odlehlosti hodnot rozdílných hloubek Vrubu – Izod 1.

Koeficient pro verifikaci odlehlosti opět volíme $T_k = 2,54$. Nejnižší hodnotou je $x_1 = 4,2$ kJ/m^2 , kde $T_1 = 0,11$ a nejvyšší hodnota je $x_{10} = 4,91 \text{kJ/m}^2$, kde $T_{10} = 1,67$. Obě hodnoty jsou menší než T_k . To znamená, že ze souboru nemusíme nic vyřazovat. Koeficient spolehlivosti je 8,9 %, což znamená, že jsou data ještě přijatelná.



Obrázek 25 - upnutí vzorku podle ISO 180-1

9.2.9 Měření rozdílných hloubek Vrubu – Izod 2.

Pro měření vlivu hloubky vrubu byla zvolena opět výchozí poloha kladiva 430,8 mm a energie kyvadla 1,97 J, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků kvůli rozdílným parametrům. Měření proběhlo na 10 vzorcích metodou Izod s hloubkou vrubu 2 mm. Vrubová houževnatost byla přepočítána s odpovídající zbývající šířkou tělesa.

Tabulka 14 - hodnoty 1. Měření Izod – vrub 2 mm

No.	Vrubová houževnatost A_{iN} [kJ/m ²]
1	2,87
2	2,89
3	3,00
4	3,04
5	3,13
6	3,19
7	3,21
8	3,22
9	3,26
10	3,26
Aritmetický průměr	3,11
Směrodatná odchylka	0,14
Koeficient spolehlivosti	4,57 %

9.2.10 Testování odlehlosti hodnot rozdílných hloubek Vrubu – Izod 2.

Koeficient pro verifikaci odlehlosti opět volíme $T_k = 2,54$. Nejnižší hodnotou je $x_1 = 2,87$ kJ/m², kde $T_1 = 1,59$ a nejvyšší hodnota je $x_{10} = 3,26$ kJ/m², kde $T_{10} = 1,04$. Obě hodnoty jsou menší než T_k . To znamená, že ze souboru nemusíme nic vyřazovat. Koeficient spolehlivosti je 4,6 %, a tak můžeme říct, že data jsou spolehlivá.

9.2.11 Měření rozdílných hloubek Vrubu – Izod 3.

Poslední série měření metodou Izod, na porovnání vlivu vrubu proběhla na vzorcích s vrubem hlubokým 3 mm. Výchozí poloha kladiva byla 430,8 mm a energie kyvadla byla stejná jako u předchozích 2 měření, a to 1,79 J.

Tabulka 15 - hodnoty 1. Měření Izod – vrub 3 mm

No.	Vrubová houževnatost A_{iN} [kJ/m ²]
1	2,83
2	2,95
3	2,95
4	2,99
5	3,02
6	3,04
7	3,13
8	3,19
9	3,21
10	3,26
Aritmetický průměr	3,06
Směrodatná odchylka	0,12
Koeficient spolehlivosti	4, 24 %

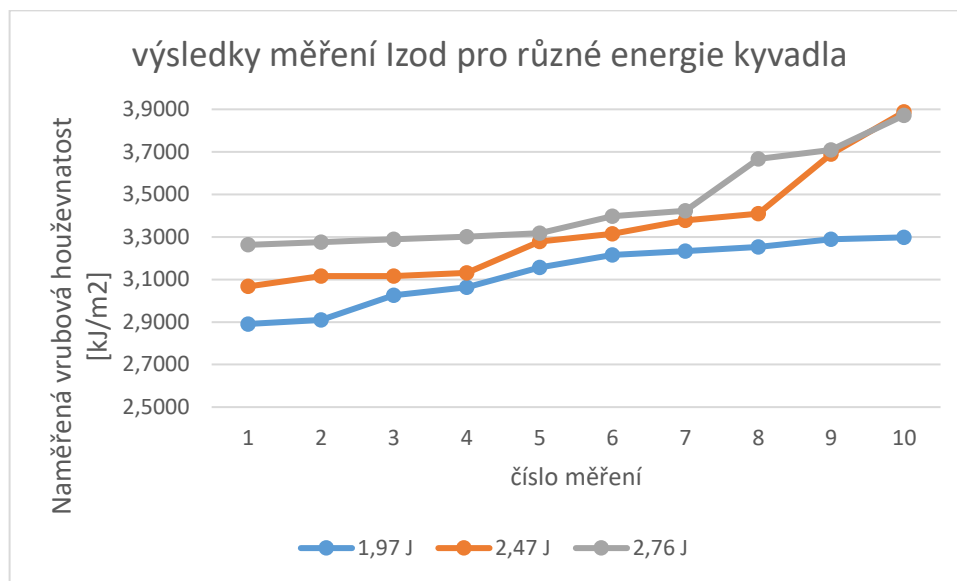
9.2.12 Testování odlehlosti hodnot rozdílných hloubek Vrubu – Izod 3.

T_k opět volíme $T_k = 2,54$. Nejnížší hodnota je $x_1 = 2,8315$ kJ/m², kde $T_1 = 1,69$. Nejvyšší hodnotou pak je $x_{10} = 3,2637$ kJ/m², kde $T_{10} = 1,46$. Obě hodnoty jsou menší než T_k . To znamená, že ze souboru nemusíme nic vyřazovat. Koeficient spolehlivosti je 4,24 %, a tak můžeme říct, že data jsou spolehlivá a zároveň jde o nejnížší koeficient spolehlivosti ze všech měření.

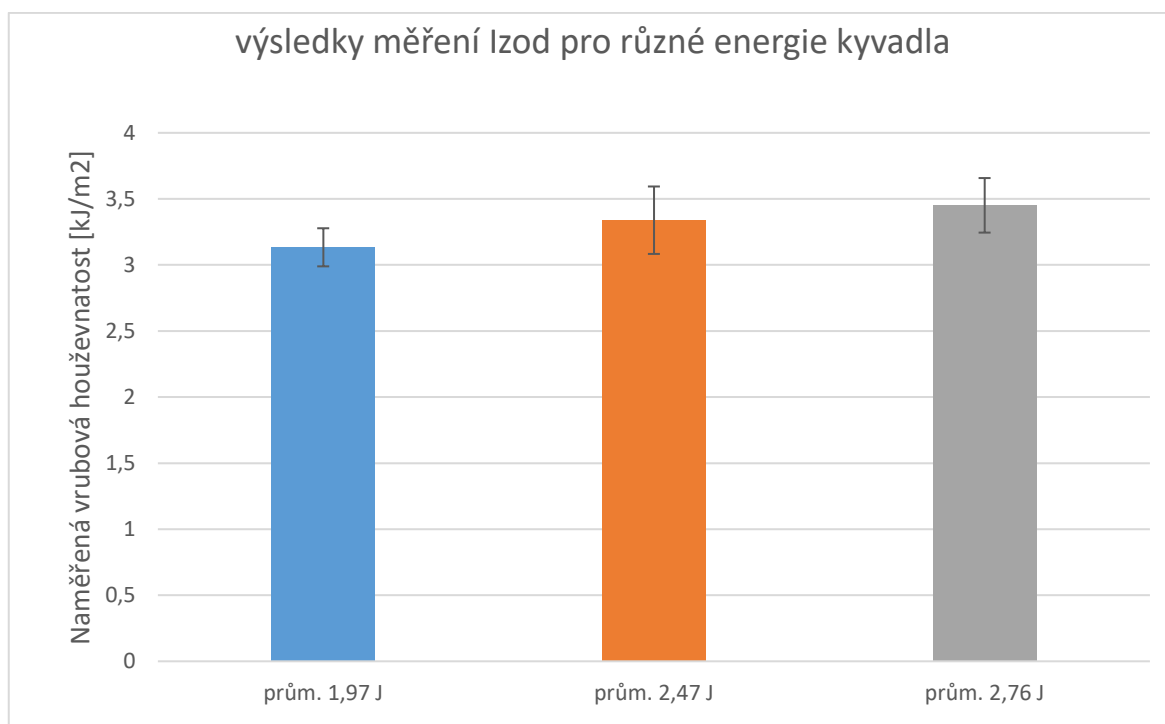
9.3 Srovnání výsledků měření pro ISO – 180

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejmenší průměrnou rázovou houževnatost - 3,1 kJ/m² měl polypropylen při energii kyvadla 1,97 J. Naopak nejvyšší rázová houževnatost - 3,45 kJ/m² byla naměřena s energií kyvadla 2,76 J. V podstatě se dá říct, že při zvýšení dopadové energie o 30 % se rázová houževnatost zvedla o 11 % za předpokladu, že měření nebylo

ovlivněno jiným faktorem, například kvalitou vzorků. Z pohledu na graf naměřených hodnot vyplývá vysoký rozptyl hodnot. Při takto nízkých číslech nemusí být výsledky přesné.



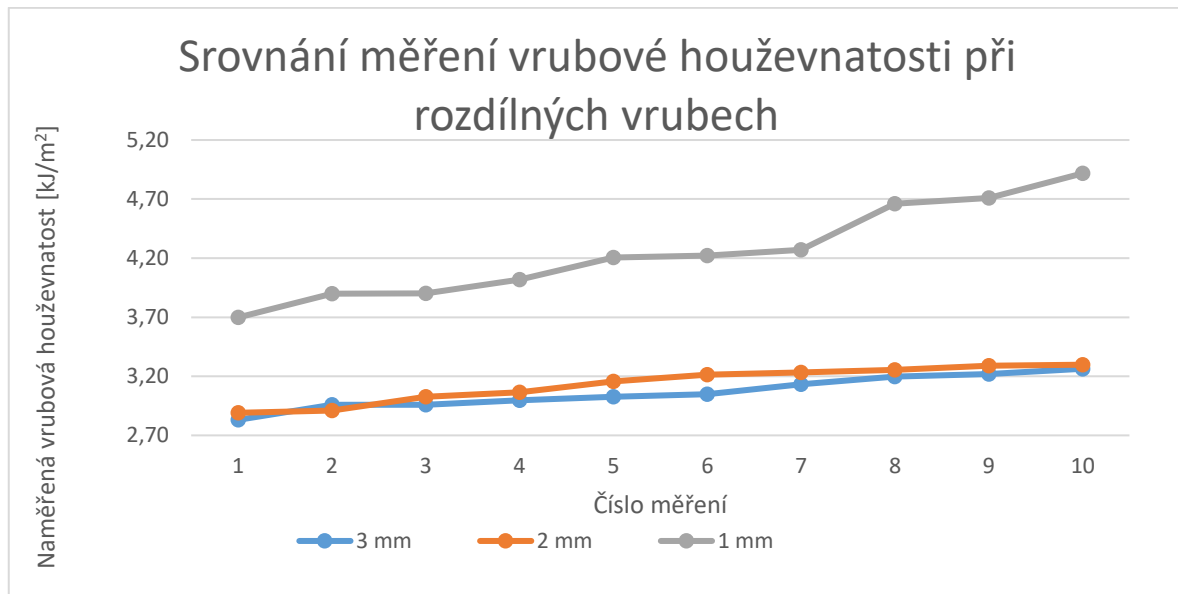
Obrázek 26 - výsledky měření vrubové houževnatosti pro měření s různými energiemi kladiva



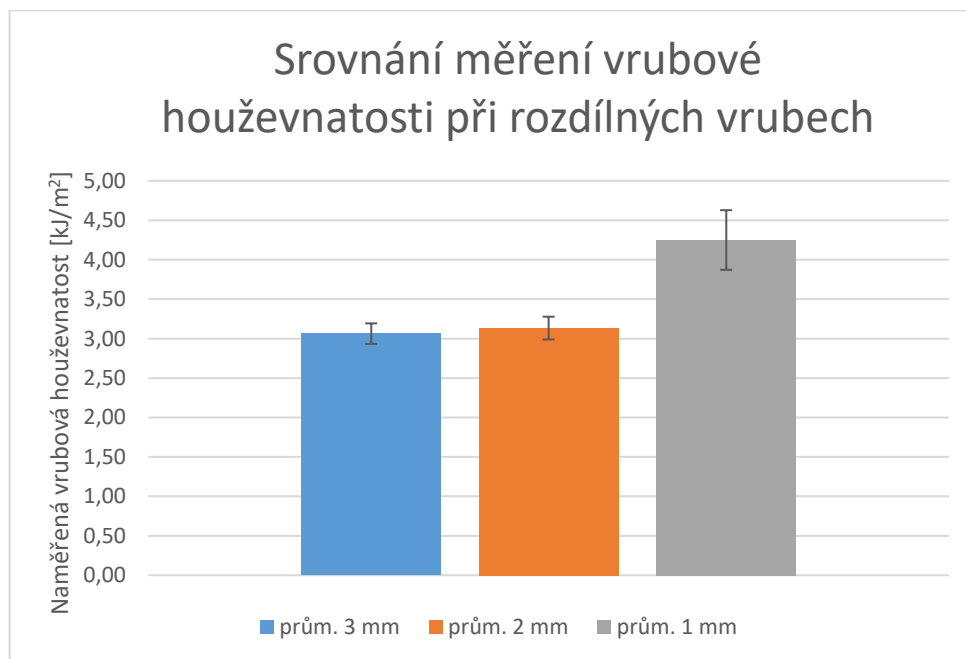
Obrázek 27 – průměrné výsledky měření vrubové houževnatosti pro měření s různými energiemi kladiva

Naměřená hodnota rázové houževnatosti pro rozdílné vruby je o něco jasnější. Pro vrub hluboký 1 mm dosahuje hodnota rázové houževnatosti polypropylenu $4,25 \text{ kJ/m}^2$, zatímco

pro vrub o hloubce 3 mm dosahuje pouze $3,06 \text{ kJ/m}^2$. Vyjádřeno v procentech, při hrubě hlubším o 66 % došlo k poklesu rázové houževnatosti o 28 %. Vzhledem k rozptylu při měření tato čísla nemusí být přesná, nicméně z grafu rozhodně vyplývá, že mezi hloubkou vrubu a výsledky měření existuje nelineární závislost.



Obrázek 28 – výsledky měření rázové houževnatosti Izod pro různé vruby



Obrázek 29 – průměrné výsledky rázové houževnatosti Izod pro různé vruby

9.4 Statistické vyhodnocení Měření metodu Izod

Poté, co po každém měření byly hodnoty přezkoušeny na jejich odlehlost, je potřeba pro každou hodnotu stanovit šířku intervalu na hladině spolehlivosti s 9 stupni volnosti. Hladinu

spolehlivosti volíme 95 %. Následně pomocí párového testu otestujeme hypotézu, že soubory hodnot jsou stejné. Studentův koeficient pro 9 stupňů volnosti a hladinu spolehlivosti 95 % byl vypočítán pomocí programu Excel a jeho hodnota je 2,26.

9.4.1 Šířka intervalu a test dvou středních hodnot pro rozdílné energie kyvadla

Interval pro měření s energií kyvadla 1,97 J je $A_{iN1} = (3,13 \pm 0,11) \text{ kJ/m}^2$. Pro měření s energií kyvadla 2,47 J je interval roven $A_{iN2} = (3,3 \pm 0,2) \text{ kJ/m}^2$. Výsledný interval pro poslední měření metodou Izod s rozdílnou energií kyvadla je 2,76 J je $A_{iN3} = (3,45 \pm 0,15) \text{ kJ/m}^2$.

Pro test rovnosti dvou středních hodnot na hladině významnosti 0,05 vyšla testovací hodnota $T_k = 2,1$. Testovací kritérium pro měření s energií 1,97 J a 2,47 J vyšlo 1,19, tudíž nám statistika říká, že na 95 % se jedná o stejné soubory hodnot. Stejný výsledek byl obdržen pro porovnání měření s 2,47 J a 2,76 J, kde testovací kritérium vyšlo 0,6. Avšak nejzajímavější výsledek vyšel, když byl porovnán soubor s energií 1,97 J a 2,76 J, kde nám vyšlo testovací kritérium 2,17, tedy větší než stanovená testovací hodnota – 2,1. Můžeme tedy konstatovat, že při větším rozdílu energií v případě měření metodou Izod dostaneme s 95 % pravděpodobností rozdílné soubory hodnot.

9.4.2 Šířka intervalu a test dvou středních hodnot pro měření s rozdílnou hloubkou vrubu

Pro vyhodnocení rozdílů při různých hloubkách vrubu byly použity stejné statistické metody. Pro 1 mm vrub je interval $A_{iN1mm} = (4,25 \pm 0,27) \text{ kJ/m}^2$. Pro hlubší vrub, o hloubce 2 mm, je interval rázové houževnatosti $A_{iN2mm} = (3,1 \pm 0,1) \text{ kJ/m}^2$. Měření s nejhlubším vrubem s hodnotou 3 mm pak mělo interval rázové houževnatosti $A_{iN3mm} = (3,0 \pm 0,1) \text{ kJ/m}^2$.

Pro test rovnosti dvou středních hodnot byla opět volena hladina významnosti 0,05, a tím pádem zůstala kritická hodnota 2,1. Testovací kritérium t mezi soubory s 2 mm a 3 mm vrubem vyšlo 2,08, což nám naznačuje, že by s pravděpodobností 95 % mohlo jít o soubor hodnot se stejnou střední hodnotou. Avšak testovací kritérium při porovnání hodnot pro měření mezi vruby 2 mm a 1 mm vyšlo vysoko nad kritickou hodnotou. Obdobně vysoká hodnota $t = 8,2$ byla získána pro porovnání 1 mm a 3 mm. V tomto případě se dá s klidem konstatovat, že hloubka vrubu má významný podíl na naměřené vrubové houževnatosti.

9.5 Podmínky a výsledky pro ISO - 179

Během měření bylo opět dosaženo stabilních podmínek. Teplota byla ustálená na 23°C. Vybraný materiál netrpí na vlhkost a měřicí přístroj byl dostatečně ukotven. Druhá série měření proběhla metodou Charpy.

9.5.1 Měření charpy - 1

První měření proběhlo metodou Charpy na 10 vzorcích. Energie kyvadla při dopadu dosahovala 1,97 J a kyvadlo bylo pouštěno z výšky 430,8 mm. Vrub byl hluboký 2 mm.

Tabulka 16 - hodnoty 1. Charpy Měření

No.	Vrubová houževnatost A_{cN} [kJ/m ²]
1	3,05
2	3,11
3	3,12
4	3,26
5	3,41
6	3,56
7	3,58
8	3,59
9	3,74
10	3,93
Aritmetický průměr	3,43
Směrodatná odchylka	0,28
Koeficient spolehlivosti	8,18 %

9.5.2 Testování odlehlosti hodnot Měření Charpy - 1

Opět testujeme soubor na odlehlost hodnot. T_k volíme 2,54 podle tabulky v teoretické části. Pro tento soubor se bavíme o $x_1 = 3,05 \text{ kJ/m}^2$, kde $T_1 = 1,29$ a $x_{10} = 3,93 \text{ kJ/m}^2$, kde $T_{10} = 1,68$. Opět se nejedná o odlehlé hodnoty, tudíž v souboru zůstávají. Z koeficientu spolehlivosti vyplývá, že data nemusí být spolehlivá, ale jsou přijatelná.

9.5.3 Měření Charpy - 2

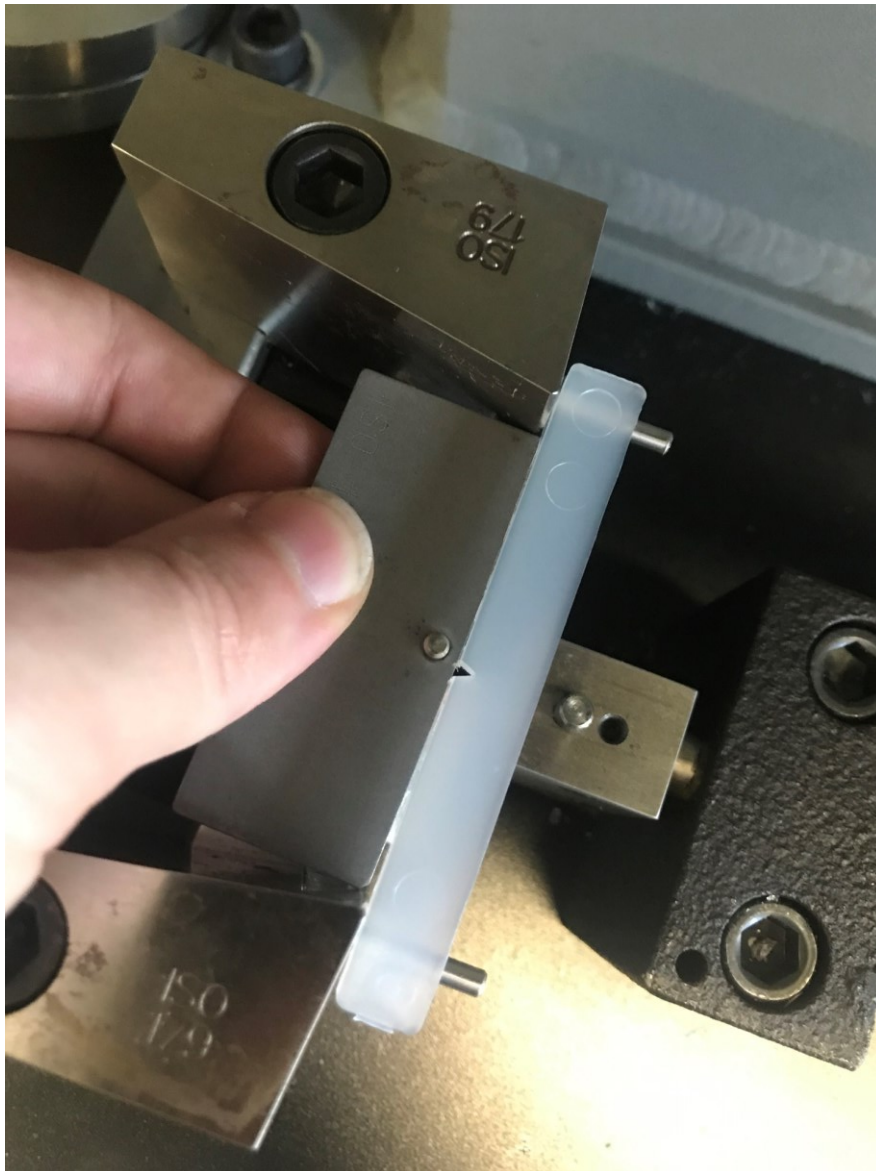
I druhé měření proběhlo metodou Charpy. Hloubka vrubu zůstala 2 mm. Energie kyvadla při dopadu dosahovala 2,47 J a kyvadlo bylo pouštěno z výšky 540,59 mm.

Tabulka 17 - hodnoty 2. Charpy Měření

No.	Vrubová houževnatost A_{cN} [kJ/m ²]
1	2,45
2	2,86
3	2,90
4	3,11
5	3,16
6	3,20
7	3,24
8	3,38
9	3,52
10	3,55
„Red Rabbit“	3,97
„Red Rabbit“	4,93
Aritmetický průměr	3,14 (3,36)
Směrodatná odchylka	0,31 (0,65)
Koeficient spolehlivosti	10 % (19,5 %)

9.5.4 Testování odlehlosti hodnot Měření Charpy - 2

Tento soubor měření je výjimečný tím, že během měření byly původně záměrně vyosené 2 vzorky, které jsou v tabulce označeny jako „Red Rabbit“. Při stanovení $T_k = 2,54$, což je pro soubor 10 hodnot ten přesnější koeficient, vyšla hodnota $T_r = 2,23$ pro vadný vzorek, který, jak jde vidět v tabulce, viditelně ovlivnil výsledky a stejně by byl započítán. Z toho vyplývá, že i pozice vzorku v případě Charpy konfigurace má vliv na výslednou houževnatost.



Obrázek 30 - – záměrně vyosený vzorek

9.5.5 Měření Charpy - 3

Během posledního měření metodou Charpy byla změněna výchozí poloha kyvadla. Energie kyvadla při dopadu dosahovala 2,76 J a kyvadlo bylo pouštěno z výšky 603 mm. Vrub byl hluboký 2 mm.

Tabulka 18 - hodnoty 3. Charpy Měření

No.	Vrubová houževnatost A_{cN} [kJ/m ²]
1	2,6972
2	2,7365
3	2,7496
4	2,7496
5	2,9471
6	3,1324
7	3,2122
8	3,2922
9	3,4661
10	3,5601
Aritmetický průměr	3,0543
Směrodatná odchylka	0,3064
Koeficient spolehlivosti	10,03 %

9.5.6 Testování odlehlosti hodnot Měření Charpy - 3

Pro verifikaci výsledků, jestli všechny hodnoty, znovu použijeme Grubbsův test odlehlosti hodnot pro nejnižší a nejvyšší hodnotu v souboru. Opět volíme $T_k = 2,54$ podle tabulky v teoretické části. Pro tento soubor se bavíme o $x_1 = 2,69$ kJ/m², kde $T_1 = 1,10$ a $x_{10} = 3,56$ kJ/m², kde $T_{10} = 1,56$. Obě hodnoty jsou menší než T_k . To znamená, že ze souboru nemusíme nic vyřazovat. Koeficient spolehlivosti dosahuje 10 %. Tím pádem data nemusí být spolehlivá, ale stále jsou přijatelná.

9.5.7 Měření rozdílných hloubek Vrubu – Charpy 1.

Pro měření vlivu hloubky vrubu byla zvolena výchozí poloha kladiva 430,8 mm a energie kyvadla 1,97 J. První měření proběhlo na 10 vzorcích metodou Charpy s hloubkou vrubu 1 mm. Vrubová houževnatost byla přepočítána s odpovídající zbývající šířkou tělesa.

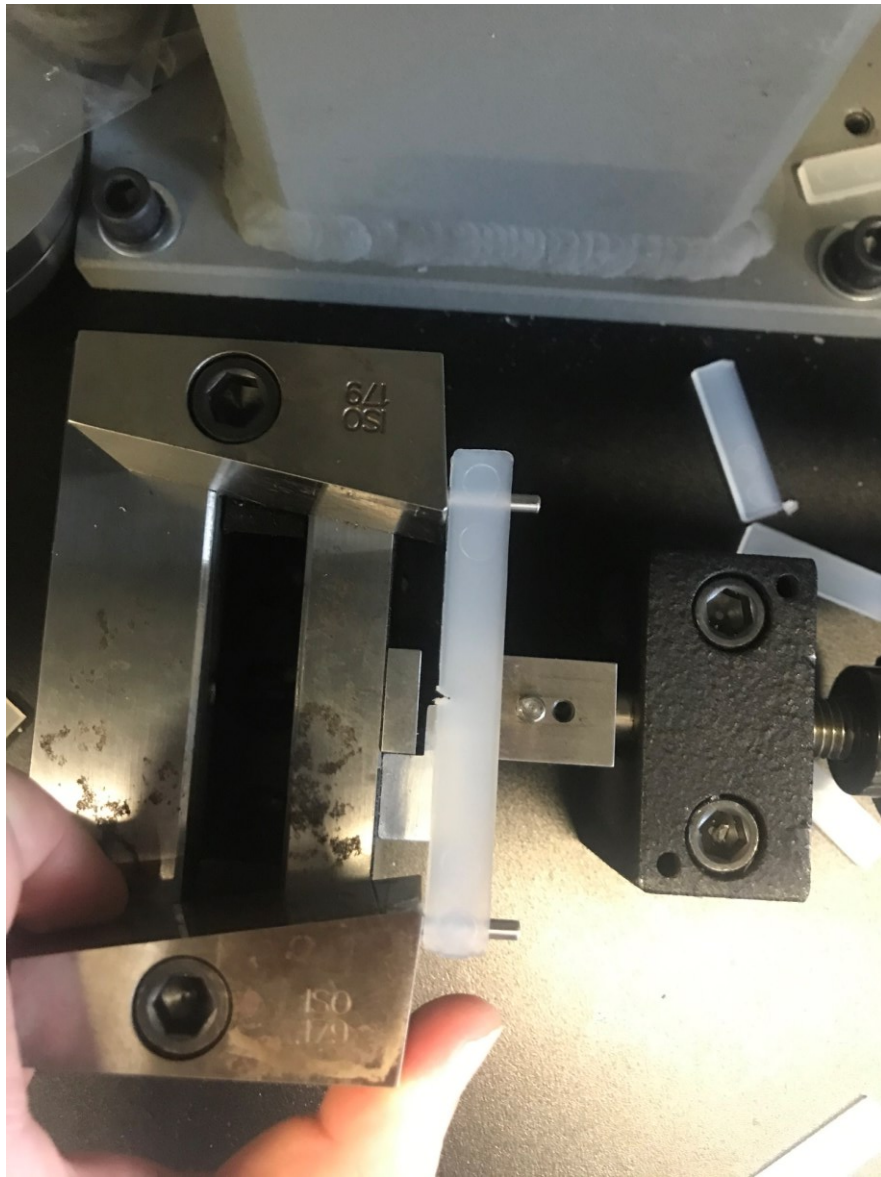
Tabulka 19 - hodnoty 1. Měření Charpy – vrub 1 mm

No.	Vrubová houževnatost A_{cN} [kJ/m ²]
1	4,82
2	4,21
3	4,66
4	4,74
5	4,93
6	4,94
7	4,96
8	5,00
9	5,08
10	5,23
Aritmetický průměr	4,86
Směrodatná odchylka	0,26
Koeficient spolehlivosti	5,44 %

9.5.8 Testování odlehlosti hodnot rozdílných hloubek Vrubu – Charpy 1.

Koeficient pro verifikaci odlehlosti opět volíme $T_k = 2,54$. Nejnížší hodnotou je $x_1 = 4,81$ kJ/m², kde $T_1 = 0,11$ a nejvyšší hodnota je $x_{10} = 5,23$ kJ/m², kde $T_{10} = 1,34$. Obě hodnoty

jsou menší než T_k . To znamená, že ze souboru nemusíme nic vyřazovat. Koeficient spolehlivosti v tomto případě je 5,44 %. Náměry se blíží spolehlivosti.



Obrázek 31 - upnutí vzorku podle ISO 179-1

9.5.9 Měření rozdílných hloubek Vrubu – Charpy 2.

Pro druhé měření vlivu rozdílných hloubek vrubu u ISO 179–1 byly zachovány předchozí parametry. Počáteční výška 430,8 mm a energie kyvadla 1,97 J. Hloubka vrubu byla 2 mm.

Tabulka 20 - hodnoty 2. Měření Charpy– vrub 2 mm

No.	Vrubová houževnatost A_{cN} [kJ/m ²]
1	3,33
2	3,42
3	3,43
4	3,45
5	3,49
6	3,49
7	3,49
8	3,55
9	3,57
10	4,26
Aritmetický průměr	3,55
Směrodatná odchylka	0,24
Koeficient spolehlivosti	6,94 %

9.5.10 Testování odlehlosti hodnot rozdílných hloubek Vrubu – Charpy 2.

V tomto případě Grubbsův test odlehlých hodnot splnil účel a odhalil špatně napolohovaný vzorek $x_{10} = 4,26$ kJ/m². T_{10} bylo v tomto případě 2,7 a tentokrát byla hodnota ze souboru vyřazena.

Tabulka 21 - hodnoty 2. Měření Charpy– vrub 2 mm – bez odlehlé hodnoty

No.	Vrubová houževnatost A_{cN} [kJ/m ²]
1	3,33
2	3,42
3	3,33
4	3,42
5	3,43
6	3,45
7	3,49
8	3,49
9	3,49
x	x
Aritmetický průměr	3,47
Směrodatná odchylka	0,06
Koeficient spolehlivosti	1,93 %

9.5.11 Verifikace upraveného souboru – 2. Charpy vrub 2 mm

Po úpravě souboru T_1 dosáhlo hodnoty 1,9 a T_9 hodnoty 1,37. Ani jedna z těchto hodnot již není odlehlá a koeficient spolehlivosti ukazuje, že se jedná o snad nejpřesnější měření.

9.5.12 Měření rozdílných hloubek Vrubu – charpy 3.

Poslední série měření metodou Charpy na porovnání vlivu vrubu proběhlo na vzorcích s vrubem hlubokým 3 mm. Výchozí poloha kladiva byla 430,8 mm a energie kyvadla byla stejná jako u předchozích 2 měření - 1,79 J.

Tabulka 22 - hodnoty 1. Měření Charpy – vrub 3 mm

No.	Vrubová houževnatost A_{cN} [kJ/m ²]
1	2,73
2	2,99
3	3,23
4	3,30
5	3,36
6	3,45
7	3,51
8	3,53
9	3,57
10	3,60
Aritmetický průměr	3,33
Směrodatná odchylka	0,26
Koeficient spolehlivosti	7,94 %

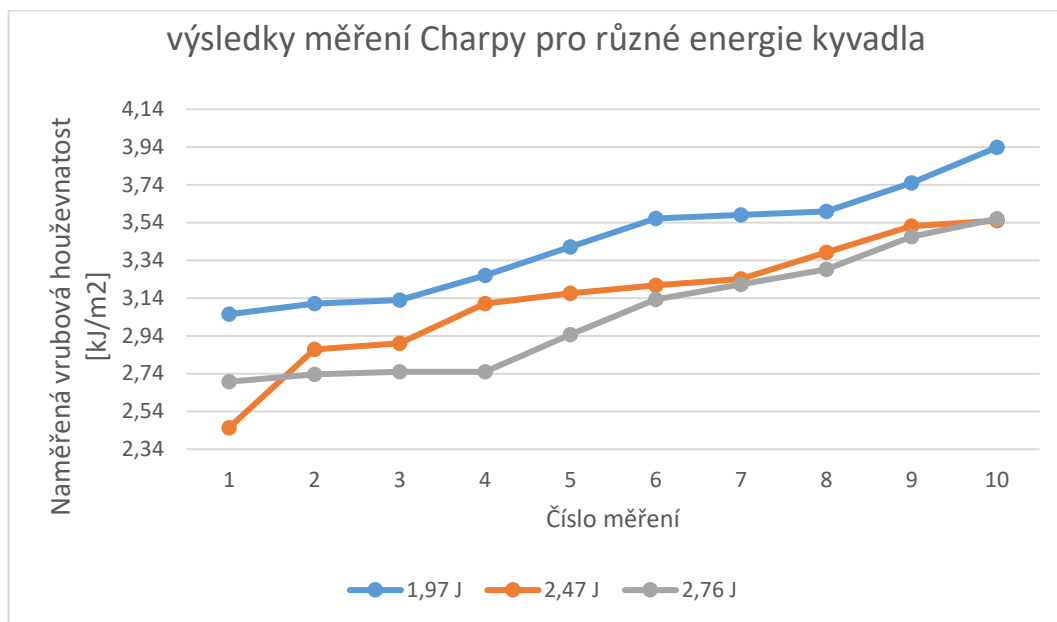
9.5.13 Testování odlehlosti hodnot rozdílných hloubek Vrubu – Charpy 3.

T_k opět volíme $T_k = 2,54$. Nejnižší hodnota je $x_1 = 2,73$ kJ/m², kde $T_1 = 2,12$. Nejvyšší hodnotou pak je $x_{10} = 3,6$ kJ/m², kde $T_{10} = 10,97$. Obě hodnoty jsou menší než T_k . To znamená, že ze souboru nemusíme nic vyřazovat. Koeficient spolehlivosti nám říká, že data jsou přijatelná.

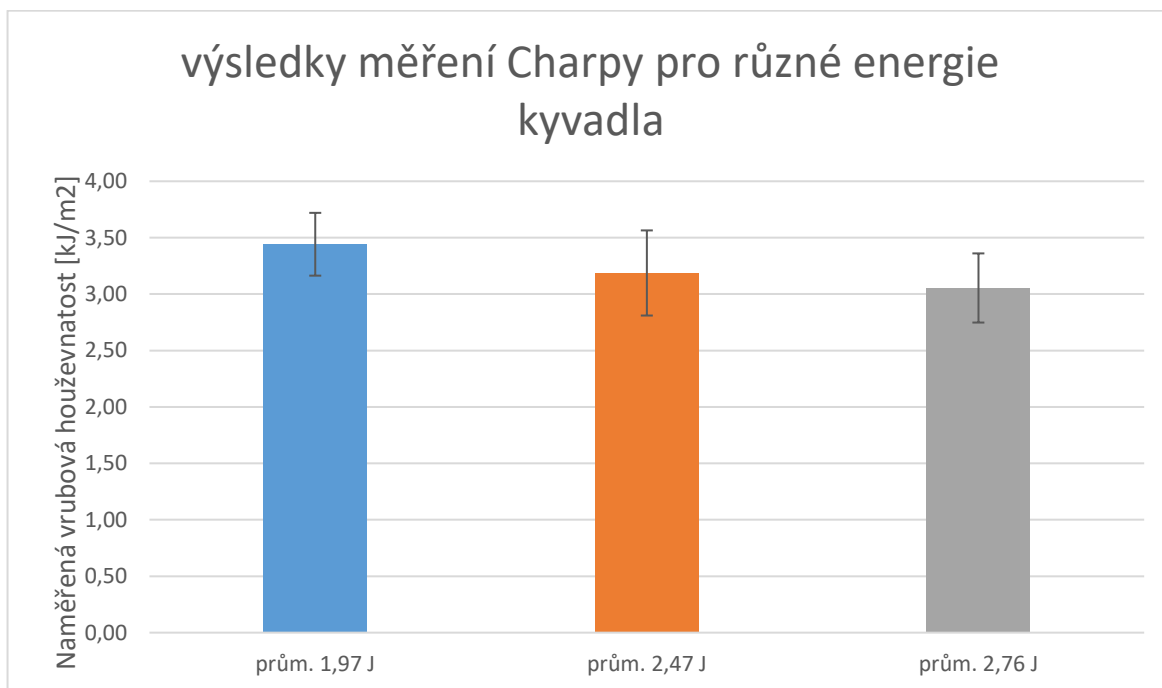
9.6 Srovnání výsledků měření pro ISO – 179

Z naměřených hodnot dle normy ISO 179 – 1 vyplývá, že nejmenší průměrnou vrubovou houževnatost má polypropylen, a to s energií kyvadla 2,76 J, kde průměrná hodnota dosáhla čísla 3,05 kJ/m². Nejvyšší průměrnou hodnotou pro Charpy vrubovou houževnatost byla hodnota 3,44 kJ/m², které bylo dosaženo s energií kyvadla 1,97 J. V tomto případě by se dalo říct, že za předpokladu, že nedošlo k zásadnímu ovlivnění měření jiným faktorem,

například chybou při přípravě vzorku, se zvedla hodnota vrubové houževnatosti o 11 % při snížení energie kyvadla o 30 %.

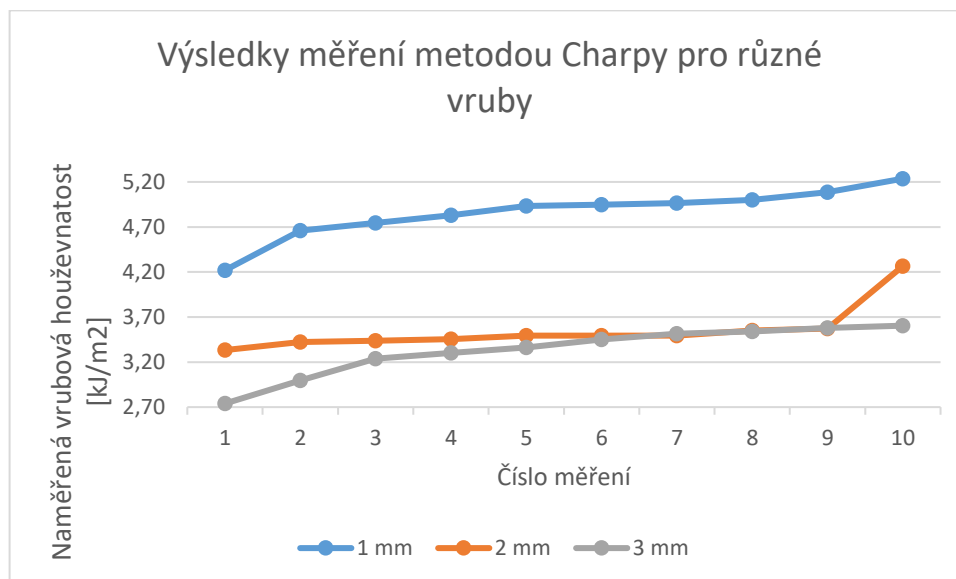


Obrázek 32 - srovnání hodnot měření vrubové houževnatosti pro různé energie metodou Charpy

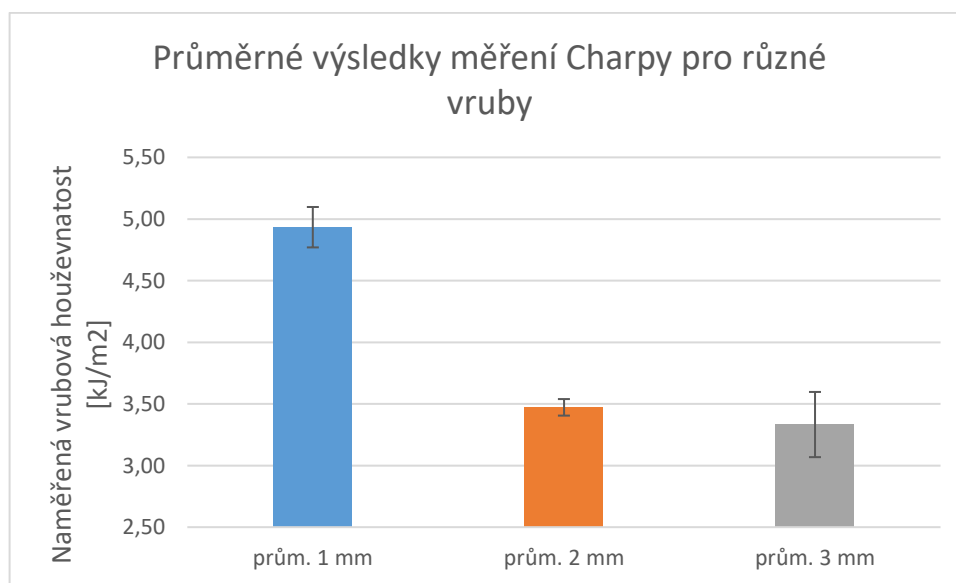


Obrázek 33 – srovnání průměrných výsledků měření metodou Charpy pro různé energie
 Vliv různých hloubek vrubů je prokazatelný už na první pohled. Pro vrub o hloubce 1 mm dosahuje vrubová houževnatost měřená metodou Charpy hodnoty 4,9 kJ/m². Naopak hodnota pro nejhlubší vrub, jehož hloubka byla 3 mm, dosáhla pouze čísla 3,3 kJ/m². Výsledek lze interpretovat i v procentech. Tedy, že při prohloubení vrubu o 66 % došlo

k poklesu vrubové houževnatosti o 32 %. Což je více jak čtvrtina a tím pádem mezi hloubkou vrubu a naměřenou rázovou houževnatostí existuje nelineární závislost.



Obrázek 34 - výsledky měření vrubové houževnatosti Charpy s rozdílnou hloubkou vrubu



Obrázek 35 – průměrné výsledky pro měření Charpy vrubové houževnatosti pro rozdílné vruby

9.7 Statistické vyhodnocení měření metodu Charpy

Pro statistické vyhodnocení je nejprve potřeba vyloučit odlehlé hodnoty, které by mohly negativně ovlivnit výsledky pro jednotlivé soubory hodnot, což bylo provedeno vždy hned po každém měření. Dále stanovíme šířku intervalu pro každé měření na hladině spolehlivosti o 9 stupních volnosti. Hladinu spolehlivosti zvolíme 95 %, a následně otestujeme soubory měření na shodu střední hodnoty za použití párového testu. Studentův koeficient byl spočítán

pomocí programu Excel. Byl počítán pro 9 stupňů volnosti a hladinu spolehlivosti 95 %. Hodnota tohoto koeficientu je opět 2,26.

9.7.1 Šířka intervalu a test dvou středních hodnot pro rozdílné energie kyvadla – Charpy

Šířka intervalu pro sérii měření s nejmenší energií kyvadla 1,97 je $A_{cN1} = (3,48 \pm 0,18) \text{ kJ/m}^2$. Pro druhou sérii měření, pro kterou bylo nastaveno kladivo na energii 2,47 J, dosahuje interval $A_{cN2} = (3,19 \pm 0,24) \text{ kJ/m}^2$. Poslední série měření, s nejvyšší energetickou hodnotou kyvadla - 2,76, má šířku intervalu $A_{cN3} = (3,0 \pm 0,2) \text{ kJ/m}^2$.

Kritická hodnota, která vyšla 2,1, byla opět počítána na hladině spolehlivosti 95 %. První srovnání srovnávalo mediány pro energie 1,97 J s 2,47 J. Testovací kritérium pro tyto 2 soubory vyšlo 2,08. V tomto případě statistika říká, že by se mohlo jednat o stejné soubory hodnot. Obdobně hovoří statistika i o srovnání Charpy vrubové houževnatosti pro 2,47 J a 2,76 J, kde testovací kritérium vyšlo 0,14. I. V tomto případě lze na 95 % uvést, že se jedná o shodný soubor hodnot. Avšak, když srovnáme testem středních hodnot mediány pro sérii měření s energií 1,97 J a 2,76 J dostáváme kritérium o hodnotě 3,4, což jasně poukazuje na rozdílnost těchto souborů hodnot.

9.7.2 Šířka intervalu a test dvou středních hodnot pro měření s rozdílnou hloubkou vrubu – Charpy

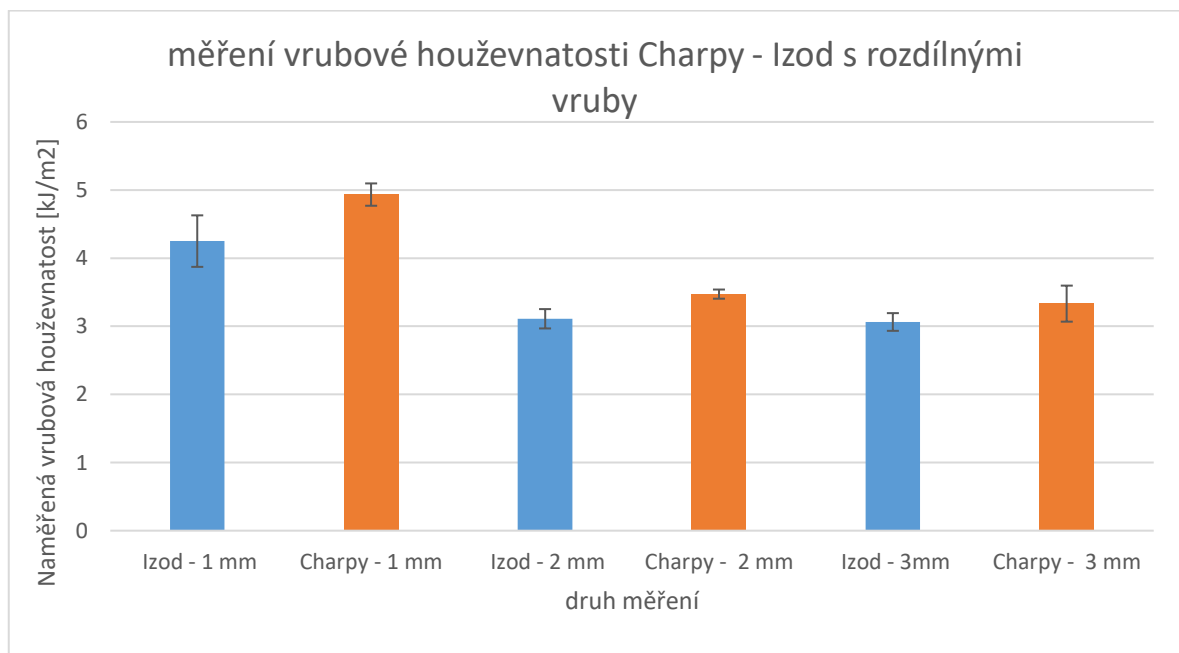
I pro měření s různou hloubkou vrubu byla stanovena šířka intervalu. Pro měření s vrubem 1 mm je interval vrubové houževnatosti $A_{cN1mm} = (4,9 \pm 0,1) \text{ kJ/m}^2$. Interval vrubové houževnatosti, pro hlubší vrub - 2 mm, má hodnotu $A_{cN2mm} = (3,5, \pm 0,1) \text{ kJ/m}^2$. A pro poslední soubor vzorků, které měly vrub hluboký 3 mm, je interval vrubové houževnatosti $A_{cN3mm} = (3,4 \pm 0,2) \text{ kJ/m}^2$.

Testování středních hodnot proběhlo podle identického výpočetního modelu jako předchozí testování středních hodnot. V tomto případě je vrubová houževnatost pro vrub 1 mm rozdílná oproti oběma dalším souborům. Ovšem statistika říká, že na 95% soubory s vruby 3 mm a 2 mm, mohou být shodné.

9.8 Srovnání výsledků Izod x Charpy

Když mezi sebou srovnáme výsledky měření Izod a Charpy na základě předchozích shrnutí, můžeme konstatovat, že trend závislosti na hloubce vrubu je totožný. Čím je hlubší vrub, tím nižší je vrubová houževnatost. Z grafů je zároveň patrné, že závislost na rozdílných hloubkách vrubů není lineární, protože se hloubka změnila vždy o 1 mm. Nicméně, porovnáme-li výsledky obou metod pro 1, 2 a 3 mm, bude rozdíl mezi prvním a druhým měřením rozhodně větší než mezi měřeními druhým a třetím.

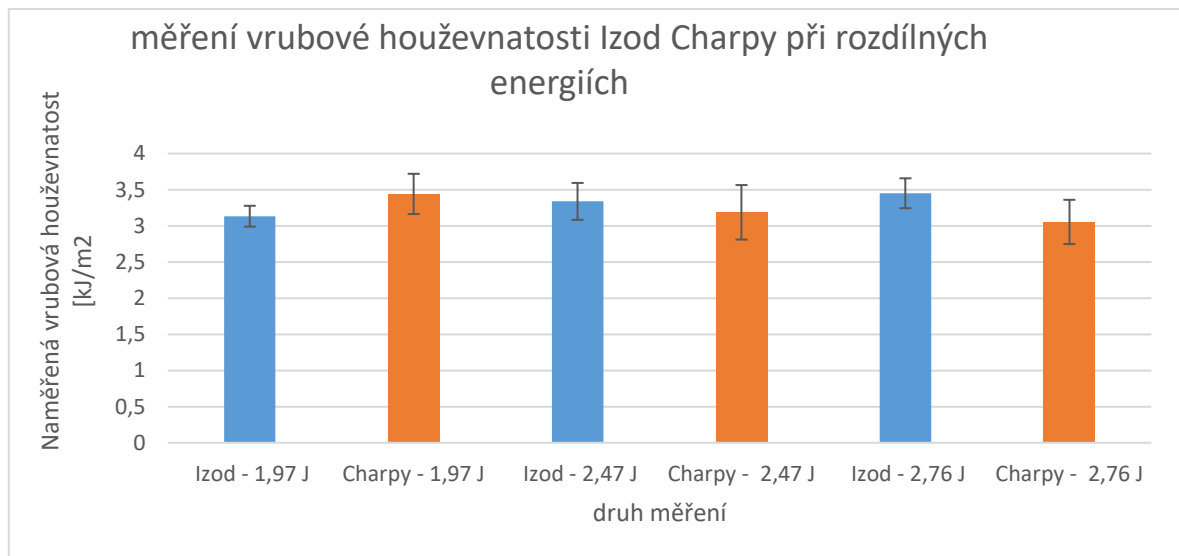
Po provedení testu středních hodnot dostáváme nejnižší testovací kritérium 2,7. Kritická hodnota v tomto případě byla opět 2,1. Tím pádem můžeme říct, že se výsledky vrubové houževnatosti liší i v závislosti na použité metodě.



Obrázek 36 - Výsledky pro hloubky vrubu, metoda Izod i Charpy

Obdobně, jako u rozdílných hloubek vrubu, i rozdílná energie kyvadla u metod Izod a Charpy přinesla podobné výsledky. Při porovnání hodnot pro 1, 97 J a 2, 76 J můžeme pozorovat významnější změnu vrubové houževnatosti, a to o 11 %. Je zajímavé, že v případě metody Izod došlo při zvýšení energie kyvadla k nárůstu vrubové houževnatosti, zatímco metodou Charpy došlo naopak k poklesu o stejné procento. Po porovnání středních hodnot souborů pro měření jednotlivými metodami energiemi 1, 97 J a 2, 76 J, kdy nejnižší testovací kritérium mělo hodnotu 2,7, můžeme konstatovat, že by mělo jít o různé soubory hodnot.

Porovnání výsledků metod Charpy a Izod, pro energii 2,47 vyšlo $t = 0,76$. V tomto jediném případě by se mohlo jednat o shodu ve výsledcích měření. Co se týká spolehlivosti měření, ač předpoklad byl, že Izod bude přesnější, díky menší možné chybě při uložení zkušebního tělesa dosáhly obě metody podobného koeficientu spolehlivosti. Izod 6 % a Charpy 7 %.



Obrázek 37 - Výsledky pro různé energie kyvadla, metoda Izod i Charpy

ZÁVĚR

Měření vrubové houževnatosti kyvadlovými měřicími přístroji je, jak tato práce demonstrovala, spíše orientační zkouškou. Výsledek ovlivňuje jak kvalita a parametry vzorku, tak různé parametry zkoušky včetně použitých metod. Proto je zkouška definovaná v normě a je potřeba uvádět parametry jednotlivých zkoušek. Pro lepší demonstraci rozdílů v energiích kyvadla by bylo lepší při příštím měření použít vyšší energie, aby se případný rozdíl projevil více než jen rozdílem v desetinných hodnotách. Původně byly zamýšlené vyšší energetické vstupy, tuto zkoušku však laboratorní zařízení nakonec neumožnilo.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] BARBOSA, Eduardo Fernandes a Luciano Paulino da SILVA. 2013. *Polypropylene: Synthesis, Applications, and Environmental Concerns*. New York: Nova Science Publishers, Inc. ISBN 978-1-62417-142-0.

[2] MCKEEN, Laurence W. 2017. *Film Properties of Plastics and Elastomers, 4th Edition*. Amsterdam: Elsevier. ISBN 978-0-12-813292-0.

[3] CHALMERS, John M. a Robert J. MEIER. 2008. *Comprehensive Analytical Chemistry, Volume 53 - Molecular Characterization and Analysis of Polymers*. Amsterdam: Elsevier.

Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/handbook/comprehensive-analytical-chemistry/vol/53/suppl/C>

[3] CIULLO, Peter A. 1996. *Industrial Minerals and Their Uses – A Handbook and Formulary*. William Andrew Publishing. ISBN 9780080946443.

[4] SAHIN, Senol a Pasa YAYLA. 2005. *Polymer Testing – volume 24*. Amsterdam: Elsevier. s. 613-619. ISSN 0142-9418.

[5] MOALLY, John. 2001. *Plastics Failure – Analysis and Prevention*. William Andrew Publishing. ISBN 1-884207-92-8.

[6] ISO 179:2000 *Plastics – Determination of Charpy impact properties*.

[7] ÖCHSNER, A., A. WAQAR a N. ALI. 2009. *Nanocomposite Coatings and Nanocomposite Materials*. Trans Tech Publications Ltd. ISBN 0-87849-346-8.

[8] SWALLOWE, G. M. 1999. *Mechanical Properties and Testing of Polymers – Factors Affecting Impact Strength*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. s. 127-128. ISBN 978-94-015-9231-4.

[9] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. *Dynamické zkoušky, Ufmi.ft.utb [online]*. 2021 [cit.2021-14-04]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf.

[10] BĚHÁLEK, Luboš. *Střední odborné učiliště Svitavy. Polymery, Publi.cz [online]*, 2016 [cit. 2021-14-04] Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/01.html>.

[11] WOLSTENHOLME W. E., S. E. PREGUN a C. F. STARK. 1964. *Journal of applied polymer science vol. 8. - Factors influencing izod impact properties of*

thermoplastics measured with the autographic impact test. s. 119-140. ISSN 1097- 4628.

[12] ISO 180:2000. Plastics - Determination of Izod impact strength.

[13] TIMOSHENKO, S. 1955. Strength of Materials, 3rd ed. New York: Van Nostrand.

[14] GRELLMANN, Wolfgang a Sabine SEIDLER. 2007. Polymer Testing. Munich: Carl Hanser Verlag. ISBN 978-1-56990-549-4.

[15] TAKASHIMA, Yasuhito a Fumiyoshi MINAMI. 2017. Proceedings of the Welding Society vol. 35, 2nd edition.

[16] HOLT, John M. 1990. Charpy Impact Test: Factors and Variables. West Conshohocken, PA: ASTM International. ISBN: 0-803-1295-5.

[17] DRISCOLL, Stephen Burke. 1998. The Basics of Testing Plastics – Mechanical Properties, Flame Exposure, and General Guidelines: ASTM Manual Series: MNL 35. 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959.

[18] GILES, H. F. Jr. a J. R. WAGNER Jr. 2014. Extrusion – The Definitive Processing Guide and Handbook – 2nd Edition. Amsterdam: Elsevier. ISBN 9781437734829.

[19] KIRAN, D. R. 2019. Production Planning and Control – A Comprehensive Approach. Oxford: Elsevier. ISBN 978-0-12-818364-9.

[20] HYLTON, Donald C. 2004. Understanding Plastics Testing. Cincinnati: Hanser Gardner Publications. ISBN: 1-56990-366-2.

[21] DAIYAN, E., F. ANDREASSEN, F. GRYTTE, O. V. LYNGSTAD, T. LUKSEPP a H. OSNES. 2010. Low-velocity impact response of injection-moulded polypropylene plates – Part 1: Effects of plate thickness, impact velocity and temperature, Polymer Testing, Volume 29, Issue 6. s. 648-657. ISSN 0142-9418.

[22] BUSCHOW, K.H., C. JÜRGEN, R. W. FLEMINGS, M. C. ILSCHNER, B. KRAMER, E. J. M., SUBHASH. 2001. Encyclopedia of Materials – Science and Technology, Volumes 1-11. Elsevier. ISBN 978-0-08-052358-3.

[23] DUAN, Y., A. SAIGAL a R. GREIF. 2003. *Impact Behavior and Modeling of Engineering Polymers – POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, JANUARY 2003, Vol. 43, No. 1.*

[24] GRUBBS, Frank E. 1950. *Sample criteria for testing outlying observations – Annals of Mathematical Statistics. Institute of Mathematical Statistics.*

[25] DERRICK, B., P. WHITE a D. TOHER. 2017. *Metodološki Zvezki – Advances in Methodology and Statistics. ISSN 1854-0031.*

[26] LEPŠ, Jan Šuspa a Petr ŠMILAUER. 2016. *Biostatistika. České Budějovice: EPISTEME. ISBN 978-80-7394-587-9.*

[27] Tinius Olsen. 2016. *Model - IT 503 Pendulum Impact Tester, Instructions For Use Doc. Ref. T92CE-7001 Issue 02. USA: Tinius Olsen.*

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PVC	Polyvinilchlorid
PP	polypropylen
I-PP	Isotaktický polypropylen
A-PP	Ataktický polypropylen
PS	Polystyren
W	Práce
A_ε	Houževnatost v tahu
W_ε	práce v tahu
l	délka
L	rozpětí
h	tloušťka
A_n	Rázová houževnatost
A_{iu}	Rázová houževnatost Izod
A_{iN}	Vrubová houževnatost Izod
E_c	Energie spotřebovaná na přeražení zkušebního tělesa Izod
T_g	Teplota skelného přechodu
PMA	Polymetylakrylát
T_m	Teplota tání
B_x	šíře vrubu
E	Energie
V	rychlost
E_p	Potenciální energie
E_k	Kinetická energie
m	hmotnost
g	tíhové zrychlení

U	Deformace
t	čas
\bar{x}	aritmetický průměr
n	počet hodnot
s	směrodatná odchylka
T_n	Testovací kritérium
T_k	Kritická hodnota
μ	medián

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Padající šipka během Gardnerova testu[2].....	18
Obrázek 2 - schéma kyvadla rázové zkoušky tahem[9]	19
Obrázek 3 - schéma Dynstat[9]	19
Obrázek 4 - schéma Charpyho kladiva[2]	21
Obrázek 5 - poloha těles pro Charpyho test [6]	22
Obrázek 6 - typy vrubů[6]	23
Obrázek 7 - schéma Charpyho zkoušky[10].....	23
Obrázek 8 - schéma upnutí tělesa při použití metody Izod[20].....	24
Obrázek 9 - druhy upnutí těles v případě metody Izod[12].....	25
Obrázek 10 - typy vrubů Izod[12]	26
Obrázek 11 - závislost rázové houževnatosti na teplotě pro PE pryskyřici[2]	30
Obrázek 12 - Vliv teploty na Charpy rázovou energii pro PP-R [21]	31
Obrázek 13 – demonstrace závislosti vrubu na lomové síle[13]	32
Obrázek 14 – Závislost vrubové houževnatosti Charpy na rádiu vrubu pro vybrané plasty (a) a závislost vrubové houževnatosti Izod na rádiu vrubu pro vybrané plasty (b)[14].....	34
Obrázek 15 - Závislost energie na hmotnosti základny[8]	35
Obrázek 16 - vliv dopadové rychlosti na kinetickou energii jako funkce času[15]	37
Obrázek 17 - Vliv dopadové rychlosti na deformační energii jako funkce času[15]	38
Obrázek 18 - lisovací parametry 1.....	46
Obrázek 19 – lisovací parametry 2.	46
Obrázek 20 - výlisky před oddělením od vtoku.....	47
Obrázek 21 - výlisky po oddělení vtoku	47
Obrázek 22 - – schéma vrubu typu A	48
Obrázek 23 - vrubovací zařízení	48
Obrázek 24 - schéma přístroje IT 503	49

Obrázek 25 - upnutí vzorku podle ISO 180-1.....	54
Obrázek 26 - výsledky měření vrubové houževnatosti pro měření s různými energiemi kladiva.....	57
Obrázek 27 – průměrné výsledky měření vrubové houževnatosti pro měření s různými energiemi kladiva.....	57
Obrázek 28 – výsledky měření rázové houževnatosti Izod pro různé vruby.....	58
Obrázek 29 – průměrné výsledky rázové houževnatosti Izod pro různé vruby.....	58
Obrázek 30 - – záměrně vyosený vzorek.....	62
Obrázek 31 - upnutí vzorku podle ISO 179-1.....	65
Obrázek 32 - srovnání hodnot měření vrubové houževnatosti pro různé energie metodou Charpy.....	69
Obrázek 33 – srovnání průměrných výsledků měření metodou Charpy pro různé energie	69
Obrázek 34 - výsledky měření vrubové houževnatosti Charpy s rozdílnou hloubkou vrubu	70
Obrázek 35 – průměrné výsledky pro měření Charpy vrubové houževnatosti pro rozdílné vruby	70
Obrázek 36 - Výsledky pro hloubky vrubu, metoda Izod i Charpy.....	72
Obrázek 37 - Výsledky pro různé energie kyvadla, metoda Izod i Charpy	73

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - přehled rozměrů zkušebních těles.[6].....	22
Tabulka 2 - rozměry zkušebních těles Izod[12].....	26
Tabulka 3 - demonstrace rozdílných teplot skelných přechodů vybraných polymerů [22].	29
Tabulka 4 - příklady vlivu vlhkosti na rázovou energii Izod [J/m ²] Pro rozdílné Polyamidy[17]	31
Tabulka 5 - Vliv hmotnosti základny na absorbované rázové zatížení polymerů[8]	35
Tabulka 6 - měřený vliv rychlosti na rázovou houževnatost u kovů[16]	38
Tabulka 7 - výpočetní koeficienty pro korelaci tření[16]	39
Tabulka 8 - kritické hodnoty pro Grubbsovo rozdělení[24]	41
Tabulka 9 - Materiálové vlastnosti Mosten 58.332	45
Tabulka 10 - hodnoty 1. Izod Měření	50
Tabulka 11 - hodnoty 2. Izod Měření	51
Tabulka 12 - hodnoty 3. Izod Měření	52
Tabulka 13 - hodnoty 1. Měření Izod – vrub 1 mm.....	53
Tabulka 14 - hodnoty 1. Měření Izod – vrub 2 mm.....	55
Tabulka 15 - hodnoty 1. Měření Izod – vrub 3 mm.....	56
Tabulka 16 - hodnoty 1. Charpy Měření.....	60
Tabulka 17 - hodnoty 2. Charpy Měření.....	61
Tabulka 18 - hodnoty 3. Charpy Měření.....	63
Tabulka 19 - hodnoty 1. Měření Charpy – vrub 1 mm.....	64
Tabulka 20 - hodnoty 2. Měření Charpy– vrub 2 mm	66
Tabulka 21 - hodnoty 2. Měření Charpy– vrub 2 mm – bez odlehlé hodnoty.....	67
Tabulka 22 - hodnoty 1. Měření Charpy – vrub 3 mm.....	68

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: POLYPROPYLEN MOSTEN ČÁST 2: MATERIÁLOVÉ LISTY

PŘÍLOHA POLYPROPYLÉN MOSTEN ČÁST 2: MATERIÁLOVÉ LISTY

CHEMOPETROL a. s. 436 70 Litvínov	Polypropylén MOSTEN Část 2: Materiálové listy	PND 33-301-96 SKP 24.16.51. Vydání: 1
--------------------------------------	--	---



HOMOPOLYMER PRO VÝROBU PÁSKŮ MOSTEN 58.332			
<p><i>Charakteristika</i> Mosten 58.332 je homopolymer s UV aditivací, určený pro výrobu monoaxiálně orientovaných pásků pro následné textilní zpracování. Typickou aplikací je výroba motouzů, provazů a lan.</p> <p><i>Zdravotní nezávadnost</i> Mosten 58.332 splňuje požadavky zákona č. 258/2000 Sb., vyhlášky MZ ČR č. 38/2001 Sb. o hygienických požadavcích na výrobky určené pro styk s potravinami a pokrmů a požadavky Směrnice Rady EU 90/128/EEC včetně dodatků (92/39/EEC, 93/9/EEC, 95/3/EC, 96/11/EC, 1999/91/EC, 2001/62/EC) a souvisejících Směrnic.</p> <p><i>Poznámka</i> Stupeň hořlavosti C-3 dle ČSN 73 0823 Mezinárodní označení ISO 1873-PP-H,TL,16-05-022</p>			
<i>Ukazatele jakosti</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Hodnoty</i>	<i>Zkouší se dle:</i>
Index toku taveniny (230/2,16)	$\text{g} \cdot 10^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	1,5 - 2,2	ISO 1133
Hustota (23 ±0,1) °C	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	900 - 915	ISO 1183
Obsah těkavých látek	%	max. 0,2	ISO 1269
Index izotakticity	%	min. 98	ISO 9113
Obsah nečistot	$\text{ks} \cdot \text{kg}^{-1}$	nepřítomny	odst. 4.3.1.1
Žlutost přírodního granulátu	standard	max. B	ČSN 64 0532 metoda B
Napětí na mezi kluzu v tahu	MPa	min. 30,0	ISO 527
Modul pružnosti v tahu	MPa	min. 1200	ISO 527
Teplota měknutí dle Vicata	°C	min. 155	ISO 306
Teplota průhybu při zatížení	°C	min. 55	ISO 75
Tvrdost Shore D		70*	ISO 868
Hodnocení fólie		standard	4.3.2.1
* informativní hodnota			

Nahrazuje materiálový list z: 15. 4. 2002

Materiálový list platný od: 3. 6. 2002