

Vliv změny parametrů pádové zkoušky na deformaci zkušebních těles z termoplastů

Ing. Iveta Mizerová

Bakalářská práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ing. Iveta Mizerová**
Osobní číslo: **T14677**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv změny parametrů pádové zkoušky na deformaci zkušebních těles z termoplastů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování rešerše na dané téma**
- 2. Příprava zkušebních těles**
- 3. Provedení zkoušek a vyhodnocení výsledků**
- 4. Diskuze a shrnutí výsledků**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Bednařík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

2. ledna 2017

Termín odevzdání bakalářské práce:

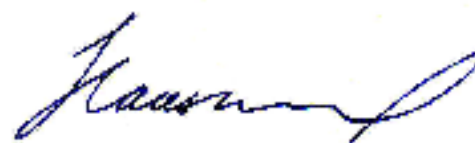
19. května 2017

Ve Zlíně dne 31. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

P R O H L Á Š E N Í

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 10.5.2017

Mizerová Iveta

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 nevydělěčně 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 nahlédnutí veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracovních vysoké školy, kde se koná 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 nerasahuje 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 (školské dílo).

⁴¹ 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 Školské 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 cizokrádežného projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zásadně není omezeno.

(2) Nemá-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licencovat, 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 výdětku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložil, o to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přibližně k výši výdětku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 2.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vlivem změny parametru pádové zkoušky (bez mazání tlouku) na parametry pádové zkoušky a deformaci zkušebních těles šesti druhů termoplastů. Měnícím se parametrem byla výška pádu tlouku se závažím v gravitačním poli a vyhodnocovacími parametry byla maximální dopadová síla a celková spotřebovaná práce. Zkouška byla prováděna na měřicím zařízení HIT 230F německé firmy Zwick GmbH & Co. KG. Bylo zjištěno, že nastavená výška pádu má vliv na vyhodnocované parametry a samotnou deformaci materiálu.

Klíčová slova:

polystyren (PS), akrylonitril-butadien-styren (ABS), kopolymer styren-akrylonitril (SAN), polypropylen (PP), polypropylen plněný 30 % skelných vláken (PP 30 % GF), vysokohustotní polyetylen (HDPE), deformace polymerů, dynamické zkoušky rázové, pádová zkouška

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the influence of the change of the drop weight test parameters (without lubrication of the penetrator) on the parameters of the fall test and the deformation of test specimens of six types of thermoplastics. The changing parameter was used the height of the fall of the penetrator with the weight in the gravitational field, and the evaluated parameters were the maximum impact force and the total consumed work. The test was carried out on the measuring device HIT 230F from the German company Zwick GmbH & Co. KG. KG. It has been found that the set drop height affects the parameters being evaluated and the deformation of the material itself.

Keywords:

polystyrene (PS), acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), co-polymer styrene-acrylonitrile (SAN), polypropylene (PP), polypropylene with 30 % glass fibre (PP 30 % GF), high density polyethylene (HDPE), polymer deformation, dynamic impact tests, drop weight test

Ráda bych chtěla poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Martinu Bednaříkovi, Ph.D., za jeho odbornou pomoc při zpracování bakalářské práce. Dále zvláštní poděkování patří regionálnímu výzkumnému centru CEBIA – Tech a jejich zaměstnancům, ve kterém byla prováděna rázová zkouška pádem. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině a mým nejbližším za podporu po celou dobu studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 DĚLENÍ POLYMERŮ	12
1.1 DĚLENÍ SYNTETICKÝCH POLYMERŮ.....	12
1.1.1 Termoplasty.....	12
1.1.2 Reaktoplasty.....	13
1.2 DĚLENÍ POLYMERŮ PODLE POUŽITÍ.....	14
1.2.1 Standardní (komoditní) polymery.....	14
1.2.2 Konstrukční polymery.....	15
1.2.3 Speciální (hi-tech) polymery.....	15
2 DEFORMACE POLYMERŮ	16
2.1 LOM MATERIÁLU.....	16
2.2 CHOVÁNÍ VYBRANÝCH POLYMERŮ PŘI MECHANICKÉM NAMÁHÁNÍ.....	17
3 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY RÁZOVÉ	19
3.1 RÁZOVÁ A VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST METODOU CHARPY.....	19
3.2 METODA DYNSTAT	20
3.3 METODA IZOD.....	21
3.4 RÁZOVÁ ZKOUŠKA PÁDEM	21
3.4.1 Firmy vyrábějící padostroje	22
4 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ	26
4.1 MÍRY CENTRÁLNÍ TENDENCE.....	26
4.1.1 Aritmetický průměr	26
4.1.2 Medián.....	26
4.1.3 Modus.....	27
4.2 MÍRY VARIABILITY.....	27
4.2.1 Variační rozpětí.....	27
4.2.2 Rozptyl a směrodatná odchylka	28
4.2.3 Variační koeficient.....	28
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	30
6 POPIS VÝROBY ZKUŠEBNÍCH TĚLES	31
6.1 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES TECHNOLOGIÍ VSTŘIKOVÁNÍ.....	31
6.1.1 Technické parametry vstřikovacího stroje	32
6.2 VÝBĚR POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	33
7 ZAŘÍZENÍ A POSTUP PROVEDENÍ PÁDOVÉ ZKOUŠKY	37
7.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ.....	37
7.2 POSTUP ZKOUŠKY.....	39
8 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	41
8.1 POLYSTYREN.....	41
8.1.1 Závislost maximální síly na výšce pádu.....	42
8.1.2 Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu.....	45

8.1.3	Porovnání parametrů pádové zkoušky	47
8.2	AKRYLONITRIL-BUTADIEN-STYREN.....	48
8.2.1	Závislost maximální síly na výšce pádu.....	48
8.2.2	Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu	51
8.2.3	Porovnání parametrů pádové zkoušky	54
8.3	KOPOLYMER STYREN-AKRYLONITRIL.....	55
8.3.1	Závislost maximální síly na výšce pádu.....	55
8.3.2	Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu	58
8.3.3	Porovnání parametrů pádové zkoušky	61
8.4	POLYPROPYLEN.....	62
8.4.1	Závislost maximální síly na výšce pádu.....	62
8.4.2	Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu	65
8.4.3	Porovnání parametrů pádové zkoušky	68
8.5	POLYPROPYLEN PLNĚNÝ 30 % SKELNÝCH VLÁKEN	69
8.5.1	Závislost maximální síly na výšce pádu.....	69
8.5.2	Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu	72
8.5.3	Porovnání parametrů pádové zkoušky	75
8.6	VYSOKO-HUSTOTNÍ POLYETYLEN.....	76
8.6.1	Závislost maximální síly na výšce pádu.....	76
8.6.2	Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu	79
8.6.3	Porovnání parametrů pádové zkoušky	82
9	DISKUZE	84
	ZÁVĚR	93
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	95
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	98
	SEZNAM OBRÁZKŮ	100
	SEZNAM TABULEK.....	104

ÚVOD

Cílem bakalářské práce je zjistit, jaký vliv mají změny parametrů pádové zkoušky na deformaci zkušebních těles z termoplastů. Těmito parametry se rozumí různá výška pádu tlouku o určité hmotnosti se závažím v gravitačním poli Země. Výška pádu se reprezentuje energií pádu, která je nastavovaná v programu propojeným s padostrojem. Pádová zkouška byla provedena na šesti různých druzích termoplastických polymerů. Byli vybráni zástupci všech kategorií, od křehkých, houževnatých a kombinovaně se chovajících materiálů, které byly i plněny skelným vláknem.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě hlavní části, teoretickou a praktickou. V první části je teoreticky popsáno dělení polymerních materiálů a jejich deformační chování při mechanickém namáhání. Dále jsou podrobně popsány dynamické rázové zkoušky a jejich členění. V teoretické rovině jsou pak vysvětleny pojmy statistických charakteristik, které se vyskytují v další části bakalářské práce.

V druhé části se píše o postupu výroby zkušebních těles, která musí mít požadované rozměry, aby na nich mohla být provedena pádová zkouška dle normy ISO 6603-2. Zkouška se provádí na padostroji německé firmy Zwick GmbH & Co. KG, který je propojen přes řídicí jednotku s počítačem, která je ovládána programem TestXpert II. Statisticky vyhodnocovanými parametry získanými touto zkouškou jsou maximální síla a celková spotřebovaná práce na proražení zkušebního tělesa, přičemž se měnila výška pádu tlouku se závažím.

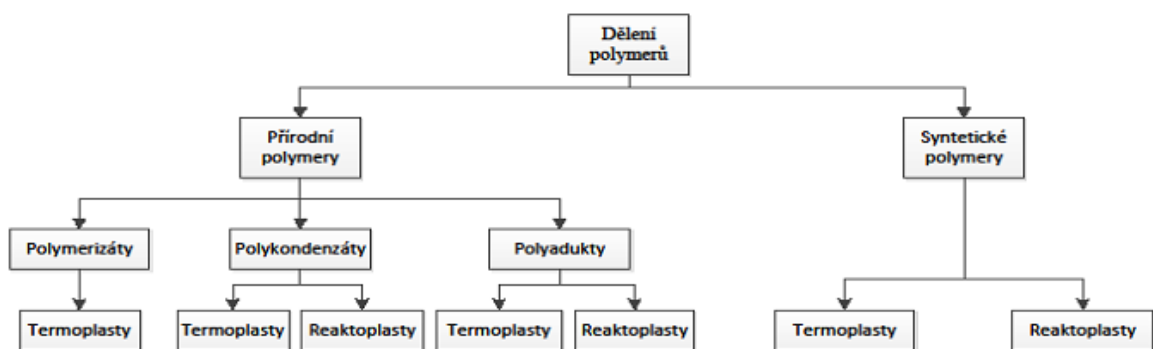
Pro technickou praxi je důležité znát deformační chování polymerních materiálů, proto je žádoucí provádět mechanické zkoušky, díky nimž se může objektivně posoudit vhodnost polymerního materiálu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DĚLENÍ POLYMERŮ

Polymery jsou chemické látky, které se vyznačují neobvyklou šíří vlastností. Velké molekuly obsahují zejména atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, dále se objevují často atomy dusíku, chloru atd. [1]

Rozdělení polymerů se může různit, nicméně za základní rozdělení polymerů se může považovat na přírodní a syntetické, viz obrázek (Obr. 1). Tyto dvě skupiny se dále člení u přírodních polymerů na polymerizáty, polykondenzáty a polyadukty; u syntetických polymerů na termoplasty a reaktoplasty. [2]



Obr. 1 Dělení polymerů [2]

Syntetické polymery jsou plasty za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými, odtud pochází označení plasty, a tvarovatelnými. Jestliže je změna z plastického do tuhého stavu vratná, tzn. opakovatelná, jedná se o termoplasty. Pokud jde o změnu nevratnou, tzn. neopakovatelnou, trvalou, mluví se o reaktoplastech. [1]

1.1 Dělení syntetických polymerů

Základní syntetické polymery se v přírodě nenachází. Jejich vznik je způsoben činností člověka prostřednictvím svých dovedností, znalostí a vědomostí. Výroba polymerů je uskutečňována chemickou syntézou. Odtud získaly syntetické polymery své pojmenování. [1]

1.1.1 Termoplasty

Termoplasty jsou polymery, které při zahřívání, účinkem tepelného působení měknou. Přecházejí z tuhého do plastického stavu a lze je tvářet. Jestliže se termoplast zahřeje nad teplotu tání, nachází se v oblasti taveniny. V této oblasti se dá materiál zpracovávat, např.

technologíí vstřikování a vytlačování. Ochlazením pod teplotu tání přechází do tuhého stavu. Při zahřívání neprobíhá chemická reakce a nemění se chemická struktura v průběhu zpracování. Materiál tak prochází změnami, které mají pouze fyzikální charakter. Tento proces, ve kterém dochází k měknutí a tuhnutí je vratný a lze jej opakovat, nicméně tento děj nelze opakovat do nekonečna, vlivem degradace materiálu při zpracování, kdy se materiál zpracovává při vysokých teplotách, kde probíhá termo-oxidace a následkem toho se zhoršují vlastnosti původně čistého polymeru. [1]

Termoplasty se dále dělí podle struktury na amorfnní a semikrystalické. Typickou amorfnní strukturu představují termoplasty, které mají makromolekulární řetězce prostorově nepravidelně uspořádané (zkroucené). Jsou typické svou tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností a modulem pružnosti. Amorfnní polymery jsou průhledné, podle propustnosti světla čiré, transparentní, průhledné, protože mají nízký index lomu, který se pohybuje v rozmezí od 1,4 do 1,6. [4]

Některé makromolekuly se u některých druhů polymerů mohou pravidelně a těsně uspořádat a vytvářet tak krystalické útvary. Tyto útvary jsou uloženy mezi neuspořádanými amorfnními oblastmi. Zde vzniká semikrystalická struktura. Semikrystalické polymery jsou mléčně zakalené a vyznačují se houževnatostí, pevností a rostoucím modulem pružnosti se zvyšujícím se stupněm krystality. [4]

1.1.2 Reaktoplasty

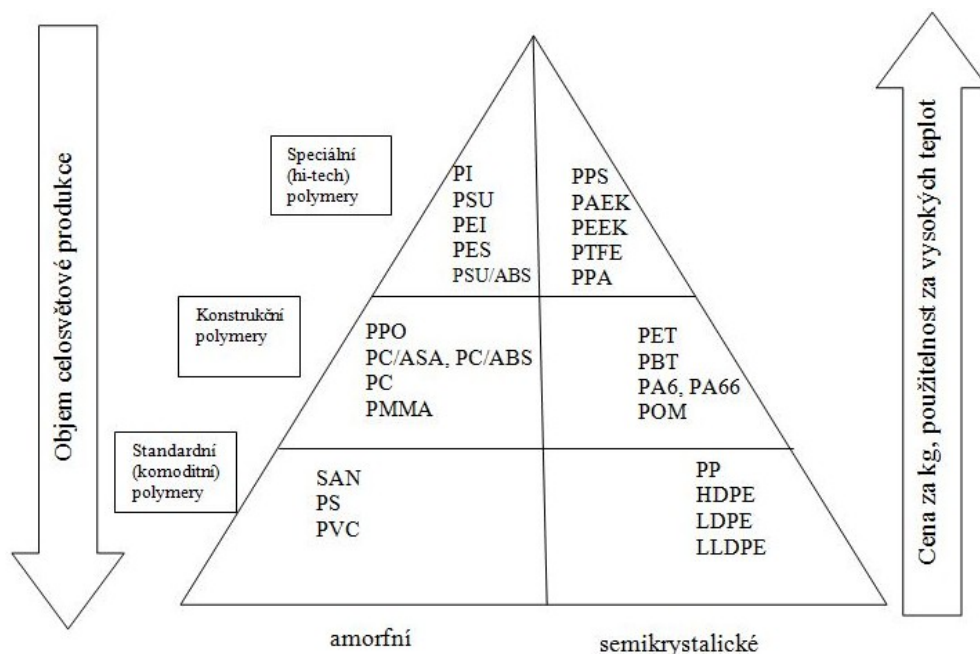
Polymery, které nevratnou chemickou reakcí přecházejí z lineárního do zesíťovaného stavu, označují se jako reaktoplasty. Zahřátím nebo přidáním vytvrzovacího činidla přecházejí do nerozpustného a netavitelného stavu a ztrácejí tak termoplastický charakter. Při ohřevu měknou a je možné je zpracovávat, avšak jen omezenou dobu. V průběhu zahřívání pak dochází k chemické reakci, která je označována jako vytvrzování. Vytvrzování neboli síťování znamená prostorové zesíťování struktury. Tento proces je nevratný, vytvrzený materiál nelze znovu zpracovávat či svařovat (dále už není tavitelný, při zvyšování teploty nad únosnou mez, materiál degraduje). [1]

Výrobek z reaktoplastu lze považovat za jednu velkou makromolekulu. Z důvodu obtížného zajištění rychlého ohřevu formy pro vytvrzení a následného rychlého ochlazení výrobku z reaktoplastu, se ochlazování provádí mimo nástroj. Jedná se o nevratný děj, kdy vytvrzené plasty nelze znova roztavit ani rozpustit. V nevytvrzeném stavu se produkty z reaktoplastů nazývají pryskyřice, kterými jsou například epoxidové nebo polyesterové pryskyři-

ce. Reaktoplasty jsou amorfnní polymery a výrobky z nich mají vysokou chemickou a tepelnou odolnost, přičemž jsou tvrdé a tuhé. [3]

1.2 Dělení polymerů podle použití

Podle použití a zastoupení na trhu jsou polymery celkem rozděleny do třech základních kategorií. Graficky se jejich dělení vyobrazuje do tvaru pyramidy (Obr. 2). Tento geometrický tvar správně zobrazuje objem produkce v závislosti na jejich ceně. Ve spodní části její základny se nachází první kategorie, ve které jsou standardní neboli komoditní polymery. Tyto polymery jsou nejrozšířenější a to odpovídá jejich nízké ceně. Další skupinou jsou konstrukční polymery a na vrcholu se vyskytují speciální neboli hi-tech polymery. Speciální polymery se řadí mezi nejdražší. Umožňují použitelnost za vyšších teplotních podmínek a využívají se pro specifické potřeby, proto objem celosvětové produkce není příliš vysoký. [6]



Obr. 2 Rozdělení polymerů podle aplikace a nadmolekulární struktury [9]

1.2.1 Standardní (komoditní) polymery

V současné době jsou tyto polymery na špici v množství produkce, objem výroby je v porovnání s ostatními skupinami polymerů největší. Tyto polymery jsou v běžném životě nepostradatelné a lidé jsou s nimi v kontaktu každý den. Jejich využití je široké, nevynikají příliš svými vlastnostmi, zato jsou levné. Hlavní výhodou těchto polymerů je dobrá zpra-

covatelnost, protože mají nízkou teplotu tání. Mezi další výhody se řadí nízká hmotnost, dobré tepelné a elektrické izolační vlastnosti. [6]

Komoditní polymery jsou využity na výrobu oděvů či v obalové technice. Nejpoužívanějšími polymery této skupiny jsou PS, PE, PP, PVC, SAN. [6]

1.2.2 Konstrukční polymery

Druhou skupinou, v materiálové pyramidě řazená uprostřed, jsou konstrukční polymery. Na rozdíl od komoditních jsou konstrukční polymery vybaveny lepšími vlastnostmi. Vyznačují se vyšší tuhostí, pevností, dobrou houževnatostí, rozměrovou stabilitou, jsou schopny odolávat větším zatížením po delší dobu a také jsou odolné při zvýšených teplotách. K dosažení požadovaných vlastností se mohou polymery plnit skelnými vlákny a dalšími plnivými. Tyto plněné polymery se využívají k náročnějším konstrukčním aplikacím. Náklady na pořízení jsou vyšší v porovnání s komoditními polymery a vyrábějí se v menším množství. [6]

Vlastnosti, kterými konstrukční polymery disponují, jsou vyhovující pro automobilový, letecký, telekomunikační i vojenský průmysl. Dále se používají v domácnostech a spotřební elektronice, protože vhodně doplňují či úplně nahrazují konvenční materiály, kterými jsou kovy, sklo, keramika atd. Důvodem nahrazení konvenčních materiálů jsou nižší náklady na výrobu a nízká hmotnost. Hlavní nevýhodou je však horší odolnost při vystavení dlouhodobému působení ultrafialového záření a vysokým teplotám. Konstrukčními polymery jsou PA, PET, PC, PMMA, POM, ABS atd. [6]

1.2.3 Speciální (hi-tech) polymery

Třetí skupinou, která je na vrcholu materiálové pyramidy, jsou speciální neboli hi-tech polymery. Název není odvozen od toho, že tyto polymery vynikají svými skvělými vlastnostmi, protože některé polymery mohou být v porovnání s konstrukčními i horší. Speciální polymery byly pojmenovány z důvodu schopnosti zachování svých užitečných mechanických vlastností i při poměrně velkých teplotách a to i po delší časový interval. Většina polymerů je schopna odolávat okolo 160 °C, ve zvláštních případech i nad 250 °C. [6]

Na trhu jsou cenově ne příliš dostupné a zastupují nejmenší část co do množství. Jejich použití je v leteckém a kosmickém průmyslu, protože jsou určeny k speciálním aplikacím. Do této skupiny polymerů se řadí PPS, PTFE, PES, PSU, PEK, PEI, PI atd. [6]

2 DEFORMACE POLYMERŮ

Během mechanické deformace dochází k přenosu působící síly na dílčí polymerní řetězce. Přenos vnější působící mechanické síly je dán vlastnostmi a uspořádáním makromolekulárních řetězců, a to především jejich pohyblivostí, vzájemným propletením, deformací a pevností. Tyto parametry ovlivňují parametr úměrnosti mezi napětím a deformací, tudíž modul pružnosti. [11]

Při nárazu nebo dlouhodobém působení mechanického napětí se v materiálu objeví ostrá trhлина, která vede k lomu celého tělesa. V místě koncentrace se u polymerních materiálů nejprve vytvoří poruchy, které vypadají jako trhliny. Ve skutečnosti nemají volný povrch, poněvadž jsou vyplněny orientovaným polymerním materiálem. Je to umožněné tím, že podstatou polymeru jsou makromolekulární řetězce, které zárodek trhliny přemostují. Tyto poruchy se nazývají pukliny. S rostoucím napětím se puklina může šířit napříč vzorkem polymerního materiálu ve všech směrech, kolmo na směr působícího napětí. Délka pukliny může dosahovat až řádu milimetrů, může se dokonce rozšířit do celého průřezu vzorkem. Propojuje orientovanými řetězci nedeformovanou matici. Puklina však není skutečná trhлина, která matici rozděluje. Je obvyklé, že v puklině vzniká trhлина roztržením napjatých orientovaných svazků makromolekulárních řetězců. Existuje několik modelů trhání puklin při vzniku trhliny. Například trhání uprostřed pukliny, na rozhraní s maticí, vznik pukliny blízkou před vrcholem šířící se trhliny. [11]

2.1 Lom materiálu

Uspořádání makromolekulárních řetězců v polymeru zpravidla vykazuje určitou nehomogenitu. V polymeru existují vždy fluktuace uspořádanosti nebo heterogenity, které způsobují nerovnoměrnou reakci na mechanické zatížení. Hlavní roli v tom hrají vazebné síly, které jsou mezi řetězci i v řetězci. V těchto místech, nazývaných slabá místa, začíná plastická deformace, trhání řetězců nebo lom materiálů. Zvýšené lokální napětí je zde překonáno pevností lokálních vazeb. Při překonání vazeb mezi řetězci dochází k vzájemnému posunutí, kluzu řetězců, pojednává se o plastické deformaci. Dalším překonáním vazeb v řetězcích, kdy dochází k roztržení řetězců, je lom materiálu. [11]

Křehký a houževnatý lom

K porušení materiálu, který je namáhán rázem, může dojít buď křehkým, nebo houževnatým lomem. Tomu předchází větší nebo menší plastická deformace. Před deformací je

houževnatý lom vždy spojen s tokem. Je charakterizován s molekulárním procesem skluzu s částečným rozbalením molekulárních klubek. Aby tyto děje byly uskutečněny, je nutná velká vynaložená rázová energie. [13]

Křehký lom není s tokem spojen, protože se značná část energie spotřebuje na roztržení hlavních a vedlejších vazeb. Začíná vždy v místech mikroskopických trhlinek, které jsou hodně nerovnoměrně rozptýleny. Proto se při měření energie lomu objevují velké rozptyly ve výsledcích. [13]

2.2 Chování vybraných polymerů při mechanickém namáhání

Z hlediska praktického použití polymerů je důležité tyto materiály zkoumat. Každý polymer má rozdílné vlastnosti, a proto se aplikují tam, kde je jejich vlastností nejlépe upotřebeno. Na vlastnosti má značný vliv chemická struktura a molekulová hmotnost. Dále pak fázová struktura, která je ovlivněna zpracováním. Vlastnosti polymerů jsou také ovlivněny druhem a množstvím přísad a cizích látek v nich obsažených. [13]

Polyetylen (PE)

Polyetylen je jeden z nejrozšířenějších polymerů v celosvětové produkci. Z hlediska fyzikálních vlastností se řadí mezi semikrystalické polymery. Vlastnosti tohoto polymeru jsou mimořádně citlivé na strukturu. Dle strukturální závislosti vlastností se polyetylen dělí na nízko-hustotní (LDPE), vysoko-hustotní (HDPE) atd. Nízko-hustotní polyetylen je měkčí, ohebnější, má lepší rázovou i vrubovou houževnatost i při nízkých teplotách. Oproti tomu vysoko-hustotní polyetylen má vyšší obsah krystalického podílu, horší zpracovatelnost, z mechanických vlastností dochází ke zlepšení pevnosti, tuhosti a tvrdosti, ale klesá tažnost a houževnatost, je nepatrně křehčí. Obecně, základní předností polyetylenu jsou nízká hustota ve srovnání s ostatními plasty a vysoká houževnatost provázená odolností proti úderu a vysokou tažností. [14]

Polypropylen (PP)

Klasickým představitelem semikrystalických komoditních polymerů je polypropylen. Dělí se podle struktury na izotaktický, syndiotaktický a ataktický PP. U prvního, izotaktického typu je pevnost vysoká, u syndiotaktického je střední a ataktického velmi nízká. PP je příbuzný s polyetylenem, který se řadí do skupiny polyolefinů. Homopolymer polypropylenu je při nízkých teplotách křehký. Vlastnostmi se podobá polyetylenu, liší se však v nižší hustotě, vyšší pevnosti v tahu a tlaku, vyšší tvrdosti a vyšší odolnosti proti oděru. PP je

méně náchylný ke korozi pod napětím ve srovnání s ostatními polyolefiny, kterými jsou například polyetylen (PE) či polybuten (PB). Výhodou je vyšší tvrdost a pevnost v ohybu, má však nižší rázovou houževnatost na rozdíl od vysoko-hustotního polyetyleny. [2]

Polystyren (PS)

Polystyren je komoditní semikrystalický polymer, který je za běžných podmínek dostatečně odolný proti tepelné degradaci i oxidaci. Nedoporučuje se používat jej pro venkovní použití, protože fotooxidací žloutne a křehne. Velmi málo absorbuje vodu. Využití polystyrenu na mechanicky namáhané výrobky, které přicházejí do styku s povrchově aktivními látkami, se nedoporučuje, protože má tendenci ke vzniku trhlin, tzv. koroze za napětí. Tento polymer je tvrdý, avšak dost křehký. [15]

Kopolymer styren-akrylonitril (SAN)

Tento amorfní kopolymer patří do skupiny komoditních polymerů. Kopolymer SAN je typ plastu, který se řadí do skupiny polystyrenových plastů. Ve srovnání se standardním polystyrenem má kopolymer styrenu s 22 až 27 hmotnostními procenty akrylonitrilu o 30 až 40 % vyšší tvrdost, rázovou houževnatost, pevnost v ohybu a tahu, a rovněž má vyšší tvarovou stálost za tepla. [15]

Největší využití tohoto polymeru je v technické oblasti. SAN se uplatňuje tam, kde se požaduje dobrá transparentnost ve spojení s odolností proti nepolárním rozpouštědlům, kterými jsou oleje, benzín či aromatické uhlovodíky. Dalšími kladnými vlastnostmi jsou vyšší tvrdost, houževnatost, odolnost proti poškrábání a nižší sklon ke vzniku trhlin pod napětím. Při namáhání ohybem praská. [15]

Akrylonitril-butadien-styren (ABS)

Tento amorfní polymer se řadí mezi nejlevnější konstrukční polymery. Při zachování dostatečné tuhosti se vyznačuje lepší chemickou odolností a houževnatostí, oproti polystyrenu. Mnoho typů ABS, které jsou na trhu, jsou charakteristické houževnatostí, dobrými mechanickými vlastnostmi, snadnou zpracovatelností, odolností proti řadě chemikálií. Povrch ABS je tvrdý a lesklý, uživatelsky příjemný, který nevyžaduje žádné dodatečné úpravy. Přidáním 20 až 40 % skelných vláken se může zvýšit mechanická pevnost a zejména tuhost ABS významně. [15]

3 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY RÁZOVÉ

V současné době dochází ke stálému zvyšování výkonů strojů, snižování jejich hmotností a neustálé zautomatizování procesů. Je proto kladen velký důraz na materiál, se kterým je spjata jeho zkoušení. Prostřednictvím zkoušek lze zjistit jejich vlastnosti, chování při určitém druhu zatěžování. V praxi lze použít vhodný materiál na výrobu patřičného výrobku. Zkoušky slouží jak výrobcům, kteří kontrolují jakost výrobků, tak odběratelům. Informují je o chování polymerů. Výsledky však nelze přenášet všeobecně na různé tvary výrobků. [13]

Pro zjištění schopnosti polymeru odolávat působení napětí ve velmi krátkém časovém intervalu, hlavně v ohybu rázem, se využívají rázové dynamické zkoušky. Porušení materiálu vlivem nárazu souvisí s jeho deformačními vlastnostmi a schopností pohlcovat rychle energii. Materiál, který je namáhán se zvyšující se rychlostí, se jeví jako křehký, dochází ke zlomení při malém průhybu. Je to způsobeno tím, že neproběhnou určité rovnovážné pochody v materiálu, který je namáhán v tak krátkém čase. Dochází ke zkřehnutí a lomům, které by se při statickém zatěžování projevil jako tažné, se mění na křehké. [13]

Namáhání rázem

Namáhání s rychlostí od 1 do 10 m / s, je považováno za namáhání rázové. Při rázovém namáhání dochází k porušení vzorku křehkým, houževnatým nebo kombinovaným lomem. Rázová houževnatost je závislá na druhu plastu, jeho složení i teplotě. Amorfni polymery jsou při běžné teplotě křehké a při zkoušce jednoduše prasknou, protože jejich teplota skelného přechodu je vyšší než normální teplota. Naproti tomu semikrystalické polymery mají teplotu skelného přechodu nižší než 20 °C. Vykazují často velkou houževnatost, následkem toho dochází k pohlcení rázové energie materiálem bez prasknutí, pouze dochází k deformaci. Se zvyšujícím stupněm krystality polymeru klesá jejich houževnatost. [13]

Existuje několik druhů rázových zkoušek. Každá z nich se uskutečňuje na základě české technické normy, která je zajišťována Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

3.1 Rázová a vrubová houževnatost metodou Charpy

Zkušební normou pro metodu Charpy je ČSN EN ISO 179. V normě jsou vypsány základní pojmy a definice, postup zkoušení, měřicí zařízení a další potřebné informace. Podstatou zkoušky je stanovení rázové práce potřebné k porušení zkušebního tělesa, na které dopadne

nos nárazového kladiva. Zkušební těleso má tvar hranolu s vrubem nebo bez vrubu, který je opřen o dvě podpěry a přeráží se uprostřed své délky klínovou částí kladiva. Kinetická energie kyvadlového rázového kladiva, která je potřebná k přeražení zkušebního tělesa, je vztažená na původní plochu příčného průřezu. Podle toho, zda je zkušební těleso opatřeno vrubem či nikoliv, výsledek zkoušky se označuje jako vrubová houževnatost nebo rázová houževnatost. [18]

Rázová energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa bez vrubu, vztažená na původní průřez zkušebního tělesa. Rázová houževnatost Charpy se vyjadřuje v kilojoulech na metr čtverečný. Výpočtový vzorec je podle vzorce:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \times 10^3 \text{ (kJm}^{-2}\text{)} \quad (1)$$

kde E_c je korigovaná energie v joulech spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa, h je tloušťka zkušebního tělesa v milimetrech a b je šířka zkušebního tělesa v milimetrech. [19]

Rázová houževnatost Charpy u zkušebních těles, která jsou opatřena vrubem, se nazývá vrubová houževnatost Charpy. Je to hodnota získaná na zkušebních tělesech zeslabených vrubem různých tvarů vztažená na průřez po odečtení hloubky vrubu. Výpočet je analogický:

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \times 10^3 \text{ (kJm}^{-2}\text{)} \quad (2)$$

kde b_N je šířka zkušebního tělesa pod vrubem v milimetrech. [19]

Zkušební těleso je opatřeno vrubem, aby lom proběhl uprostřed a kolmo na podélnou osu vzorku. Vzorky se při samotné zkoušce položí na podpěry tak, aby vrub ležel na opačné straně, než ze které dochází k nárazu kladivem, rázové deformaci. [20]

3.2 Metoda Dynstat

Rázová houževnatost lze měřit metodou Dynstat. Princip metody je stejný jako u Charpyho metody. Odlišuje se v uspořádání přístroje a velikosti vzorku, které jsou menší. Používá se převážně pro zkoušení malých zkušebních vzorků, které mohou být připraveny jak z destiček, tak přímo vyříznuty z hotových výrobků. Zkušební vzorek je na jedné straně upevněn ve spodní čelisti a je přeražen kyvadlovým kladivem. [13]

3.3 Metoda Izod

Řídí se normou ČSN EN ISO 180. Metoda Izod je rozdílná od metody Charpy v uložení přeráženého zkušební vzorku. V metodě Izod se zkušební vzorek, který je na jedné straně upnut v čelisti a na druhé se přeráží. Zkušební vzorek je opatřen vrubem ve tvaru V s úhlem 45 °. Kladivo naráží na zkušební vzorek na stejné straně, kde je vrub. Uskutečňuje se ještě jedno měření, aby se odstranila energie potřebná k odmrštění přerážené části vzorku. Toto měření je uskutečňováno tak, že se přerážená část položí na upevněnou část a provede se úder z takové výšky, aby bylo těleso odmrštěno přibližně stejnou rychlostí jako při rázové zkoušce. Poté se zjistí energie volným kyvem z této výšky. Vrubová houževnatost se vypočte:

$$a_k = \frac{A_k - (A_u - A_o)}{S_k} \times 10^3 \text{ (kJm}^{-2}\text{)} \quad (3)$$

kde A_k je práce odečtená na přístroji po přerážení vzorku, A_u je práce odečtená z volného kyvu, A_o je práce potřebná k odhození přerážené části a S_k je plocha průřezu zeslabeného vrubem. [13]

3.4 Rázová zkouška pádem

Tuto zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 6603 – 1 a ČSN EN ISO 6603 – 2. Konkrétní název je Plasty – Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání. Norma je dělena do 2 částí, z níž první se nazývá Neinstrumentovaná rázová zkouška a druhá Instrumentovaná rázová zkouška.

Přístroj, který uskutečňuje rázovou zkoušku pádem, se nazývá padostroj. Je založený na tom, že na zkušební těleso působí volně padající těleso s různě volenou kinetickou energií. Velikost této energie je závislá na hmotě tělesa a rychlost pak na výšce pádu. Padajícím tělesem je ocelová kulička nebo tlouk. Tlouk má polokulovou leštěnou nárazovou plochu. Velikost a rozměry tlouku a také stav jeho povrchu ovlivňují výsledky zkoušky. Tlouk je zkonstruován z materiálu, který je dostatečně odolný proti otěru a má dostatečnou pevnost k zabránění vzniku plastické deformace. Vhodným materiálem je kalená ocel nebo materiály o nižší hustotě například titan. Systém padajícího tlouku se skládá z tlouku a závaží. Padostroj se používá pro zkoušení hotových výrobků, kterými jsou například desky nebo ochranné přilby. Výpočet spotřebované práce je dle vzorce:

$$W = G \times h \quad (3)$$

kde G je tíha závaží v gramech a h je výška pádu v milimetrech. [17] [18] [22]

Spotřebovaná energie na přeražení zkušebního tělesa se skládá z několika příspěvků. Vytvoří se nové lomové plochy, dále se může značná část energie tlouku spotřebovat na viskoelastickou nebo plastickou deformaci v určitém objemu materiálu, který obklopuje lomovou plochu, případně na ohybovou deformaci celého zkušebního tělesa. Další část energie se změní na kinetickou energii odletujících úlomků, akustickou emisi nebo se pohltí ve zkušebním zařízení. Pro stanovení podílu těchto příspěvků a získání informací o strukturálním mechanismu porušování, je nutné registrovat celý průběh rychlé rázové zkoušky, tudíž pracovat s instrumentovaným rázovým kladivem. Lze pak rozhodnout, zda byl růst trhliny stabilní, částečně stabilní nebo nestabilní. [18]

3.4.1 Firmy vyrábějící padostroje

Existuje mnoho firem na českém, evropském i celosvětovém trhu, jejímž předmětem podnikání je výroba zkušebních strojů, zařízení a zkušebních automatů. Tyto přístroje slouží převážně pro vědu, výzkum a kontrolu jakosti ve výzkumných ústavech, vysokých školách ale také širokém spektru průmyslových podniků. Padostroje se používají při kontrole kvality výroby, vstupních a výstupních kontrolách materiálů a výrobků ve zkušebnách a laboratořích. Využívá se pro zkoušení a simulování chování materiálů a součástí při srážkách, náhodných pádech a opakovaných nárazech. [23]

Mezi nejznámější firmy vyrábějící padostroje patří:

- Zwick GmbH & Co. KG (pobočka v České republice: Zwick Roell CZ s.r.o.)
- Instron
- Coesfeld GmbH & Co. KG

Firma Zwick GmbH & Co. KG je jedna z nejznámějších firem na trhu se zařízením pro zkoušení materiálů a komponent. Pro Českou republiku je zprostředkovatel firma Zwick Roell CZ s.r.o. Padostroje této firmy jsou určeny pro zkoušky padajícím závažím u plastů a kovů. Mohou se testovat i pro předem upravené vláknité kompozity. Dle požadavků lze padostroje nastavit na různé nárazové energie a rychlosti dopadu. [24]



*Obr. 3 Padostroj HIT230F
pro zkoušení plastů [24]*

Padostroj HIT230F (Obr. 3) se používá pro zkoušení plastů. Je optimálně uzpůsoben pro provádění víceosých rázových zkoušek. Používá se pro stanovení charakteristik materiálu u standardních zkušebních vzorků podle běžných norem v oblasti výzkumu, vývoje a zajištění kvality. [24]



*Obr. 4 Padostroj HIT230F
pro zkoušení upravených
vláknitých kompozitů [24]*

Druhým typem padostroje, viz obrázek (Obr. 4), je HIT230F, který je určen pro testování předem upravených vláknitých kompozitů pro zkoušky CAI. Instrumentovaný padostroj HIT230F je optimálně uzpůsoben pro testování předem upravených zkušebních těles

z vláknitých kompozitů pro standardní zkoušky CAI (Compression After Impact) v leteckém průmyslu. [24]

Americká firma Instron je uznávaným lídrem na světovém trhu ve výrobě přístrojů pro měření mechanických vlastností materiálů, v oblasti zkušebních strojů. Zástupcem této firmy v obchodní a servisních službách je v České republice firma Igitur. Firma Instron vyrábí padostroje značením CEAST trojího typu. Na obrázku (Obr. 5) je zobrazen typ CEAST 9340. Tento padostroj je navržen tak, aby dodával práci a energii od 0,3 J do 405 J. Standardní model zahrnuje základní přístrojové vybavení a má namontováno ovládací zařízení, které umožňuje operátorovi spustit potřebnou zkoušku a získat tak potřebná data. [25]



Obr. 5 Padostroj CEAST 9340 [25]

Německá firma Coesfeld GmbH & Co. KG sídlí v Dortmundu a pracuje v oboru materiálových zkoušek a výrobě průmyslových zkušebních strojů, což je jejich hlavním zaměřením. Výhradním zástupcem této firmy je v České republice firma PRL Polymer Research Lab, s.r.o. Zajišťují prodej a servis kompletního sortimentu. [26]



*Obr. 6 Padostroj
Primus [26]*

Padostroj typu Primus (Obr. 6) má maximální energii 333 J. Výška pádu indentoru lze nastavit na 1 m a 1,7 m pro manuální, automatické i jako instrumentované měření průrazu materiálu. [26]



*Obr. 7 Padostroj
Magnus [26]*

Dalším typem je Magnus (Obr. 7), který dosahuje energie do 1380 J. Tento padostroj je automatizovaný a plně instrumentovaný, je robustní v ocelovém rámu s možnou výškou pádu indentoru 1 a 2 m. Má volitelnou teplotní komoru. [26]

4 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

Pro zkoumání hromadných jevů je předpokladem vymezit množiny objektů, prvků zkoumání neboli statistický soubor. Jednotlivé objekty, prvky statistického souboru se označují jako statistické jednotky, které jsou nositeli vlastností daného souboru. Rozsah souboru je počet jednotek statistického souboru. [27]

Základní soubor je označován za soubor, který je předmětem zkoumání. V praxi se nepracuje s celým rozsahem statistického souboru, ale pouze s výběrovým souborem, protože zkoumání celého statistického souboru by bylo nákladné, časově zdlouhavé a z jiných důvodů neuskutečnitelné. [27]

Počítají se různé číselné charakteristiky, které zachycují různé aspekty dat. Jedná se o charakteristiky centrální tendence a míry variability, dále pak to jsou charakteristiky jako je šikmost nebo špičatost rozptýlení dat. [28]

4.1 Míry centrální tendence

Míry centrální tendence neboli míry polohy definují střední hodnotu určitého souboru údajů. Běžně používanými jsou tři míry centrální tendence, kterými jsou aritmetický průměr, medián a modus. [27]

4.1.1 Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je nejznámějším a nejpoužívanějším typem průměru. Je použitelný všude tam, kde má nějaký informační smysl součet hodnot. Prostý aritmetický průměr se vypočítá:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

kde \bar{x} je odhad aritmetického průměru, n je počet prvků výběrového souboru, x_i je i -tá naměřená hodnota, i je index. [27]

4.1.2 Medián

Medián je padesátiprocentním kvantilem, který charakterizuje hodnotu souboru co do velikosti prostřední. Jestliže jsou všechny hodnoty z náhodného výběru uspořádány do neklesající posloupnosti, pak výběrový medián je hodnota, která leží uprostřed této posloupnosti. Medián je jednoznačně určen při lichém počtu hodnot, jestliže má posloupnost sudý

počet členů, medián je pak aritmetickým průměrem prostředních dvou členů posloupnosti. [29]

Platí:

$$\tilde{x} = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}, \quad \text{je-li } n \text{ liché číslo} \quad (5)$$

$$\tilde{x} = \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2}, \quad \text{je-li } n \text{ sudé číslo} \quad (6)$$

kde \tilde{x} je medián, $x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}$, $x_{\left(\frac{n}{2}\right)}$, $x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}$ jsou pořádkové statistiky. [29]

4.1.3 Modus

Modus je hodnota statistického znaku, která má v náhodném výběru největší třídni četnost. Takových hodnot může být několik. Jestliže je v souboru jen jeden modus, mluví se o typické hodnotě statistického znaku v daném náhodném výběru. Modus se značí \hat{x} . [29]

4.2 Míry variability

Míry variability popisují kolísání v rozdělení hodnot. Zkoumá se, jak se jednotlivé hodnoty liší od sebe navzájem. Odlišnost jednotlivých hodnot se nazývá variabilita nebo také měnlivost. O nulové variabilitě mluvíme tehdy, jestliže soubor obsahuje všechny hodnoty stejné, tzn. $x_i = \text{konstanta}$. Kolísání hodnot v souboru lze posuzovat jako rozdílnost jednotlivých hodnot od aritmetického průměru nebo jako vzájemnou rozdílnost jednotlivých hodnot. [27]

Míry variability se využívají k hodnocení stejnorodosti souboru a k posuzování kvality informace, kterou o úrovni hodnot v souboru poskytla některá ze středních hodnot. Hlavní úvahou je, že čím je soubor stejnorodější, s menší variabilitou, tím je například aritmetický průměr výstižnější z hlediska hodnocení úrovně hodnot souboru. Mezi nejčastěji používané charakteristiky variability patří variační rozpětí, rozptyl, směrodatná odchylka a variační koeficient. [27]

4.2.1 Variační rozpětí

Variační rozpětí je definováno jako rozdíl největší a nejmenší hodnoty výběrového souboru. Při použití variačního rozpětí je nutné si uvědomit, že hodnoty minima a maxima mohou mít charakter nahodilých extrémů a vedou k mylné představě o míře variability ve zkoumaném souboru.

Vypočítá se jako:

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (7)$$

kde R je variační rozpětí, x_{\max} je největší hodnota výběrového souboru a x_{\min} je nejmenší hodnota výběrového souboru. [27]

4.2.2 Rozptyl a směrodatná odchylka

Rozptyl neboli disperze je neznámější a nejužívanější mírou variability. Defínuje se jako součet čtverců odchylek všech hodnot náhodného výběru od aritmetického průměru, dělený rozsahem výběru:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (8)$$

kde S^2 je odhad rozptylu, n je počet prvků výběrového souboru, x_i je i -tá naměřená hodnota, \bar{x} je odhad aritmetického průměru, i je index. [27]

S rozptylem bezprostředně souvisí další charakteristika variability, a to směrodatná odchylka. Její výhodou je, že charakterizuje variabilitu náhodné veličiny ve stejných jednotkách, v jakých jsou zadány její hodnoty. Vypočítá se jako druhá odmocnina rozptylu:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (9)$$

kde s je odhad směrodatné odchylky, s^2 je odhad rozptylu. [27]

4.2.3 Variační koeficient

Variační koeficient je nejvhodnější charakteristikou variability tehdy, kdy se srovnává variabilita více souborů, které mají rozdílné měrné jednotky a úrovně hodnot v souborech. Defínuje se jako podíl odhadu směrodatné odchylky a odhadu aritmetického průměru. Patří mezi relativní míry variability. Je to bezrozměrná veličina, případně se prezentuje v procentech. Pak udává, z kolika procent se v průměru odchylují jednotlivé hodnoty od aritmetického průměru. Vypočítá se:

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \quad (10)$$

kde V je odhad variačního koeficientu, s je odhad směrodatné odchylky, \bar{x} je odhad aritmetického průměru. [27]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je zjistit, jaký vliv má změna parametru pádové zkoušky (bez mazání tlouku) na deformaci zkušebních těles z termoplastů. Konkrétně, jaký vliv má změna výšky, resp. nastavená energie pádu, na měřené veličiny pádové zkoušky, zejména na maximální dopadovou sílu a celkovou spotřebovanou práci, u šesti vybraných materiálů.

Materiály, které budou v této práci zpracovávány a následně zkoušeny a vyhodnocovány budou tři představitelé amorfních (PS, SAN, ABS) a tři představitelé semikrystalických látek (PP, PP 30 % GF, HDPE).

Výroba zkušebních těles, která jsou ve tvaru desky dle normy ČSN EN ISO 6603 - 2, je zajištěna vstřikovacím strojem ARBURG ALLROUNDER 470 H 1000 – 400.

Na zkušebních tělesech byla následně provedena pádová zkouška, která byla uskutečňována na měřicím zařízení HIT 230F německé firmy Zwick GmbH & Co. KG. Zkoušky byly zaznamenávány a vyhodnocovány v softwaru TestXpert II. Pro statistické vyhodnocení naměřených dat byl následně využit program Minitab a Microsoft Office Excel.

Zjišťovalo se, zda záleží na výšce pádu (nastavené energii pádu), ze které tlouk dopadá na daný materiál a ze statistického vyhodnocení určit optimální výšku pádu.

6 POPIS VÝROBY ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Výroba zkušebních těles je nedílnou součástí zkoušení polymerních materiálů dynamickou rázovou zkouškou pádem. Vyrobeny mohou být různými zpracovatelskými technologiemi, které jsou vhodné pro plasty, např. lisování, vytlačování, vstřikování atd. Důležité je vybrat vhodnou technologii na základě koncové aplikace výrobku, každá z výrobních technologií má svá specifika, jak už ze zpracovatelského hlediska, tak z pohledu fyzikálních vlastností a v neposlední řadě vše musí být ekonomicky výhodné.

6.1 Výroba zkušebních těles technologií vstřikování

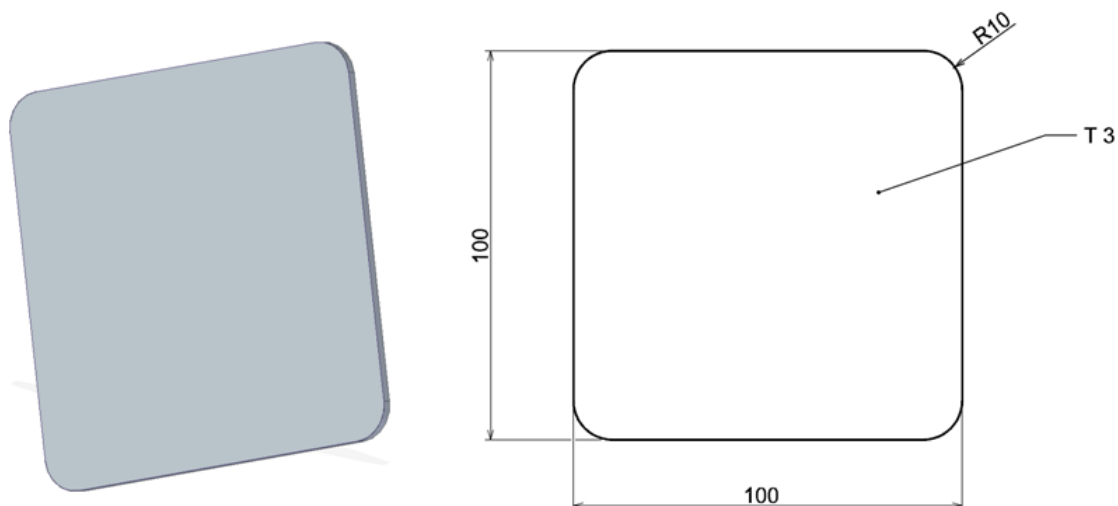
Zkušební tělesa jsou vyráběná technologií vstřikování, která umožňuje vyrábět zkušební tělesa bez nutnosti další úpravy. Vstřikování je cyklický proces hojně využívaný při zpracovávání téměř všech druhů termoplastů. Z hlediska vysoké přesnosti rozměrů zkušebních těles, která obsahují minimum vnitřních defektů, byla pro výrobu těles použita tato technologie. [30]

Vstřikovací stroj, na kterém byla zhotovena zkušební tělesa je od německé společnosti ARBURG GmbH + Co KG, která má pobočku i v České republice. Přesné označení použitého vstřikovacího stroje je ARBURG ALLROUNDER 470 H 1000 – 400 (Obr. 8).



Obr. 8 Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470 H 1000 – 400 [31]

Zkušební tělesa byla vyrobena v jednonásobné formě, která byla namontována na patřičnou pozici vstřikovacího stroje. Dutina formy je ve tvaru zkušebních těles, přičemž rozměry dutiny formy jsou s přesností $\pm 0,02$ mm. Zkušební těleso je ve tvaru desky o velikosti 100×100 a tloušťce 3 mm s rozměrovou tolerancí $\pm 0,02$ mm (Obr. 9).



Obr. 9 Rozměry a tvar zkušebního tělesa

6.1.1 Technické parametry vstřikovacího stroje

Tab. 1 Technická data vstřikovacího stroje ARBURG ALLROUNDER 470 H [32]

	Hodnota	Jednotka
Uzavírací jednotka		
Uzavírací síla	1000	max. kN
Otevření	350	max. mm
Výška formy	250 - 500	min. mm
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	470 × 470	mm
Velikost upínací desky (šířka × výška)	637 × 637	mm
Vyhazovací síla	40	max. kN
Zdvih vyhazovače	175	max. mm
Hydraulika, pohon		
Výkon čerpadla	7,5	kW
Celkový příkon stroje	33	kW
Vstřikovací jednotka		
Průměr šneku	40	mm
Poměr šneku	20	L/D
Zdvih šneku	160	max. mm
Objem dávky	201	max. cm ³
Vstřikovací tlak	2000	max. bar
Vstřikovací rychlost (objemová)	502	max. cm ³ ·s ⁻¹
Rozměry a hmotnost stroje		
Množství oleje	160	l
Hmotnost stroje, bez oleje	5100	kg

6.2 Výběr polymerních materiálů

Pro účel měření deformace zkušebních těles pádovou zkouškou bylo zvoleno 6 polymerních materiálů, které patří do skupiny termoplastů. Vybrány byly materiály: polystyren (PS), akrylonitril-butadien-styren (ABS), kopolymer styren-akrylonitril (SAN), polypropylen (PP), polypropylen plněný 30 % skelných vláken (PP 30 % GF), vysoko-hustotní polyetylen (HDPE). Obchodní názvy vybraných materiálů jsou v tabulce (Tab. 2).

Tab. 2 Zvolené polymerní materiály

Číslo materiálu	Zkratka	Název materiálu
1.	PS	PS - EDISTIR SR 550 07
2.	ABS	ABS - STAREX HF 06601W
3.	SAN	SAN - STAREX HF 5661
4.	PP	PP - TATREN IM 2575
5.	PP 30% GF	PP 30 % GF - 99 53 G10 – O
6.	HDPE	HDPE - DOW 25 055E

V materiálových listech jsou uvedeny veškeré technické údaje daného polymerního materiálu. V materiálových listech jsou technické údaje řazeny do několika skupin, zejména podle vlastností, např. fyzikálních, mechanických, reologických, teplotních a elektrických. Všechny technické údaje jsou měřeny na základě určitých zkoušek, které se řídí mezinárodní normou ISO.

V tabulce 3 – tabulce 8 (Tab. 3 – Tab. 8) jsou zobrazeny vybrané všeobecné, reologické, mechanické a teplotní vlastnosti zvolených materiálů, včetně označení mezinárodních norem, podle kterých tyto údaje byly měřeny.

Reologickou vlastností polymerního materiálu ABS – STAREX HF 06601W je index toku taveniny, viz tabulka (Tab. 4). Index toku taveniny se řídí mezinárodní normou ISO 1133 a jedná se zde o hmotnostní index toku taveniny. Tento parametr byl zkoušen při teplotě 200 °C a při zatížení váhou 5 kg, výsledná hodnota činí 3,5 g / 10 min.

Tab. 3 Vybrané vlastnosti PS – EDISTIR SR 550 07 [33]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka	Zkušební norma
Obecná vlastnost			
Hustota	1,04	g/cm ³	ISO 1183
Reologická vlastnost			
Index toku taveniny (200 °C / 5 kg)	11	g/10 min.	ISO 1133
Mechanické vlastnosti			
Napětí v tahu na mezi kluzu (50 mm / min.)	18	MPa	ISO 527
Napětí v tahu při přetržení (50 mm / min.)	17	MPa	ISO 527
Napětí v tahu při prodloužení (50 mm / min.)	55	%	ISO 527
IZOD rázová zkouška (při 23 °C, tloušťce 4 mm)	9	kJ/m ²	ISO 180/4A
Teplotní vlastnost			
Teplota měknutí dle Vicata (při 10N, 50 °C / hod.)	90	°C	ISO 306/A

Tab. 4 Vybrané vlastnosti ABS – STAREX HF 06601W [34]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka	Zkušební norma
Obecná vlastnost			
Hustota	1,04	g/cm ³	ISO 1183
Reologická vlastnost			
Index toku taveniny (200 °C / 5 kg)	3,5	g/10 min.	ISO 1133
Mechanické vlastnosti			
Mez pevnosti v tahu (5 mm / min.)	39,2	MPa	ISO 527
IZOD rázová zkouška (tloušťka 6,35 mm)	196	J/m	ISO 180/4A
Teplotní vlastnost			
Teplota měknutí dle Vicata (při 50 N, 50 °C / hod.)	95	°C	ISO 306/B

Tab. 5 Vybrané vlastnosti SAN - STAREX HF 5661 [35]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka	Zkušební norma
Obecná vlastnost			
Hustota	1,07	g/cm ³	ISO 1183
Reologická vlastnost			
Index toku taveniny (200 °C / 5 kg)	2,4	g/10 min.	ISO 1133
Mechanické vlastnosti			
Mez pevnosti v tahu (5 mm / min.)	69	MPa	ISO 527
Napětí v tahu při prodloužení (5 mm / min.)	4,2	%	ISO 527
Teplotní vlastnost			
Teplota měknutí dle Vicata	105	°C	ISO 306/A

Tab. 6 Vybrané vlastnosti PP - TATREN IM 2575 [36]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka	Zkušební norma
Reologická vlastnost			
Index toku taveniny (230 °C / 2,16 kg)	25	g/10 min.	ISO 1133
Mechanické vlastnosti			
Napětí v tahu na mezi kluzu	21	MPa	ISO 527
Napětí v tahu při prodloužení	5,5	%	ISO 527
IZOD rázová zkouška (při 23 °C)	40	kJ/m ²	ISO 180/1A
IZOD rázová zkouška (při - 20 °C)	6	kJ/m ²	ISO 180/1A

V tabulce (Tab. 6) jsou vypsány vybrané vlastnosti polymerního materiálu s obchodním názvem PP - TATREN IM 2575. V tabulce není uvedena hustota tohoto polymerního materiálu a z mechanických vlastností teplota měknutí dle Vicata. V materiálovém listu tyto údaje nejsou uvedeny.

Tab. 7 Vybrané vlastnosti PP 30% GF - 99 53 G10 – O [37]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka	Zkušební norma
Obecná vlastnost			
Hustota	1,12	g/cm ³	ISO 1183
Reologická vlastnost			
Index toku taveniny (230 °C / 2,16 kg)	15	g/10 min.	ISO 1133
Mechanické vlastnosti			
Napětí v tahu na mezi kluzu	90	MPa	ISO 527-2/50
Charpy vrubová rázová houževnatost (23 °C)	8	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy rázová houževnatost, bez vrubu (23 °C)	40	kJ/m ²	ISO 179/1eU

Tab. 8 Vybrané vlastnosti HDPE - DOW 25 055 E [38]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka	Zkušební norma
Obecná vlastnost			
Hustota	0,955	g/cm ³	ISO 1183
Reologická vlastnost			
Index toku taveniny (190 °C / 5 kg)	62	g/10 min.	ISO 1133
Mechanické vlastnosti			
Napětí na mezi kluzu (5 mm / min.)	25	MPa	ISO 527
Napětí v tahu při přetržení	27	MPa	ISO 527
Napětí v tahu při prodloužení (5 mm / min.)	200	%	ISO 527
Teplotní vlastnost			
Teplota měknutí dle Vicata	124	°C	ISO 306/A

U polymerního materiálu s obchodním názvem HDPE - DOW 25 055 E činí index toku taveniny 62 g / 10 min. viz tabulka (Tab. 8). Tento parametr byl zkoušen při teplotě 190 °C a při zatížení váhou 5 kg. Do skupiny mechanické vlastnosti se řadí napětí na mezi kluzu v tahu, která je řízena mezinárodní normou ISO 527. Tahová zkouška byla prováděna při rychlosti posuvu příčnicku 5 mm / min.

7 ZAŘÍZENÍ A POSTUP PROVEDENÍ PÁDOVÉ ZKOUŠKY

Pádová zkouška byla provedena u šesti vybraných polymerních materiálů, kterými jsou PS, PP, PP 30 % GF, HDPE, SAN a ABS. Všechny použité materiály se řadí do skupiny standardních (komoditních) polymerů, kromě ABS, který spadá do skupiny konstrukčních polymerů.

Zkoušení je prováděno na základě České technické normy, která je převzata z Evropské normy. Norma je sestavená ze dvou částí – neinstrumentovaná a instrumentovaná rázová zkouška pádem. Přesné označení obou částí norem je ČSN EN ISO 6603 - 1 a ČSN EN ISO 6603 - 2. Zkouška, která se prováděla na šesti polymerních materiálech, se řídí normou ČSN EN ISO 6603 - 2 s názvem Plasty – Stanovení chování tuhých plastů při víceo-
sém rázovém namáhání – Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška.

7.1 Použité přístroje a zařízení

Mechanické vlastnosti zkoušených materiálů byly měřeny a vyhodnocovány:

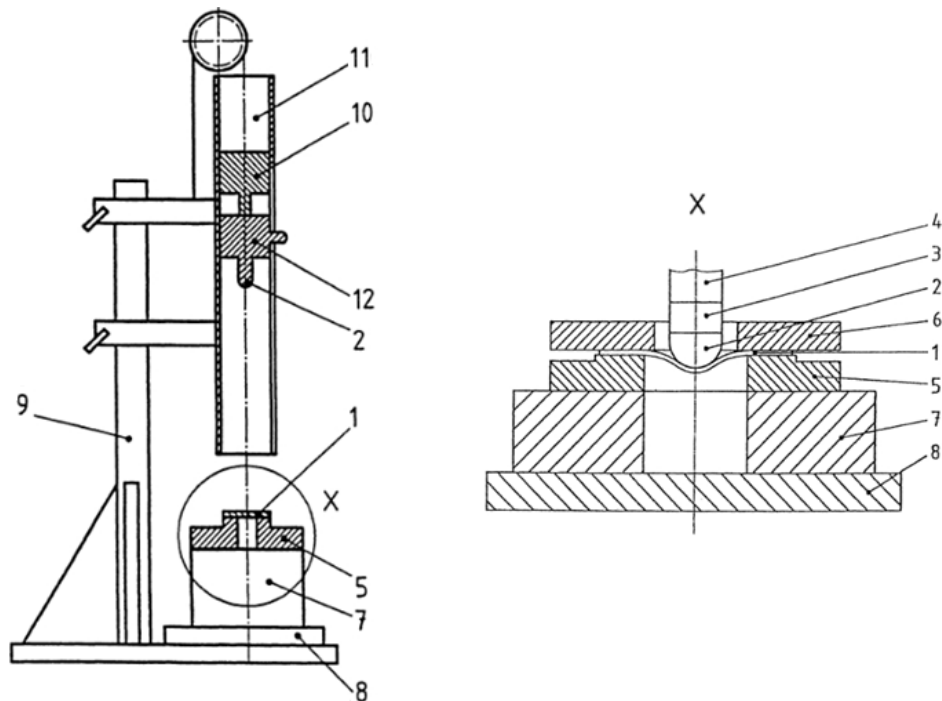
- zkušebním přístrojem: Padostroj ZWICK HIT230F připojený k počítači (Obr. 10);
- softwarem: TestXpert II, Minitab 16, Microsoft Office Excel;
- posuvným digitálním měřidlem Mitutoyo.



*Obr. 10 Padostroj ZWICK
HIT230F*

Zkušební přístroj se skládá z následujících částí:

- nosič energie, který může být typu setrvačné hmotnosti nebo hydraulického typu;
- tlouk, může být mazán;
- podpěra pro zkušební těleso, použití upínacího zařízení (Obr. 11).

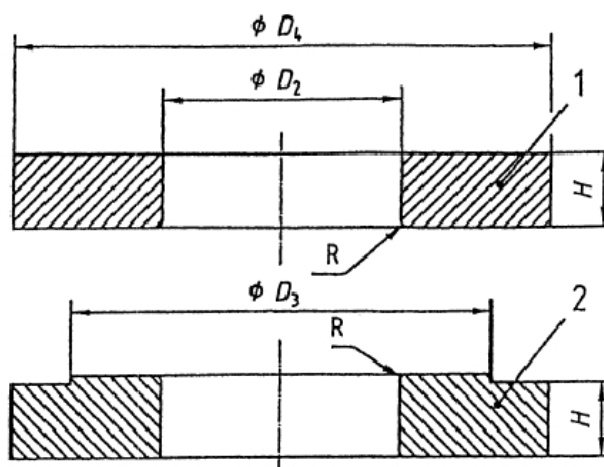


Obr. 11 Schéma systému padajícího tlouku [22]

1 – Zkušební těleso; 2 – Polokulová nárazová plocha; 3 – Snímač síly (přednostní umístění); 4 – Hřídel; 5 – Podpěra pro zkušební těleso; 6 – Upínací kroužek (volitelný); 7 – Základna; 8 – Akustická izolace (volitelná); 9 – Držák tlouku; 10 – Systém pro přidržení a uvolnění tlouku o známé hmotnosti; 11 – Vodící lišta tlouku o známé hmotnosti; 12 – Tlouk o známé hmotnosti.

U zkušebního přístroje musí být zajištěn kolmý dopad tlouku do středu zkoušeného tělesa. Tlouk má leštěnou polokulovou nárazovou plochu o poloměru 10 mm s rozměrovým tolerančním polem $\pm 0,1$ mm. Tlouk je vyroben z materiálu, který je dostatečně odolný proti otěru a má dostatečnou pevnost vůči vzniku plastické deformaci. Vhodným materiálem pro testování polymerů jsou nástrojové oceli, které jsou tepelně popř. chemicko-tepelně zpracovány. Hmotnost padajícího tlouku se závažím činí 23,77 kg. Snímač síly je umístěn do vzdálenosti jednoho poloměru tlouku od nárazové plochy tlouku. Musí být umístěn co nejblíže k nárazové ploše, z důvodu minimalizace externích sil, kromě toho musí být dosta-

tečně blízko, aby byl splněn požadavek na odezvu kmitočtu. Měřicí systém zaznamenává sílu s přesností do 1 % příslušné maximální síly.



Obr. 12 Schéma upínacího zařízení [22]

1 – Upínací kroužek; 2 – Podpěra pro zkušební těleso.

Tab. 9 Tabulka rozměrů upínacího zařízení [22]

Označení rozměrů	Průměr kotouče [mm]
D_2	40 ± 2
D_3	60
D_4	≥ 90
H	12
R	1

Podpěrný kroužek je umístěný na tuhé základně. Je zkonstruován tak, aby se pod zkušebním tělesem nemohla vytvořit vzduchová kapsa, je tím zabráněno vzniku pružinového efektu. Aby byl umožněn pohyb tlouku po úplném proražení zkušebního tělesa, je pod podpěrným kroužkem dostatečný prostor. Vnitřní průměr podpěrného kroužku je 40 mm s rozměrovým tolerančním polem ± 2 mm a minimální výškou 12 mm (Obr. 12, Tab. 9).

Základna pro zkušební zařízení je pevně namontovaná k tuhé konstrukci. Základna je dostatečně tuhá, aby byl minimalizován průhyb podpěry zkušebního tělesa.

7.2 Postup zkoušky

Pádová zkouška se provádí ve zkušebním prostředí, které je definované normou ISO 291. Zkoušení probíhá vždy ve stejném prostředí, z důvodu možných změn v mechanickém

chování zkoušeného tělesa, v důsledku změn teploty zkoušeného tělesa. Zkouší se při atmosférickém tlaku a pokojové teplotě v místnosti 23 °C. [22]

Měří se tloušťka zkušebního tělesa, která musí být s přesností na 0,02 mm ve třech bodech rovnoměrně rozmístěných na obvodu tělesa. Jestliže je průměrná hodnota změřené tloušťky v rámci jednoho vzorku materiálu o více než 5 %, zkušební těleso je vyřazeno a nahrazeno jiným. U vstříkovaných zkušebních těles stačí změřit jedno zkušební těleso z dané série. Jestliže má vstříkovací forma více tvarových dutin, změří se tloušťka zkušebního tělesa z každé tvarové dutiny. Pokud je rozdíl tloušťky zkušebních těles v různých tvarových dutinách téže formy větší než 5 %, je nutné je považovat za různé série. [39]

Zkušební těleso není upnuto, jedná se o standardní provedení zkoušky. Nárazová plocha tlouku může být mazaná olejem nebo tuhým mazivem před každou zkouškou. V tomto případě tlouk při testování polymerních materiálů mazán nebyl. [22]

Na podpěrný kroužek je umístěno zkušební těleso a spustí se rázová zkouška. Rychlost nárazu během průrazu by se neměla měnit o více než 20 %. [22]

Padostroj je propojený přes elektronický převodník s počítačem, ve kterém je nainstalovaný program TestXpert II. Program zajišťuje sběr dat při spuštění pádové zkoušky a vyhodnocení naměřených dat jak ve statistickém pojetí, tak graficky.

8 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ

Program TestXpert II byl využit k nastavení parametrů zkoušky, její provedení a k následnému záznamu dat a jejich vyhodnocení. Dále pro statistické vyhodnocení naměřených dat byly využity programy Minitab a Microsoft Office Excel. Program Minitab je určený k statistickému vyhodnocení získaných dat a jejich porovnávání. Pomocí něj lze jednoduše vytvářet grafy s patřičnými parametry, které jsou požadovány k vyhodnocení získaných dat. Základními grafy k vyhodnocování jsou individuální bodové grafy, krabicové grafy a časové průběhy bodů. V programu Minitab lze zobrazit základní popisné statistiky, které zahrnují aritmetický průměr, medián, směrodatnou odchylku, minimální a maximální hodnotu, variační rozpětí a další číselné charakteristiky.

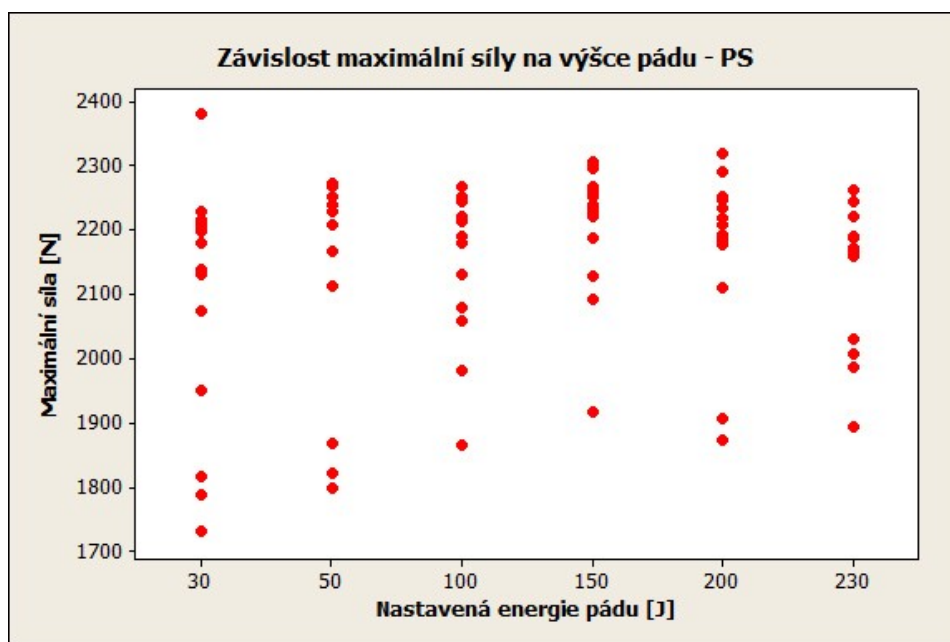
Vyhodnocovanými parametry u každého materiálu byla maximální síla a celková spotřebovaná práce v závislosti na výšce pádu. Výška pádu je reprezentovaná nastavenou energií pádu, která se nastavovala v programu TestXpert II. Bylo provedeno 15 měření u jednotlivých výšek pro každý materiál. V programu Minitab byla data zkontrolována prostřednictvím individuálního bodového a krabicového grafu, dále byla vyobrazena tabulka s číselnými charakteristikami. Na základě těchto grafů a číselných charakteristik byly ze souboru vyřazeny hodnoty, které vykazovaly známky chyby. Výběrový soubor pro výsledné vyhodnocování dat měl počet měření $n = 10$. Data z tohoto výběrového souboru byla znovu zpracována do krabicového grafu a tabulky s číselnými charakteristikami. Za hlavní porovnávací číselnou charakteristiku je vybrán medián. V programu Microsoft Office Excel byly hodnoty mediánu získané z programu Minitab zpracovány do přehledných porovnávacích grafů.

8.1 Polystyren

Prvním zkoušeným materiálem byl houževnatý polystyren. Zkušební tělesa byla měřena při šesti výškách pádu, které jsou určeny určitou energií, která je závislá právě na nastavené výšce pádu, hmotnosti tlouku se závažím a gravitačním zrychlením. Energie pádu se nastavuje v programu TestXpert II propojeným s padostrojem. K testování bylo připraveno 15 zkušebních těles, která byla podrobena rázové zkoušce v pádu při nastavených energiích 30, 50, 100, 150, 200 a 230 J.

8.1.1 Závislost maximální síly na výšce pádu

První vyhodnocovanou veličinou je maximální síla nárazu, která v závislosti na nastavené výšce pádu vykazuje poměrně velký rozptyl v naměřených hodnotách. U všech nastavených energií pádu došlo k průrazu všech zkušebních těles. Největšího variačního rozpětí bylo dosaženo u nejnižší nastavené hodnoty energie pádu – 30 J. Na obrázku (Obr. 13) jsou zobrazeny všechny naměřené hodnoty maximální síly v závislosti na výšce pádu. V tabulce (Tab. 10) jsou vyhodnoceny všechny charakteristiky pro výběrový statistický soubor z 15 měření.



Obr. 13 Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PS, $n=15$

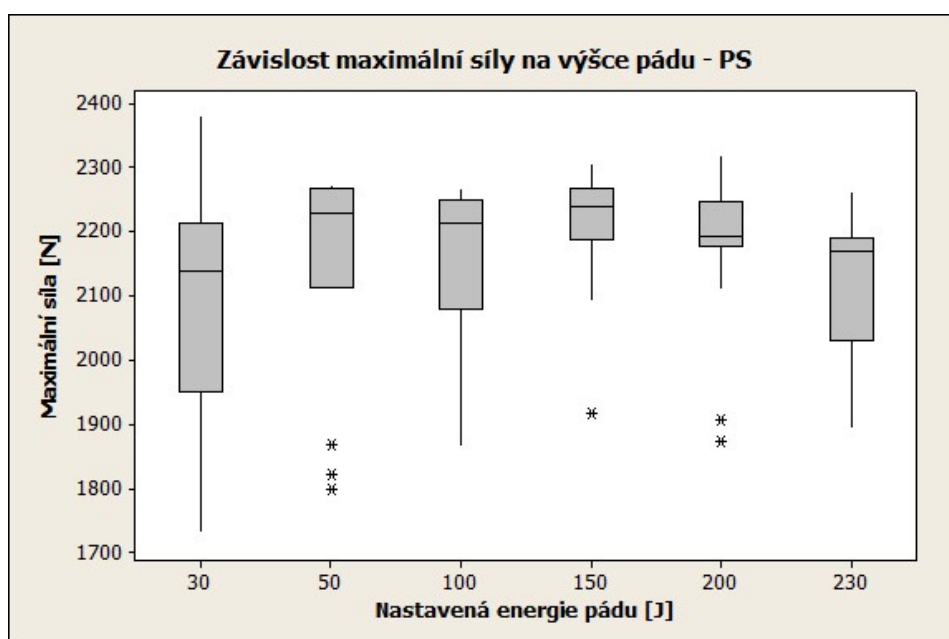
Z hodnot maximální síly v závislosti na nastavené energii byl po individuálním bodovém grafu sestaven krabicový graf, vyobrazen na obrázku (Obr. 14). Z grafu lze názorně vidět, že se ve výběrovém souboru s počtem měření 15 vyskytují vychýlené hodnoty, které jsou zobrazeny v krabicovém grafu hvězdičkou.

Pádová zkouška se řadí do rázových, destruktivních zkoušek, při níž se zkoušený materiál namáhá až do porušení, tzn. proražení zkušebního tělesa. Na tyto zkoušky mají velký vliv zkušební tělesa, která byla vyrobena technologií vstřikování. Tato technologie je jedna z nejpřesnějších a nejvyužívanějších, nicméně ve výstřicích se mohou vyskytovat vnitřní vady, které způsobují chyby měření.

Na základě pečlivého zkoumání zaznamenaných grafů a lomových ploch po průrazu, bylo vyřazeno 5 vychýlených hodnot. Tímto se výběrový statistický soubor zredukoval na počet měření 10. V tabulce (Tab. 11) jsou zobrazeny statistické charakteristiky, jakož aritmetický průměr, chyba typu A, směrodatná odchylka, minimální hodnota, medián, maximální hodnota a variační rozpětí.

Tab. 10 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PS, $n=15$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	2092	2149	2159	2212	2172	2136
Chyba typu A	48	44	30	26	32	27
Směrodatná odchylka	187	172	116	102	125	106
Minimální hodnota	1731	1797	1866	1916	1873	1892
Medián	2138	2228	2213	2239	2191	2168
Maximální hodnota	2380	2273	2267	2307	2319	2262
Variační rozpětí	649	477	401	390	447	370

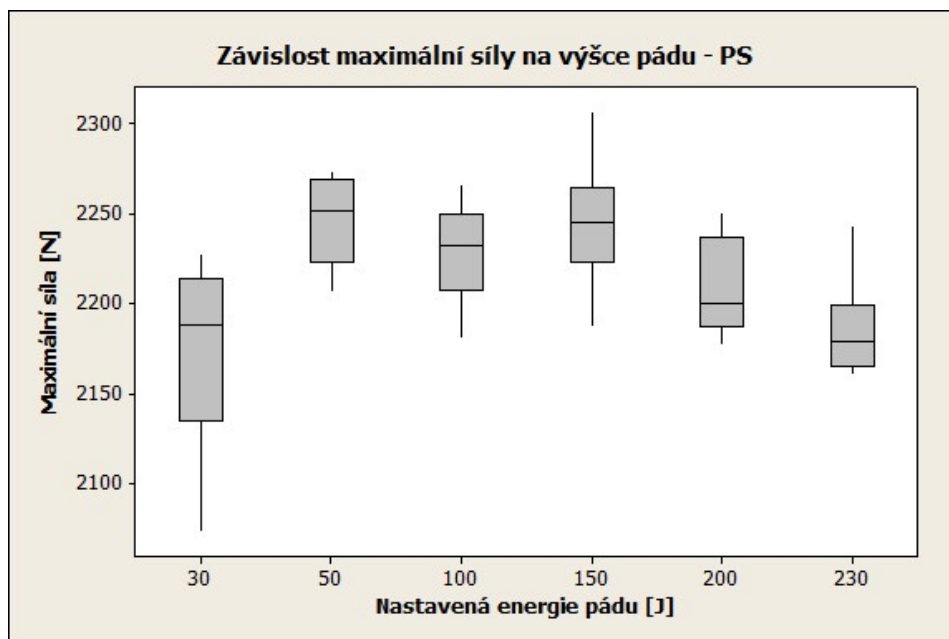


Obr. 14 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PS, $n=15$

Tab. 11 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PS, $n=10$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	2171	2246	2228	2245	2209	2186
Chyba typu A	16	8	9	10	9	9
Směrodatná odchylka	50	25	29	33	27	27
Minimální hodnota	2073	2207	2180	2187	2177	2160
Medián	2188	2251	2232	2245	2200	2179
Maximální hodnota	2227	2273	2267	2307	2251	2243
Variační rozpětí	154	67	86	119	74	83

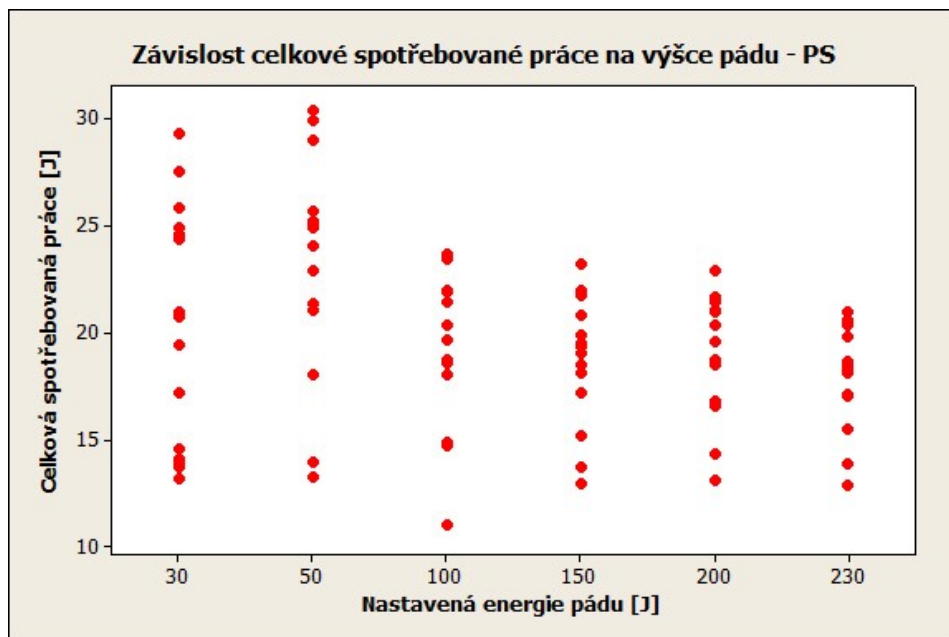
Na obrázku (Obr. 15) je zobrazen krabicový graf s vyřazenými vychýlenými hodnotami. Z grafu vyplývá, že optimální nastavená energie pádu pro materiál PS je mezi 50 a 100 J.



Obr. 15 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PS, $n=10$

8.1.2 Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu

Druhou vyhodnocovanou veličinou u pádové zkoušky prováděné na zkušebním tělese z polystyrenu byla celková spotřebovaná práce. Na obrázku (Obr. 16) jsou zaznamenány naměřené hodnoty celkové spotřebované práce v individuálním bodovém grafu pro výběrový statistický soubor s počtem měření 15. Graf poukazuje na prvotní pohled získaných hodnot. Lze z něj vyčíst, které hodnoty mohou být vychýlené.



Obr. 16 Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PS, $n=15$

V tabulce (Tab. 12) jsou prostřednictvím programu Minitab vyobrazeny statistické charakteristiky, které se vztahují na výběrový soubor s počtem měření 15. Z měření lze vypočítat, že s rostoucí výškou pádu klesá chyba měření typu A.

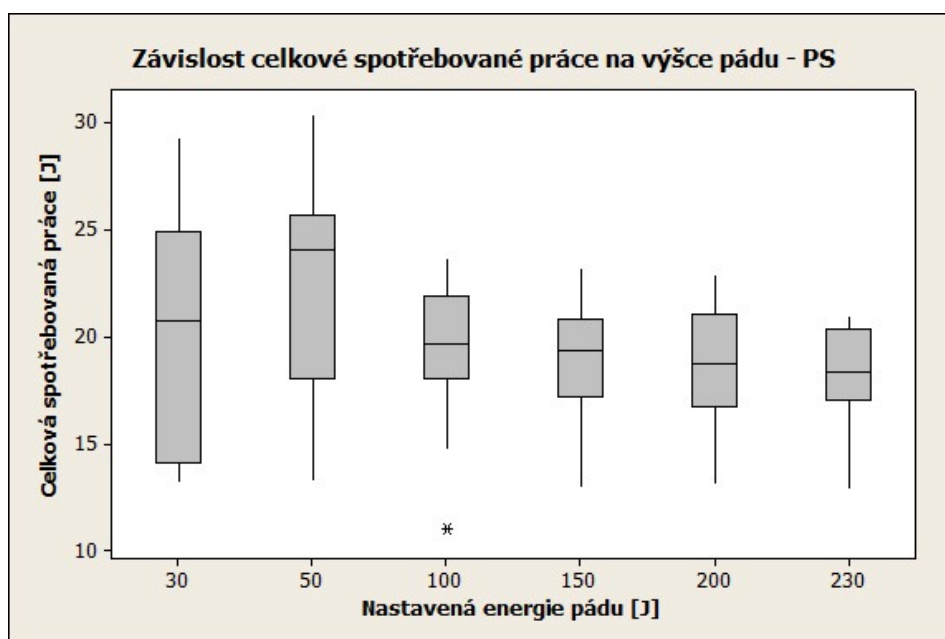
Na obrázku (Obr. 17) je zobrazen krabicový graf pro tentýž výběrový statistický soubor, ze kterého je patrný velký variační rozsah s vychýlenou hodnotou u nastavené energie pádu 100 J (zobrazeno hvězdičkou).

Na základě podrobného zkoumání, jak již bylo uvedeno u vyhodnocování maximální síly, bylo vyřazeno 5 hodnot a na základě redukovaného výběrového statistického souboru byly znovu vyhodnoceny statistické charakteristiky, viz tabulka (Tab. 13).

Na obrázku (Obr. 18) je znázorněn krabicový graf, který zobrazuje celkovou spotřebovanou práci v závislosti na výšce pádu znázorněnou nastavenou energií. Z pohledu celkové spotřebované práce je optimální nastavenou energií pro materiál PS mezi 100 a 230 J.

Tab. 12 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PS, n=15

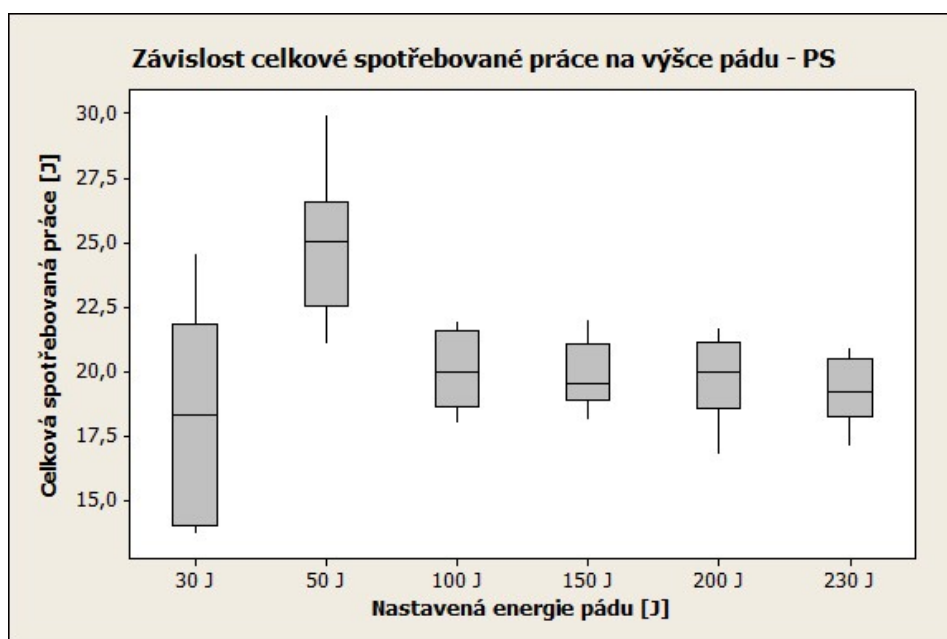
Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	20,3	22,6	19,2	18,7	18,8	17,9
Chyba typu A	1,4	1,5	0,9	0,8	0,7	0,6
Směrodatná odchylka	5,6	5,7	3,5	3,0	2,8	2,4
Minimální hodnota	13,2	13,3	11,0	12,9	13,1	12,9
Medián	20,7	24,0	19,6	19,4	18,7	18,3
Maximální hodnota	29,3	30,4	23,7	23,2	22,9	20,9
Variační rozpětí	16,2	17,1	12,7	10,3	9,8	8,1



Obr. 17 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PS, n=15

Tab. 13 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PS, n=10

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	18,4	24,9	20,0	19,9	19,8	19,3
Chyba typu A	1,4	0,9	0,5	0,4	0,5	0,4
Směrodatná odchylka	4,3	2,9	1,5	1,3	1,6	1,3
Minimální hodnota	13,7	21,1	18,0	18,1	16,8	17,1
Medián	18,3	25,0	20,0	19,5	20,0	19,2
Maximální hodnota	24,6	29,9	21,9	22,0	21,7	20,9
Variační rozpětí	10,9	8,9	3,9	3,9	4,9	3,8

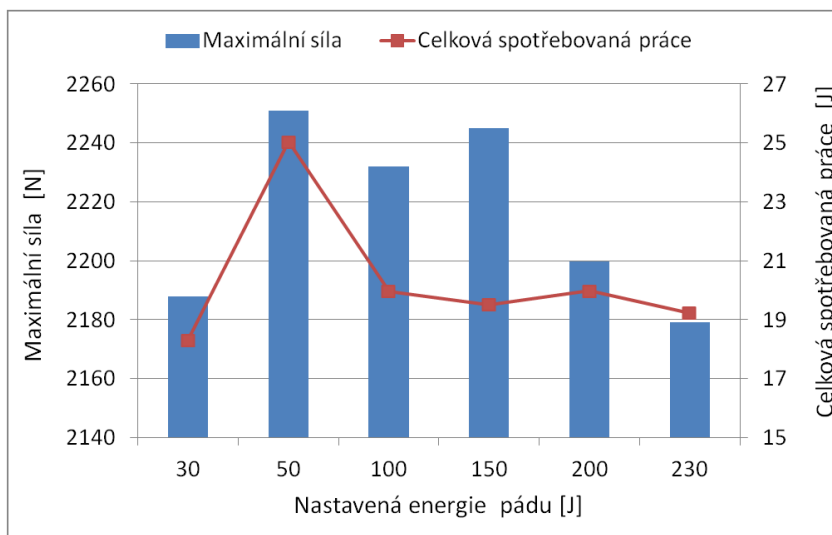


Obr. 18 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PS, n=10

8.1.3 Porovnání parametrů pádové zkoušky

Na obrázku (Obr. 19) je v programu Microsoft Office Excel sestaven porovnávací graf. Tento graf znázorňuje potřebnou maximální sílu a celkovou spotřebovanou práci vynaloženou na proražení zkušebního tělesa z polystyrenu při stanovených výškách pádu. Maxi-

mální síla a celková spotřebovaná práce jsou mediánem z jednotlivých výběrových souborů s počtem měření 10. Medián byl vybrán na základě vhodnosti před aritmetickým průměrem, který není tolik ovlivňován extrémními hodnotami. Z pohledu optimální nastavené energie pádu pro obě vyhodnocované veličiny se jeví hodnota 100 J u testovaného materiálu z PS.



Obr. 19 Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – PS

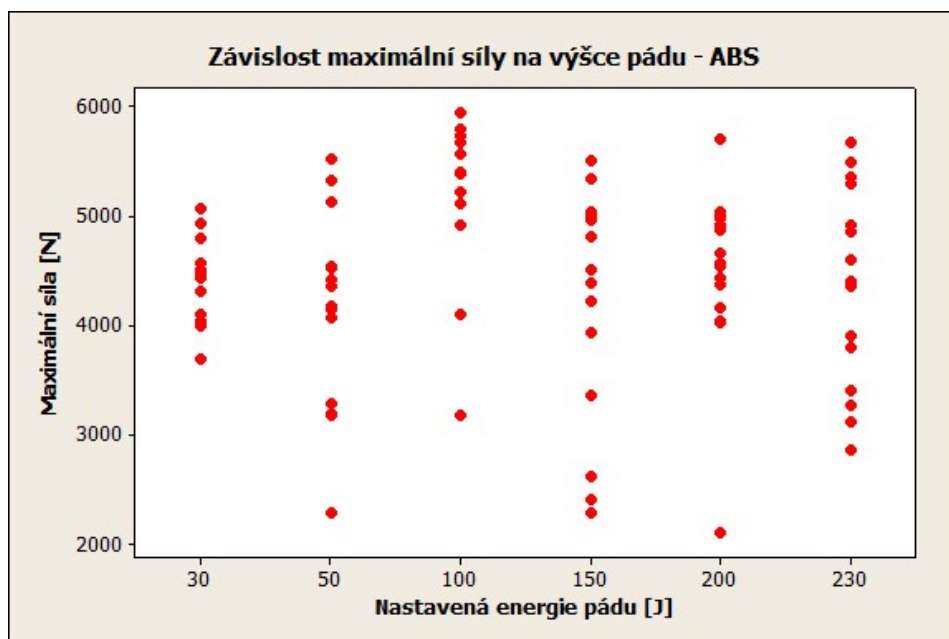
8.2 Akrylonitril-butadien-styren

Dalším zkoušeným materiálem byl akrylonitril-butadien-styren. Zkušební tělesa z tohoto materiálu byla měřena při šesti se zvyšujících energiích, stejně jako u předchozího materiálu. Statisticky vyhodnocovanými veličinami byla maximální síla a celková spotřebovaná práce. Obě veličiny jsou v závislosti na výšce pádu, znázorněné v grafech nastavenou energií pádu.

8.2.1 Závislost maximální síly na výšce pádu

Maximální síla je veličina, která je statisticky vyhodnocována v závislosti na výšce pádu. Nejprve jsou hodnoty této veličiny zobrazeny v individuálním bodovém grafu a následně v krabicovém grafu.

Na obrázku (Obr. 20) lze vidět individuální bodový graf výběrového souboru s počtem měření 15. U maximální síly, která je závislá na nastavené energii pádu 50, 100 a 200 J lze vidět značně vychýlené hodnoty směrem k nižší maximální síle, oproti ostatním hodnotám.

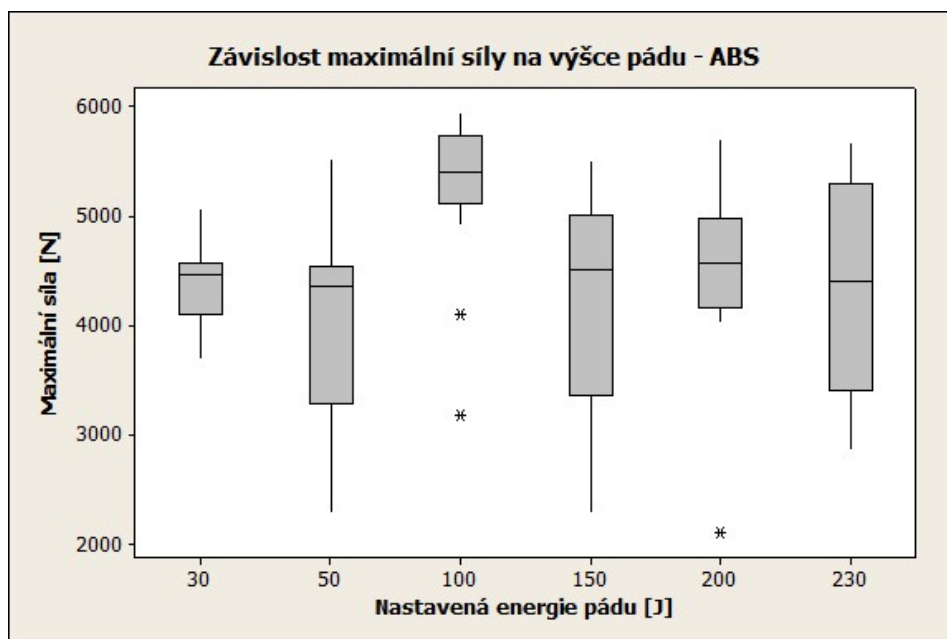


Obr. 20 Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – ABS, $n=15$

Tabulka (Tab. 14) přehledně udává vypočtené statistické charakteristiky výběrového souboru s počtem měření 15 u zkoušeného materiálu akrylonitril-butadien-styren. Největší variační rozpětí je při nastavené energii pádu 200 J, který činí 3591 N. Variačním rozpětím maximální síly se rozumí rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou.

Tab. 14 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – ABS, $n=15$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	4410	4179	5234	4226	4494	4351
Chyba typu A	94	227	187	278	205	238
Směrodatná odchylka	365	878	726	1076	795	922
Minimální hodnota	3686	2293	3179	2282	2109	2855
Medián	4465	4359	5398	4508	4561	4396
Maximální hodnota	5065	5523	5940	5503	5700	5675
Variační rozpětí	1379	3229	2761	3220	3591	2820



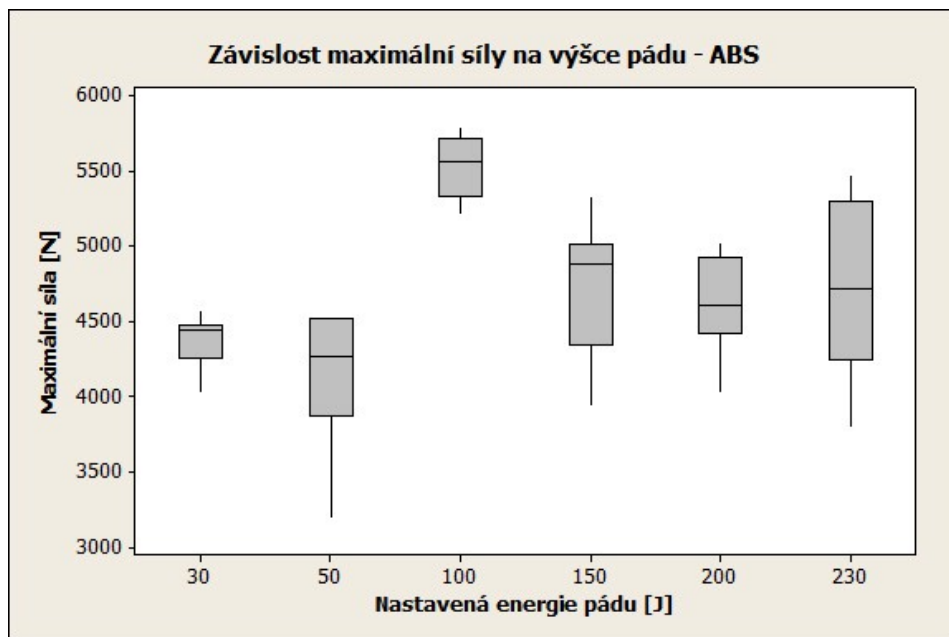
Obr. 21 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – ABS, $n=15$

Krabicový graf, viz obrázek (Obr. 21), dopomáhá k bližší identifikaci vychýlených hodnot, u kterých by se mělo uvažovat, zda jsou tyto hodnoty chybné či zda se jedná o extrém, který nesmí být z výběrového souboru vyřazen. U nastavené energie pádu 100 J a 200 J jsou zobrazeny hvězdičky, které znázorňují vychýlené hodnoty maximální síly.

Tab. 15 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – ABS, $n=10$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	4367	4123	5526	4721	4638	4695
Chyba typu A	57	156	67	138	100	186
Směrodatná odchylka	180	493	213	437	317	589
Minimální hodnota	4032	3195	5214	3940	4024	3798
Medián	4450	4266	5563	4882	4606	4724
Maximální hodnota	4573	4534	5795	5342	5033	5483
Variační rozpětí	541	1339	581	1402	1009	1685

Z krabicového grafu na obrázku (Obr. 22) lze vidět, že některé hodnoty maximální síly jsou vychýlené. Chybné hodnoty byly z výběrového souboru vyřazeny na základě pečlivého zkoumání grafů a lomových ploch po penetračním testu, přičemž výběrový statistický soubor byl snížen na počet měření 10 pro další vyhodnocování. V tabulce 15 (Tab. 15) jsou vyhodnoceny statistické charakteristiky pro maximální sílu nárazu v závislosti na nastavené energii pádu.

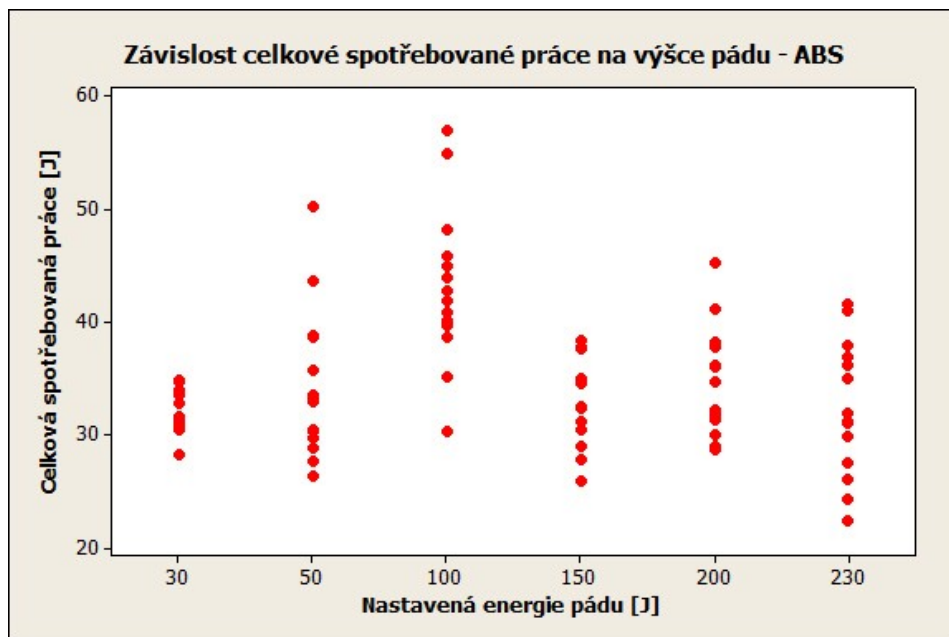


Obr. 22 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – ABS, $n=10$

Na základě krabicového grafu, který je zobrazen na obrázku (Obr. 22), může být určena optimální nastavená energie 30 J u testovaného materiálu z ABS. U této energie bylo zaznamenáno nejnižšího variačního rozpětí, jakož i chyby měření typu A.

8.2.2 Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu

U pádové zkoušky, která je prováděna na zkušebním tělese z ABS, se dále vyhodnocuje celková spotřebovaná práce v závislosti na nastavené energii pádu. V individuálním bodovém grafu, viz obrázek (Obr. 23), jsou hodnoty celkové spotřebované práce závislé na nastavené energii pádu výběrového souboru s počtem měření 15. Při nastavené energii pádu 50 a 100 J jsou vidět vychýlené hodnoty, které jsou lépe znázorněny v krabicovém grafu na obrázku (Obr. 24).



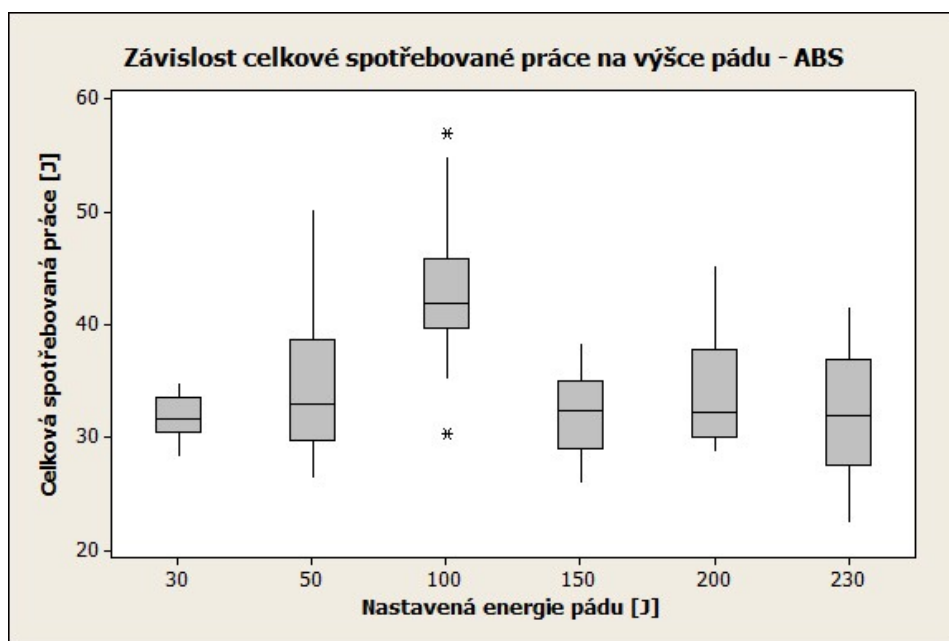
Obr. 23 Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - ABS, $n=15$

V tabulce (Tab. 16) jsou zobrazeny statistické charakteristiky pro výběrový statistický soubor s počtem měření 15, z něhož je patrné, že medián celkové spotřebované práce při všech nastavených energiích pádu jsou téměř stejné, pohybující se okolo 32 J, mimo nastavenou výšku 100 J, při níž je medián celkové spotřebované práce 41,9 J.

Tab. 16 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - ABS, $n=15$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	32,0	34,0	43,1	32,5	34,2	32,6
Chyba typu A	0,5	1,7	1,8	1,0	1,3	1,5
Směrodatná odchylka	1,9	6,5	6,8	3,8	4,9	5,8
Minimální hodnota	28,3	26,4	30,3	25,9	28,7	22,4
Medián	31,6	32,9	41,9	32,3	32,2	32,0
Maximální hodnota	34,8	50,3	57,0	38,4	45,3	41,6
Variační rozpětí	6,6	23,9	26,8	12,5	16,6	19,2

Z krabicového grafu znázorněného na obrázku (Obr 24), je pozorován výskyt vychýlených hodnot, které jsou znázorněny hvězdičkou, a to při nastavené energii pádu 100 J. Na základě detailního pozorování procesu testování, zejména z podrobných grafů měření a lomových ploch po penetračním testu došlo k vyřazení pěti hodnot, což vedlo ke zkvalitnění výsledků měření. Nedokonalosti v měření mohly nastat vlivem samotného procesu vstříkování při výrobě zkušebních těles anebo při zkoušení vlivem rozdílného umístění zkušebního tělesa na základnu testovacího přístroje.

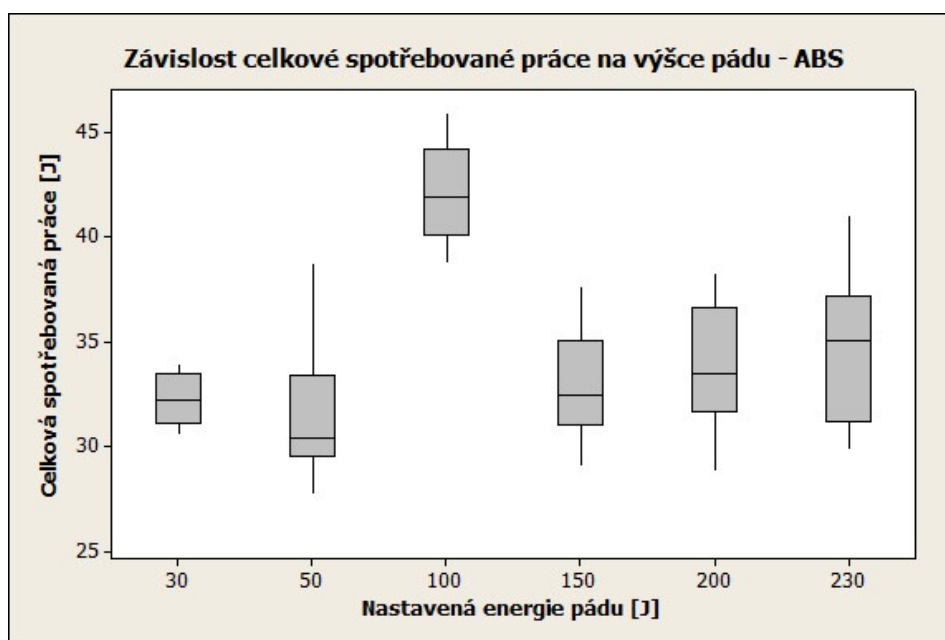


Obr. 24 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - ABS, $n=15$

Na základě hodnot z tabulky (Tab. 17), kde byl vyhodnocen redukovaný statistický soubor s počtem měření 10, byl vyhotoven krabicový graf vyobrazený na obrázku (Obr. 25). Optimální nastavenou energií z pohledu celkové spotřebované práce je energie 30 J.

Tab. 17 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - ABS, $n=10$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	32,2	31,6	42,1	32,9	33,9	34,6
Chyba typu A	0,4	1,0	0,7	0,8	1,0	1,1
Směrodatná odchylka	1,3	3,2	2,3	2,6	3,1	3,6
Minimální hodnota	30,5	27,7	38,8	29,0	28,8	29,9
Medián	32,2	30,4	41,9	32,4	33,5	35,0
Maximální hodnota	34,0	38,7	45,9	37,7	38,2	41,0
Variační rozpětí	3,5	11,0	7,2	8,7	9,4	11,2

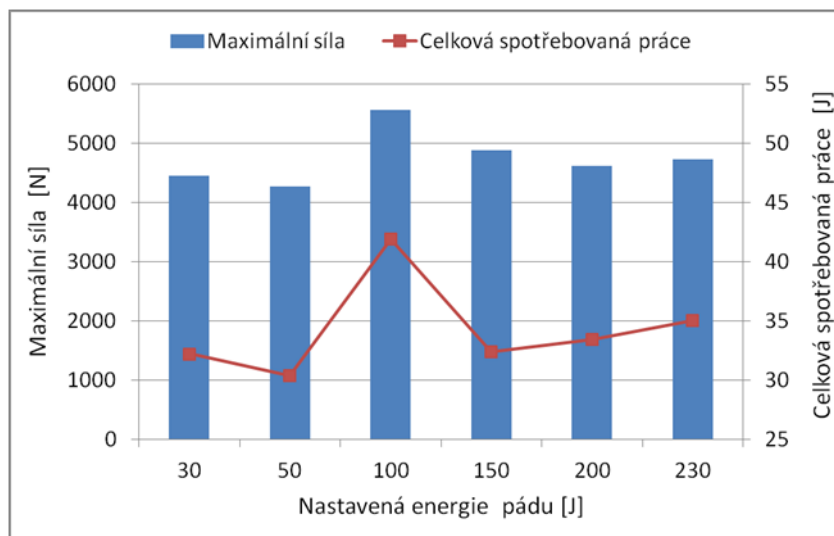


Obr. 25 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - ABS, $n=10$

8.2.3 Porovnání parametrů pádové zkoušky

Na obrázku (Obr. 26) je znázorněn porovnávací graf, který znázorňuje potřebnou maximální sílu a celkovou spotřebovanou práci vynaloženou na proražení zkušebního tělesa z akrylonitril-butadien-styrenu při stanovených výškách pádu. Hodnota maximální síly a celkové spotřebované práce jsou mediánem z jednotlivých výběrových souborů s počtem

měření 10. Z naměřených hodnot lze usoudit, že optimální nastavenou energií pádu je pro obě vyhodnocované veličiny 30 J, což odpovídá nejnižší nastavované výšce pádu. U vyšších nastavených výšek měření dochází k narůstání chyby měření.



Obr. 26 Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – ABS

8.3 Kopolymer styren-akrylonitril

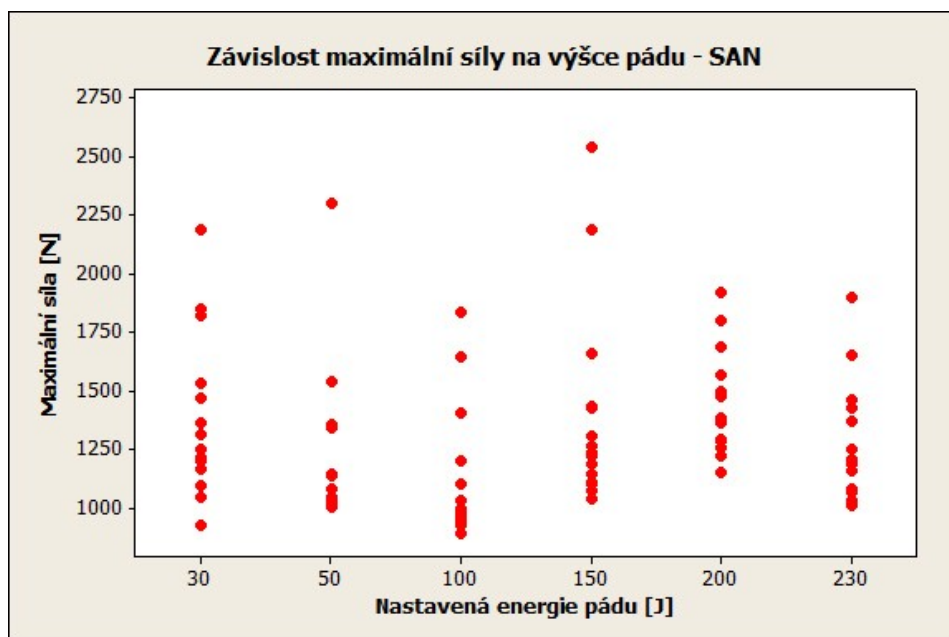
Kopolymer styren-akrylonitril je dalším zkoušeným materiálem. Zkušební tělesa z tohoto materiálu byla měřena při nastavených energiích 30, 50, 100, 150, 200 a 230 J. Maximální síla a celková spotřebovaná práce v závislosti na výšce pádu byly veličiny, které se statisticky vyhodnocovaly. Na rozdíl od prvních dvou materiálů se materiál SAN chová odlišně, při kontaktu s tloučkem se tříští na malé kousky. Z pohledu vyhodnocování rázových zkoušek se jedná o křehký lom, nedochází k plastické deformaci. Po dosažení maximální síly materiál praská a tříští se.

8.3.1 Závislost maximální síly na výšce pádu

Maximální síla je vyhodnocována v závislosti na výšce pádu, která koresponduje s nastavenou energií. Na obrázku (Obr. 27) lze v individuálním bodovém grafu vidět hodnoty maximální síly, které se vztahují k nastavené energii pádu. Ke každé nastavené energii odpovídá 15 zkoušek téhož materiálu. Již z individuálního bodového grafu je patrný značný rozptyl hodnot měření, což odpovídá charakteru zkoušeného materiálu.

Prostřednictvím individuálního bodového grafu (Obr. 27), bylo nejdříve zobrazeno rozpětí naměřených hodnot a možné vychýlené hodnoty. Krabicový graf zobrazený na obrázku

(Obr. 28) umožní bližší identifikaci vychýlených hodnot, které jsou specifikované hvězdičkou.

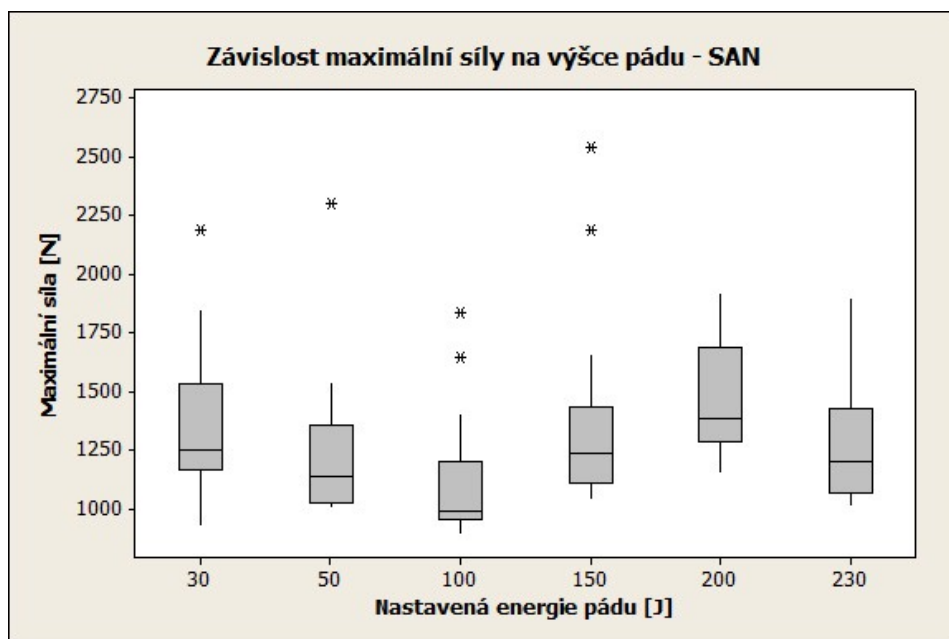


Obr. 27 Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – SAN, $n=15$

V tabulce (Tab. 18) jsou hodnoty aritmetického průměru, směrodatné odchylky, mediánu, rozsahu měření a dalších statistických charakteristik, které se vážou na výběrový soubor s počtem měření 15.

Tab. 18 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – SAN, $n=15$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	1379	1248	1124	1395	1474	1269
Chyba typu A	89	89	73	111	66	66
Směrodatná odchylka	343	346	284	432	255	254
Minimální hodnota	926	1004	890	1036	1148	1010
Medián	1249	1137	990	1237	1381	1204
Maximální hodnota	2189	2301	1836	2543	1923	1899
Variační rozpětí	1263	1298	947	1508	775	889

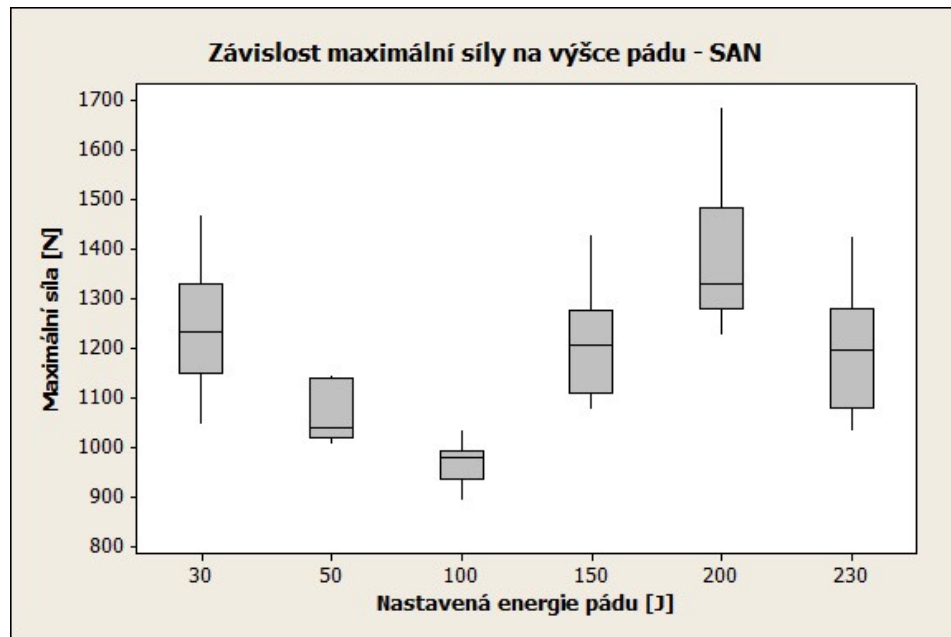


Obr. 28 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – SAN, $n=15$

U všech nastavených energií pádu se objevují vychýlené hodnoty, které byly z výběrového statistického souboru vyřazeny. Po pečlivém vyhodnocení a odstranění vychýlených hodnot na základě naměřených hodnot byl výběrový statistický soubor redukován na celkový počet měření 10. Následně byly vyhodnoceny statistické charakteristiky, které jsou vyobrazeny v tabulce (Tab. 19).

Tab. 19 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – SAN, $n=10$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
	Statistické charakteristiky [N]					
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	1237	1063	967	1207	1374	1198
Chyba typu A	39	18	13	34	45	40
Směrodatná odchylka	125	58	41	108	142	126
Minimální hodnota	1045	1004	890	1075	1223	1033
Medián	1232	1036	978	1205	1327	1194
Maximální hodnota	1468	1143	1033	1429	1685	1425
Variační rozpětí	423	140	143	354	461	392



Obr. 29 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – SAN, $n=10$

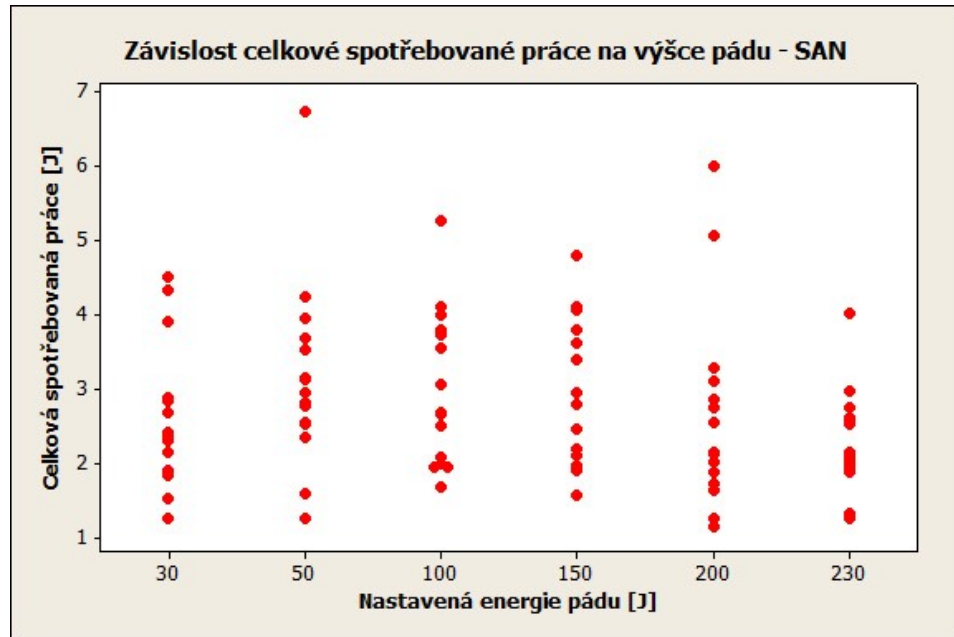
Na obrázku (Obr 29) je zobrazen krabicový graf maximální síly v závislosti na výšce pádu pro výběrový statistický soubor s počtem měření 10. Z pohledu maximální síly vyplývá, že optimální nastavenou energií pro materiál SAN je hodnota 100 J.

8.3.2 Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu

Další veličinou získanou z pádové zkoušky, která se vyhodnocuje, je celková spotřebovaná práce v závislosti na nastavené energii pádu. Nejdříve byl vytvořen individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu, sestaven ze získaných hodnot pádové zkoušky, viz obrázek (Obr. 30). Lze vidět, že se ve výběrovém souboru s počtem měření 15 vyskytují vychýlené hodnoty, které jsou vidět při každé nastavené energii pádu.

Statistické charakteristiky jsou znázorněny v tabulce (Tab. 20), které se vztahují na výběrový soubor s počtem měření 15. Tabulka uvádí aritmetický průměr, chybu typu A, směrodatnou odchylku a další charakteristiky vztažené na nastavenou energii pádu.

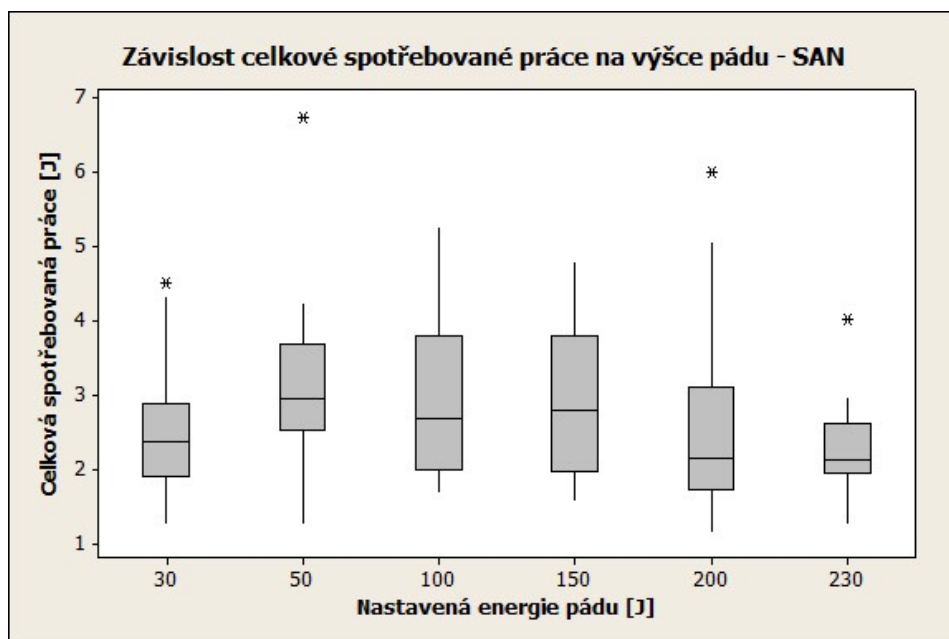
Pro názornější určení je sestaven krabicový graf, který je zobrazen na obrázku (Obr. 31). Z krabicového grafu na obrázku (Obr. 31) vyplývá, že z pohledu celkové spotřebované práce je optimální nastavenou energií 30 J.



Obr. 30 Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - SAN, $n=15$

Tab. 20 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - SAN, $n=15$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	2,6	3,1	3,0	2,9	2,6	2,3
Chyba typu A	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
Směrodatná odchylka	1,0	1,3	1,0	1,0	1,3	0,7
Minimální hodnota	1,3	1,3	1,7	1,6	1,2	1,3
Medián	2,4	3,0	2,7	2,8	2,2	2,1
Maximální hodnota	4,5	6,7	5,3	4,8	6,0	4,0
Variační rozpětí	3,3	5,5	3,6	3,2	4,9	2,7

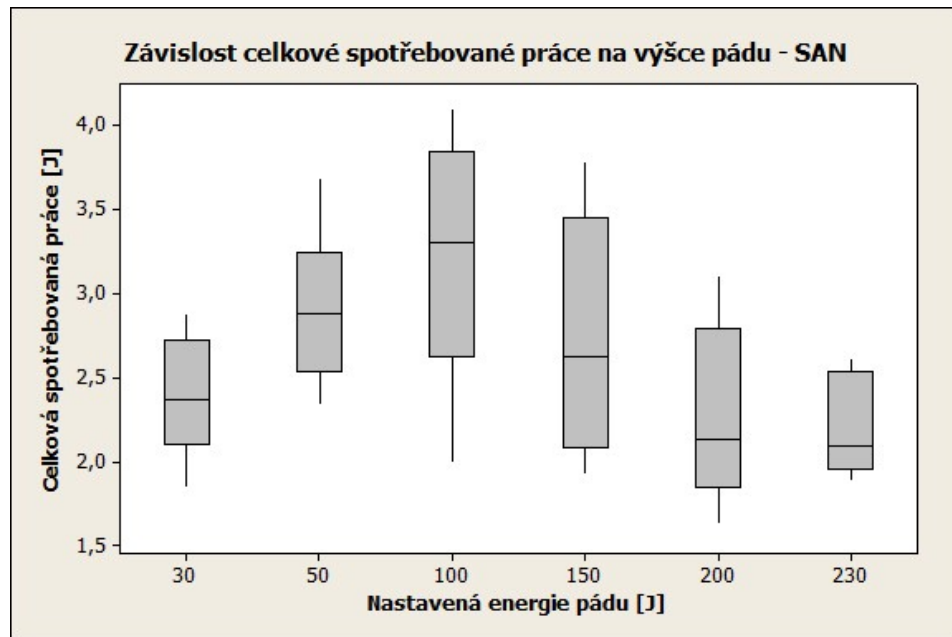


Obr. 31 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - SAN, $n=15$

Jak již bylo uvedeno v předchozí části, kde byla vyhodnocována závislost maximální síly na výšce pádu, i zde bylo vyřazeno pět hodnot, které byly považovány za vychýlené hodnoty. V tabulce (Tab. 21) jsou vyhodnoceny statistické charakteristiky, které jsou oprostěny o vychýlené hodnoty.

Tab. 21 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - SAN, $n=10$

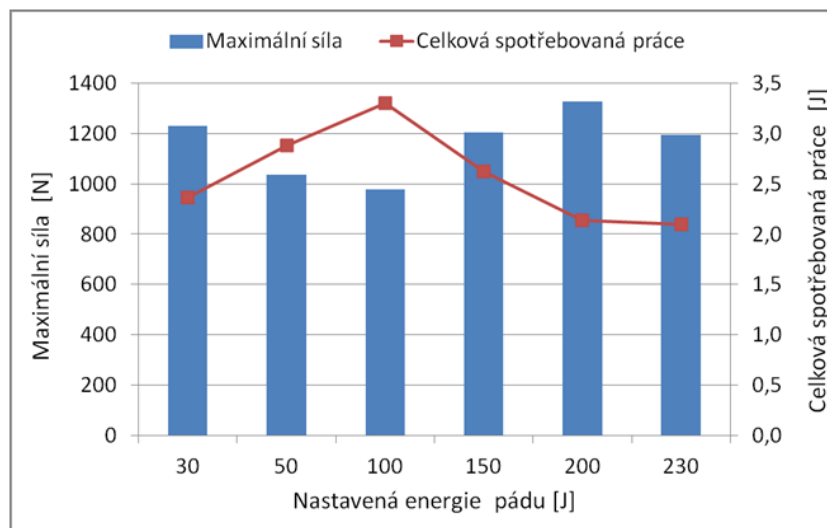
Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	2,4	2,9	3,2	2,7	2,3	2,2
Chyba typu A	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
Směrodatná odchylka	0,4	0,4	0,7	0,7	0,5	0,3
Minimální hodnota	1,8	2,3	2,0	1,9	1,6	1,9
Medián	2,4	2,9	3,3	2,6	2,1	2,1
Maximální hodnota	2,9	3,7	4,1	3,8	3,1	2,6
Variační rozpětí	1,0	1,4	2,1	1,9	1,5	0,7



Obr. 32 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - SAN, $n=10$

8.3.3 Porovnání parametrů pádové zkoušky

Graf zaznamenaný na obrázku (Obr. 33) stanovuje potřebnou maximální sílu a celkovou spotřebovanou práci vynaloženou na proražení zkušebního tělesa z kopolymeru styren-akrylonitril při stanovených výškách pádu. Je zde nastavených 6 výšek pádu, které jsou specifikovány nastavenou energií pádu. Maximální síla a celková spotřebovaná práce jsou mediánem z jednotlivých výběrových souborů s počtem měření 10. U křehkých materiálů jakož je i materiál SAN je velice obtížné určit optimální výšku pádu (nastavenou energii pádu) z důvodu nejistoty měření. Z tohoto důvodu by bylo vhodné měření doplnit o další měření a navýšit výběrový statistický soubor na počet měření minimálně 30, aby se měření potvrdilo.



Obr. 33 Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – SAN

8.4 Polypropylen

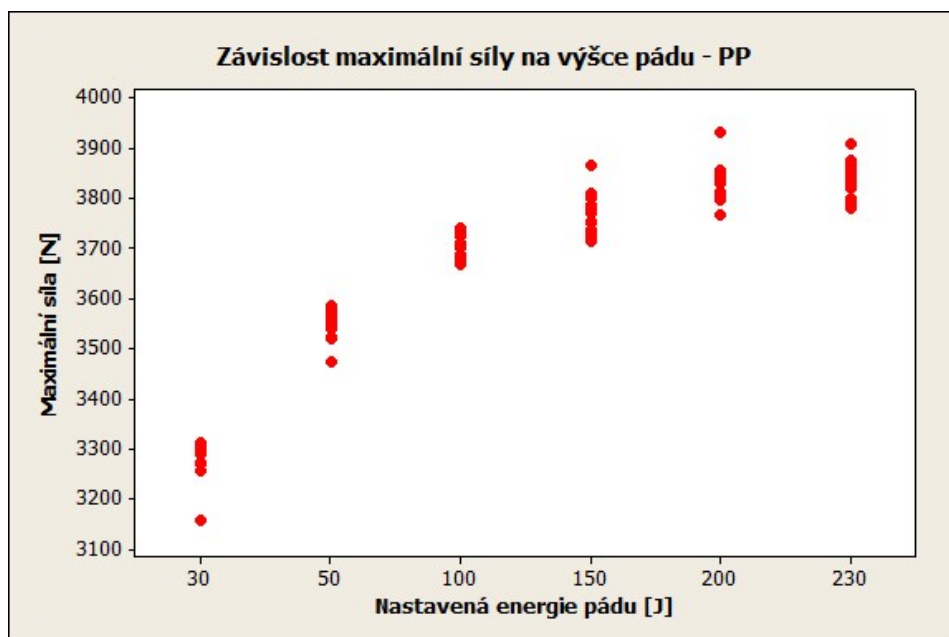
Polypropylen byl dalším testovaným materiálem, na kterém byla prováděna pádová zkouška. Zkušební tělesa byla podrobena zkoušce při šesti se zvyšujících energiích, stejně jako u předchozích materiálů. Maximální síla a celková spotřebovaná práce jsou vyhodnocovány v závislosti na výšce pádu, které se statisticky vyhodnocovaly v programu Minitab. PP se řadí do kategorie standardních plastů, nicméně se nachází v mnoha modifikacích, které se můžou řadit již do skupiny plastů konstrukčních. Vyniká svou vysokou houževnatostí vůči rázovému namáhání a šíření napětí za studena.

8.4.1 Závislost maximální síly na výšce pádu

Maximální síla je veličina, která je statisticky vyhodnocována v závislosti na výšce pádu. Nejprve jsou hodnoty této veličiny zobrazeny v individuálním bodovém grafu a následně v krabicovém grafu. Z grafu na obrázku (Obr. 34) lze vidět jednotlivé hodnoty maximální síly v závislosti na energii pádu. Jednotlivé body v grafu zobrazují maximální sílu na proražení zkoušeného tělesa, které jsou vztaženy na nastavenou energii pádu. Maximální sílu u nastavené energie 30 J je nižší než u ostatních energií, protože nedošlo k proražení zkušebních těles, došlo pouze k plastické deformaci.

Statistické charakteristiky jsou vypsány v Tab. 22, kterými jsou aritmetický průměr, směrodatná odchylka, medián atd. Již v individuálním bodovém grafu, viz Obr. 34, následně v krabicovém grafu na Obr. 35, lze zpozorovat, že se maximální síla zvyšuje při zvyšující

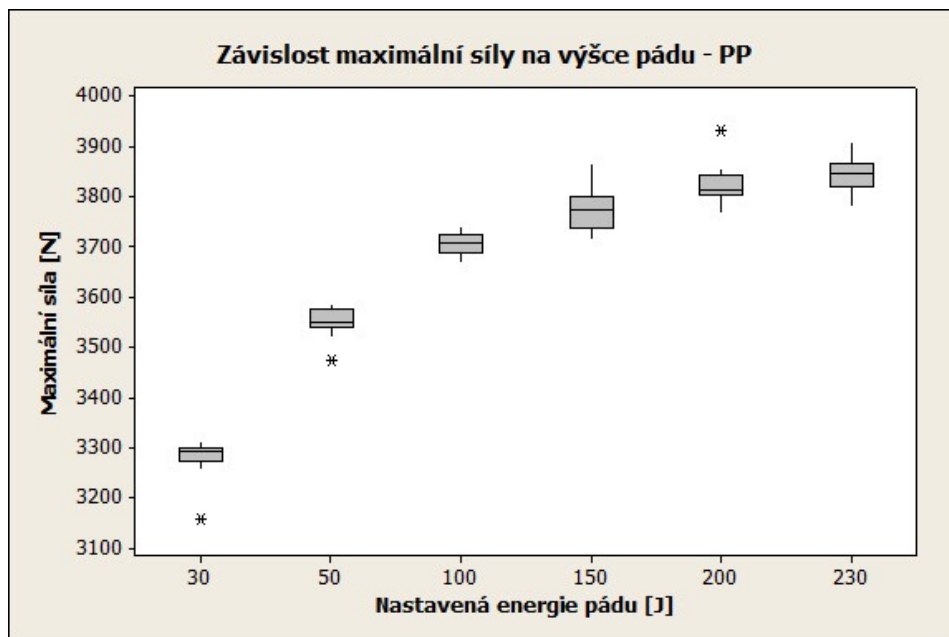
se energií pádu. To lze číselně vidět i prostřednictvím mediánu, popř. aritmetického průměru.



Obr. 34 Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PP, $n=15$

Tab. 22 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PP, $n=15$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	3282	3550	3708	3773	3828	3844
Chyba typu A	10	7	6	10	10	9
Směrodatná odchylka	37	29	22	40	38	35
Minimální hodnota	3159	3475	3670	3716	3769	3782
Medián	3294	3551	3710	3774	3814	3849
Maximální hodnota	3312	3586	3743	3866	3934	3910
Variační rozpětí	153	111	72	150	165	128

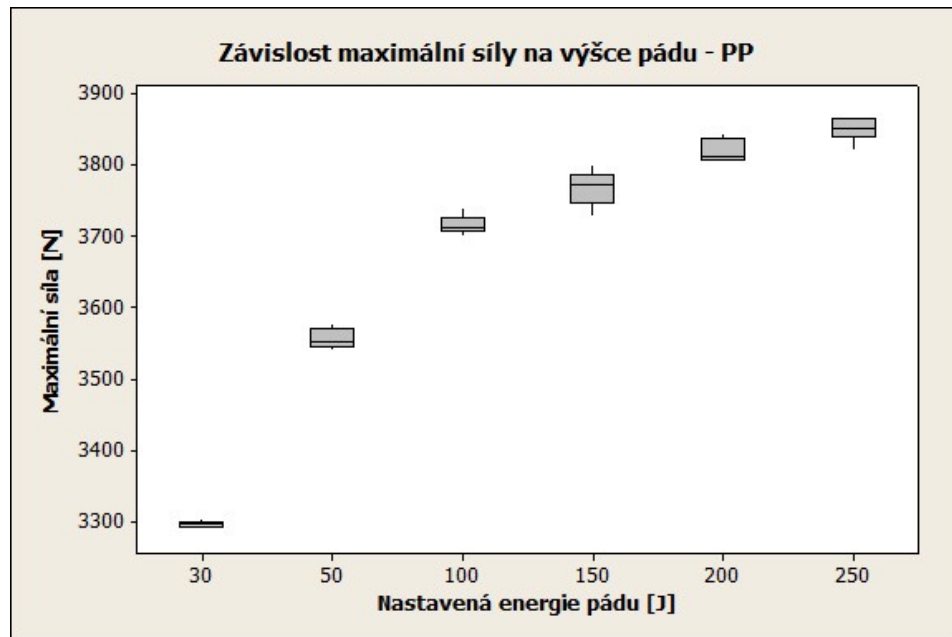


Obr. 35 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PP, $n=15$

Jak již u předchozích materiálů bylo vyřazeno pět vychýlených hodnot, tak se v tomto trendu pokračuje i u PP, který se jeví jako materiál vhodný pro tyto účely. V Tab. 23 jsou vypsány statistické charakteristiky pro výběrový statistický soubor s počtem měření 10.

Tab. 23 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PP, $n=10$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	3296	3556	3716	3768	3820	3850
Chyba typu A	1	4	4	8	5	5
Směrodatná odchylka	5	13	12	24	16	16
Minimální hodnota	3289	3540	3701	3728	3804	3822
Medián	3296	3553	3712	3773	3813	3851
Maximální hodnota	3304	3578	3739	3801	3844	3868
Variační rozpětí	14	38	38	73	40	47

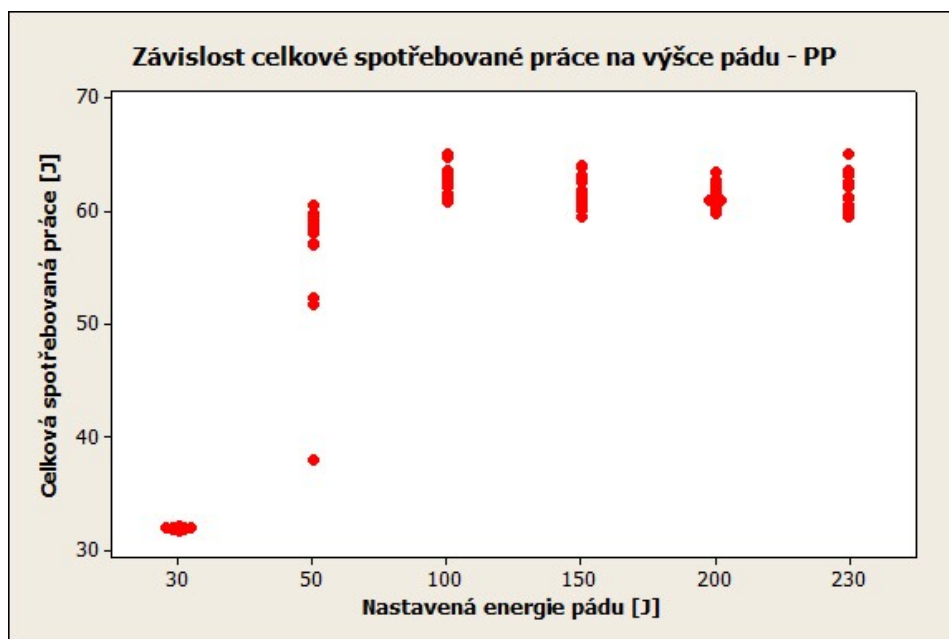


Obr. 36 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PP, $n=10$

Dále byl vytvořen krabicový graf (Obr. 36), který přehledněji znázorňuje statistické charakteristiky, zejména medián a variační rozpětí. Z grafu vyplývá, že optimální nastavenou energií pádu je 100 J. Při zkoušce nebylo použito mazivo, které by eliminovalo tření průchodem tlouku skrze deformující se materiál. Z tohoto důvodu je vhodnější vyšší energie, tlouk prochází materiálem při vyšší rychlosti, než u nižších energií.

8.4.2 Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu

Druhá veličina, která se získá pádovou zkouškou, je celková spotřebovaná práce, která je závislá na nastavené energii pádu. V individuálním bodovém grafu (Obr. 37), jsou všechny hodnoty celkové spotřebované práce vynaložené na deformaci a proražení zkušebního tělesa závislé na nastavené energii pádu, z výběrového souboru s 15 počty měření. Dle tabulky (Tab. 24) lze spatřit, že při nejnižší nastavené energii 30 J nedošlo k proražení zkušebních těles, variační rozpětí je nízké stejně tak jako hodnota mediánu u celkové spotřebované práce. Nicméně v trendu vyřazování vychýlených hodnot se pokračuje, zejména u nastavené energie 50 J bylo nalezeno několik vychýlených hodnot, v grafu zobrazených hvězdičkou. V tabulce (Tab. 25) jsou zobrazeny hodnoty u eliminovaného výběrového statistického souboru bez vychýlených hodnot, kterých bylo pět, stejně jako u vyhodnocování maximální síly.



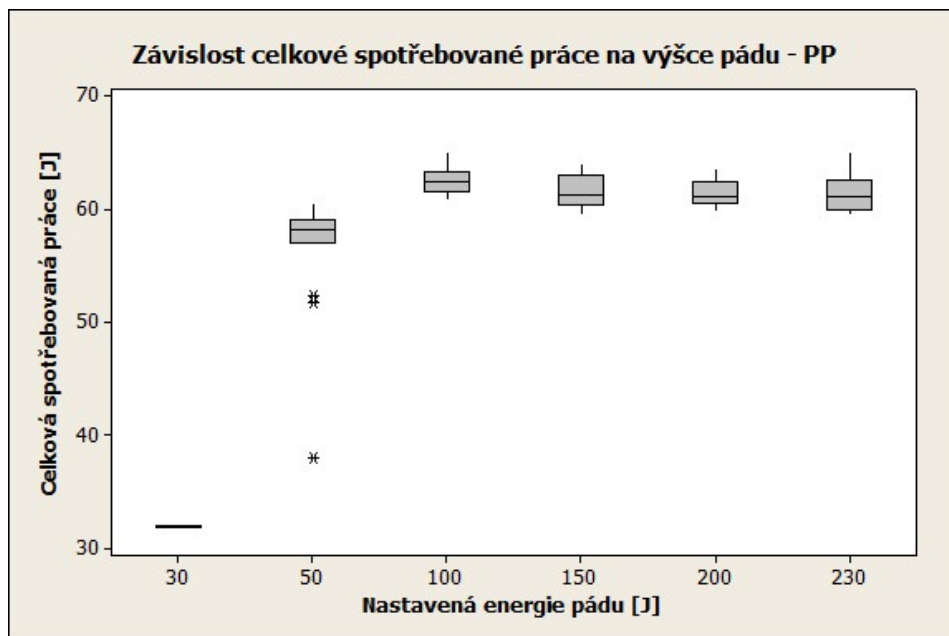
Obr. 37 Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PP, $n=15$

Tabulka (Tab. 24) zobrazuje statistické charakteristiky, které byly vypočteny z výběrového souboru, která má 15 počet měření. Variační rozpětí u nastavené energie pádu 30 J je malý, hodnoty celkové spotřebované práce potřebné k proražení zkušebního tělesa jsou si blízké, což lze vidět přehledně v individuálním bodovém grafu (Obr. 37).

Tab. 24 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PP, $n=15$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	31,9	56,3	62,7	61,7	61,4	61,5
Chyba typu A	0,0	1,5	0,3	0,4	0,3	0,4
Směrodatná odchylka	0,1	5,6	1,2	1,4	1,0	1,7
Minimální hodnota	31,7	37,9	60,9	59,6	59,8	59,5
Medián	31,9	58,3	62,5	61,4	61,2	61,2
Maximální hodnota	32,1	60,5	65,1	64,1	63,6	65,2
Variační rozpětí	0,4	22,6	4,2	4,5	3,7	5,7

V krabicovém grafu (Obr. 38), jsou hodnoty celkové spotřebované práce závislé na nastavených energiích pádu. Výběrový soubor obsahuje 15 měření. Vychýlené hodnoty jsou zde zobrazeny hvězdičkou a objevují se pouze u nastavené energie pádu 50 J.

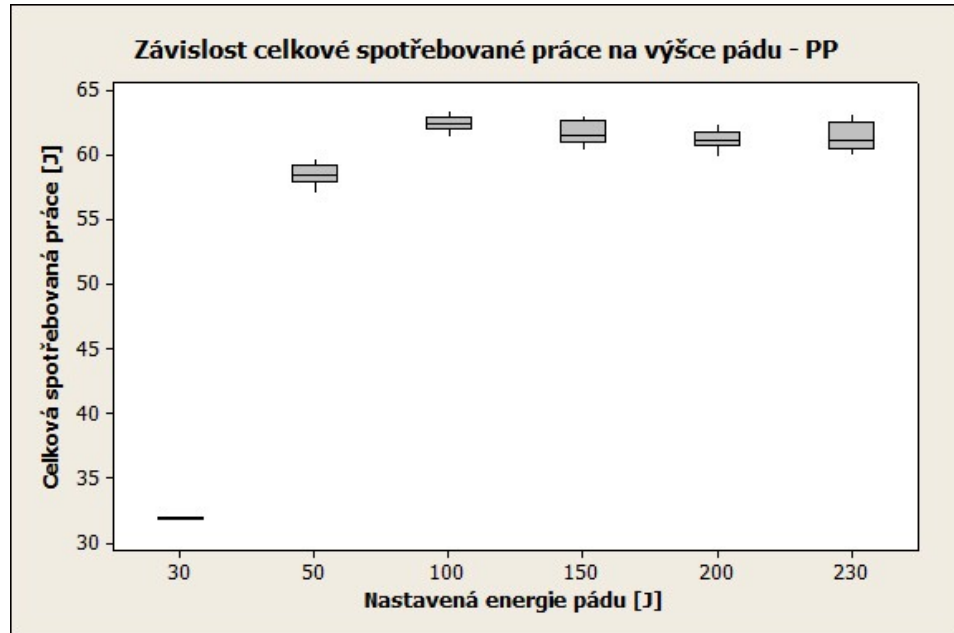


Obr. 38 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PP, $n=15$

Tab. 25 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PP, $n=10$

Nastavená energie pádu [J]	Statistické charakteristiky [N]					
	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	31,9	58,5	62,5	61,7	61,2	61,4
Chyba typu A	0,0	0,3	0,2	0,3	0,2	0,4
Směrodatná odchylka	0,1	0,9	0,6	0,9	0,8	1,1
Minimální hodnota	31,8	57,1	61,5	60,4	59,8	60,0
Medián	31,9	58,4	62,4	61,5	61,1	61,2
Maximální hodnota	32,0	59,8	63,4	63,1	62,4	63,2
Variační rozpětí	0,2	2,7	2,0	2,7	2,6	3,3

Pět chybných hodnot při nastavené energii pádu 50 J byly vyřazeny, stejně tak bylo učiněno u ostatních energií pádu, aby byl zajištěn vždy stejný počet měření ve výběrovém souboru. Následně byla sestavena tabulka se statistickými charakteristikami (Tab. 25).

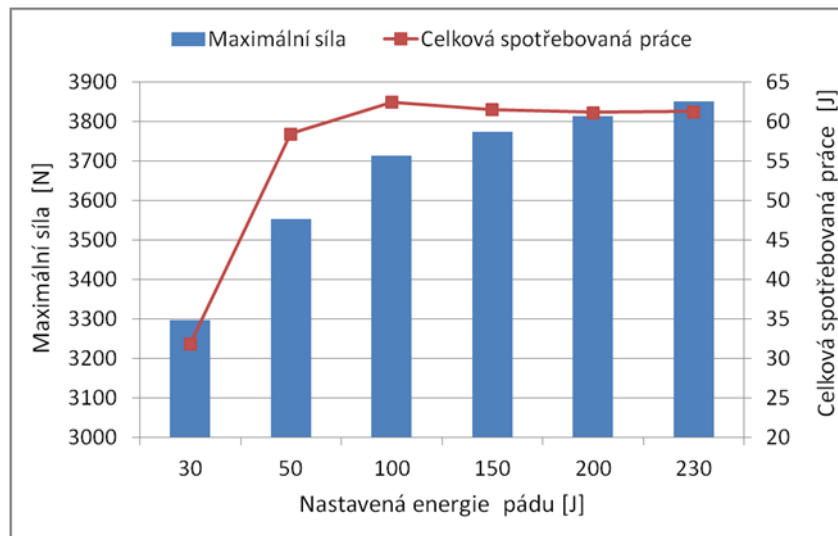


Obr. 39 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PP, $n=10$

Na obrázku (Obr. 39) je vyobrazen krabicový graf, který ukazuje, že optimální nastavenou energii z pohledu celkové spotřebované práce jsou hodnoty vyšší než 100 J.

8.4.3 Porovnání parametrů pádové zkoušky

Graf, který porovnává maximální sílu a celkovou spotřebovanou práci v závislosti na výšce pádu, je zobrazen na obrázku (Obr. 40). Hodnota maximální síly a celkové spotřebované práce jsou mediánem z jednotlivých výběrových souborů s počtem měření 10. Z grafu lze vyzorovat, že maximální síla od hodnoty energie 100 J narůstá minimálně, oproti tomu celková spotřebovaná práce je již téměř konstantní.



Obr. 40 Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – PP

8.5 Polypropylen plněný 30 % skelných vláken

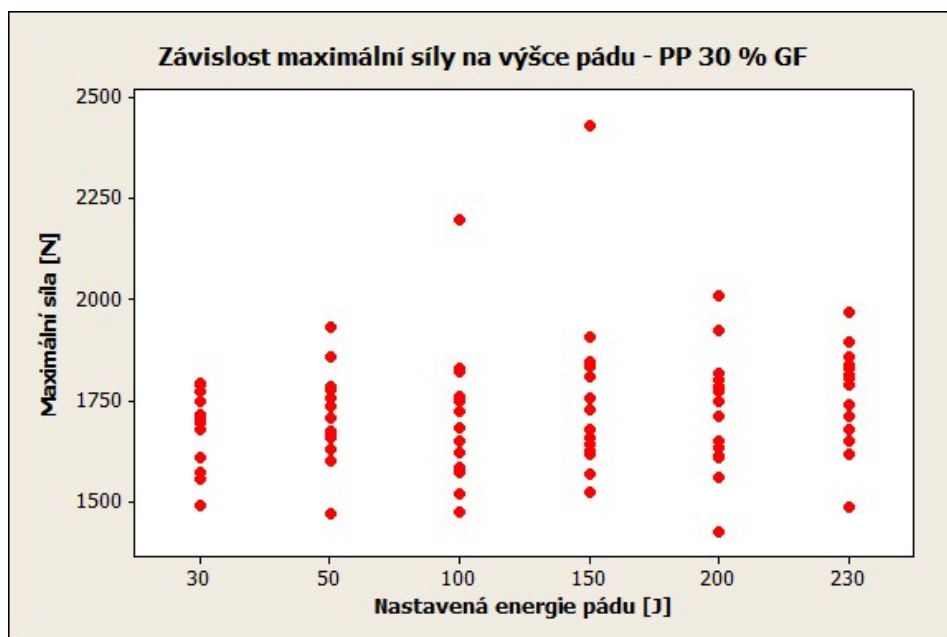
Pádová zkouška byla provedena i na materiálu polypropylen, který byl plněn 30 % skelných vláken. Zkušební tělesa byla měřena při energiích 30, 50, 100, 150, 200 a 230 J. Z pádové zkoušky se vyhodnocovaly dvě veličiny, kterými jsou maximální síla a celková spotřebovaná práce, které jsou závislé na nastavené energii pádu, resp. nastavené výšce pádu. V předchozí kapitole byl testován vliv nastavené energie pádu na materiál polypropylen, který se plasticky deformuje, až do dosažení kritické hodnoty, kde na obvodu tlouku vznikají mikrotrhliny, následně dochází k protržení. Obecně platí, že s rostoucím obsahem skelných vláken se stává z původně houževnatého materiál křehký. V této kapitole se hodnotí vliv výšky pádu na již zmiňované vlastnosti.

8.5.1 Závislost maximální síly na výšce pádu

Jak již v předchozích případech byla první statisticky vyhodnocovanou veličinou maximální síla vztažená k nastavené energii pádu, která byla vyhodnocována v programu Minitab.

Na obrázku (Obr. 41) jsou graficky zobrazeny naměřené hodnoty u jednotlivých energií. Z obrázku (Obr. 41) je patrné, že u nastavených energií 100 a 150 J jsou vychýlené hodnoty, které by negativně ovlivňovaly výsledné hodnocení. Na základě bodového grafu byl vytvořen krabicový graf, který je znázorněn na obrázku (Obr. 42). Při počtu měření 15

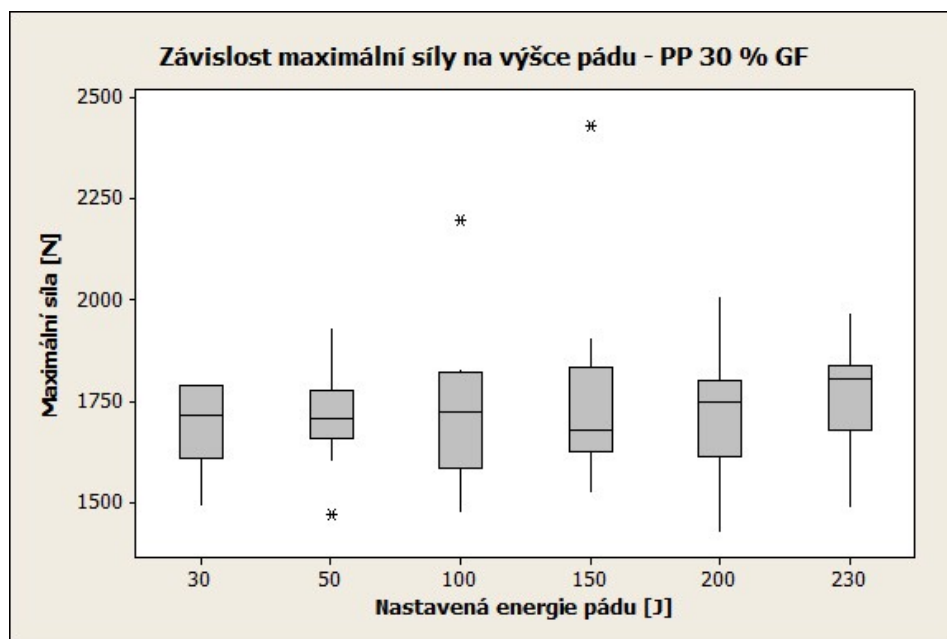
bylo zaznamenáno, že hodnoty mají široké variační rozpětí, což číselně ukazuje tabulka (Tab. 26).



Obr. 41 Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PP 30 % GF, $n=15$

Tab. 26 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PP 30 % GF, $n=15$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	1697	1712	1721	1752	1719	1766
Chyba typu A	26	28	46	56	38	32
Směrodatná odchylka	99	110	176	217	147	123
Minimální hodnota	1491	1468	1472	1520	1422	1485
Medián	1713	1705	1721	1679	1748	1803
Maximální hodnota	1792	1930	2198	2429	2008	1970
Variační rozpětí	302	461	726	910	586	484



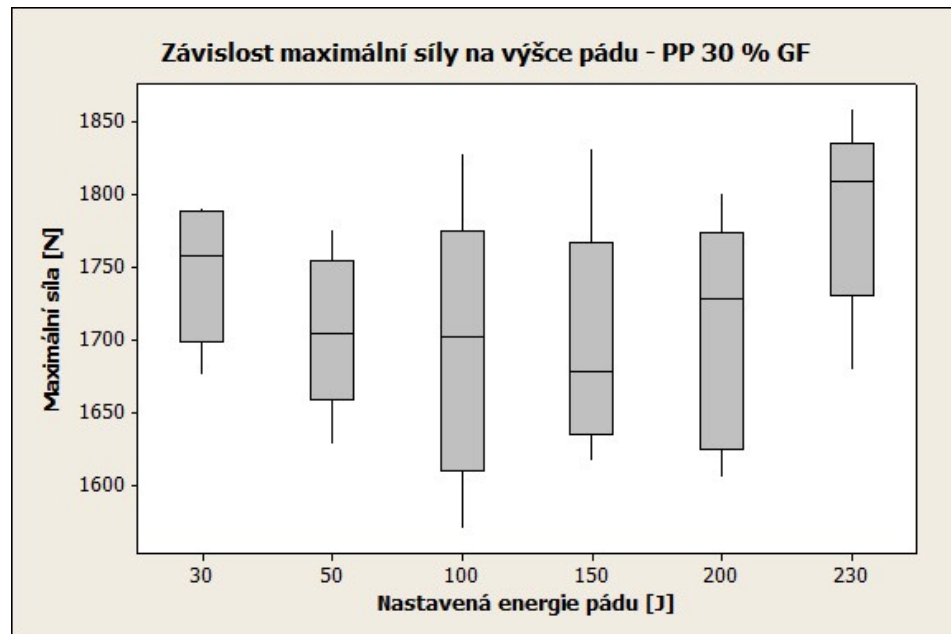
Obr. 42 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu –
PP 30 % GF, $n=15$

Tab. 27 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu –
PP 30 % GF, $n=10$

Nastavená energie pádu [J]	Nastavená energie pádu [J]					
	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	1744	1704	1698	1701	1705	1789
Chyba typu A	14	16	29	24	24	19
Směrodatná odchylka	44	50	93	75	75	60
Minimální hodnota	1676	1629	1571	1617	1606	1679
Medián	1758	1704	1702	1678	1728	1808
Maximální hodnota	1790	1776	1828	1831	1800	1858
Variační rozpětí	115	147	257	214	194	179

Na základě pečlivého statistického vyhodnocení a zkoumání grafických záznamů z padostroje byly vyřazeny vychýlené hodnoty. V tabulce (Tab. 27) jsou zaznamenány statistické charakteristiky pro výběrový statistický soubor s počtem měření 10. Z měření je patrné, že maximální síla se s rostoucí nastavenou energií pádu mění jen minimálně, nicméně při maximální použité energii pádu (230 J) došlo k nárůstu maximální síly

o 100 N vůči ostatním použitým energiím. Tato skutečnost je zachycena v krabicovém grafu na obrázku (Obr. 43), který názorně ukazuje, že optimální nastavená energie pádu by mohla být 50 J.



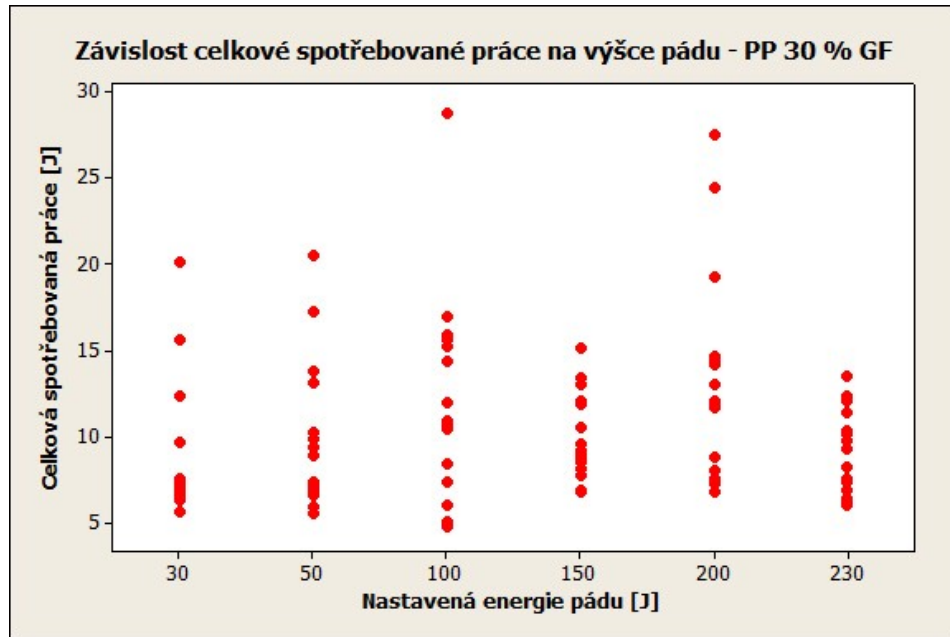
Obr. 43 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu –
PP 30 % GF, $n=10$

8.5.2 Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu

Druhou statisticky vyhodnocovanou veličinou byla celková spotřebovaná práce v závislosti na nastavené energii pádu.

Z obrázku (Obr. 44), na kterém je vyobrazen individuální bodový graf, je vidět určitá nehomogenita v materiálu, která je způsobena orientací skelných vláken při vstřikování. Široké variační rozpětí a poměrně velká chyba může ukazovat na nestejnorodé uspořádání skelných vláken v materiálu.

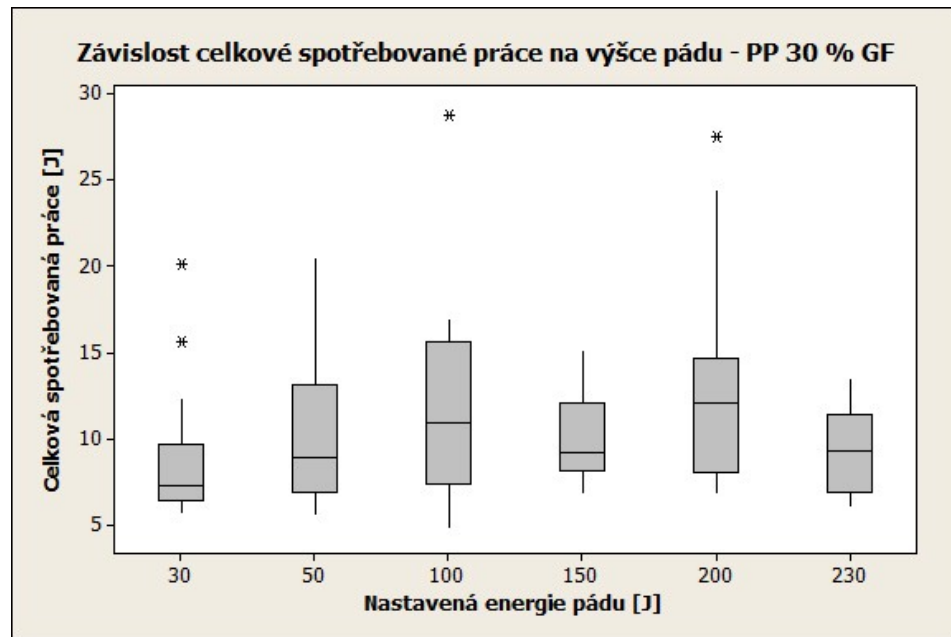
V tabulce (Tab. 28) jsou uvedeny hodnoty průměru, mediánu, směrodatné odchylky a dalších statistických charakteristik pro statistický výběrový soubor s počtem měření 15. Pro lepší názornost byl vytvořen krabicový graf, který je znázorněn na obrázku (Obr. 45). Slouží k bližší identifikaci vychýlených hodnot, které byly následně po precizním vyhodnocení vyloučeny z výběrového statistického souboru. Vybrané hodnoty ze statistického vyhodnocení, které se jevily, jako vychýlené hodnoty byly vyřazeny na základě zkoumání grafických záznamů z instrumentované zkoušky pádem.



Obr. 44 Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu – PP 30 % GF, $n=15$

Tab. 28 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu – PP 30 % GF, $n=15$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	8,8	10,0	12,2	10,0	13,4	9,2
Chyba typu A	1,1	1,1	1,6	0,7	1,6	0,6
Směrodatná odchylka	4,1	4,4	6,1	2,5	6,2	2,5
Minimální hodnota	5,6	5,5	4,8	6,8	6,8	6,0
Medián	7,3	8,9	10,9	9,2	12,1	9,3
Maximální hodnota	20,2	20,5	28,8	15,1	27,6	13,5
Variační rozpětí	14,5	14,9	24,0	8,4	20,8	7,6

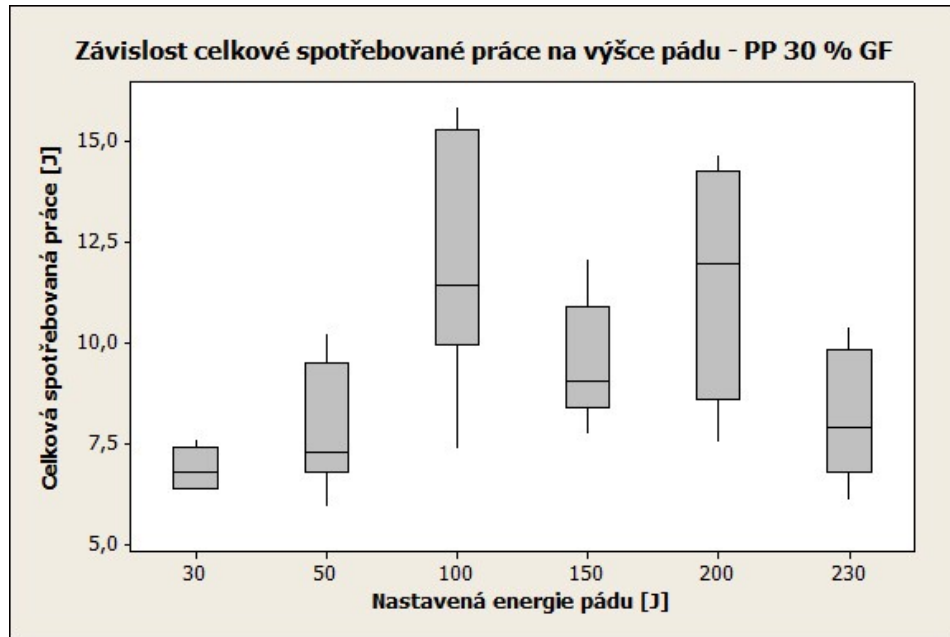


Obr. 45 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu – PP 30 % GF, $n=15$

V tabulce (Tab. 29) jsou vyhodnoceny statistické charakteristiky pro celkovou spotřebovanou práci v závislosti na nastavené výšce pádu, kde výběrový statistický soubor byl redukován o vychýlené hodnoty. Následně byl vytvořen krabicový graf pro výběrový statistický soubor s počtem měření 10, který je vyobrazen na obrázku (Obr. 46). Z grafu vyplývá, že optimální nastavenou energií pádu z pohledu celkové spotřebované práce by mohla být z hlediska nejmenšího variačního rozpětí hodnota energie 30 J.

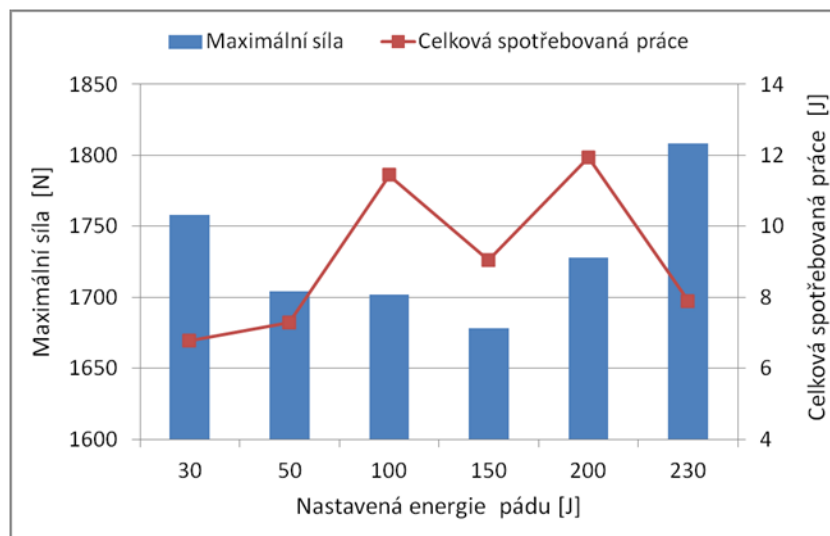
Tab. 29 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu – PP 30 % GF, $n=10$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
	Statistické charakteristiky [N]					
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	6,9	7,9	12,1	9,5	11,6	8,2
Chyba typu A	0,2	0,5	1,0	0,5	0,8	0,5
Směrodatná odchylka	0,5	1,5	3,0	1,5	2,7	1,6
Minimální hodnota	6,3	5,9	7,4	7,7	7,5	6,1
Medián	6,8	7,3	11,4	9,0	11,9	7,9
Maximální hodnota	7,6	10,2	15,9	12,1	14,6	10,4
Variační rozpětí	1,3	4,3	8,5	4,4	7,1	4,3



Obr. 46 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu – PP 30 % GF, $n=10$

8.5.3 Porovnání parametrů pádové zkoušky



Obr. 47 Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – PP 30 % GF

Na obrázku (Obr. 47) je zobrazen porovnávací graf, který popisuje potřebnou maximální sílu a celkovou spotřebovanou práci vynaloženou na proražení zkušební tělesa při šesti nastavených energiích pádu. Maximální síla a celková spotřebovaná práce jsou v porovnávacím grafu mediánem výběrových souborů s počtem měření 10. Z výsledku je

možno určit optimální nastavenou energii pádu 50 J z pohledu obou vyhodnocovaných veličin.

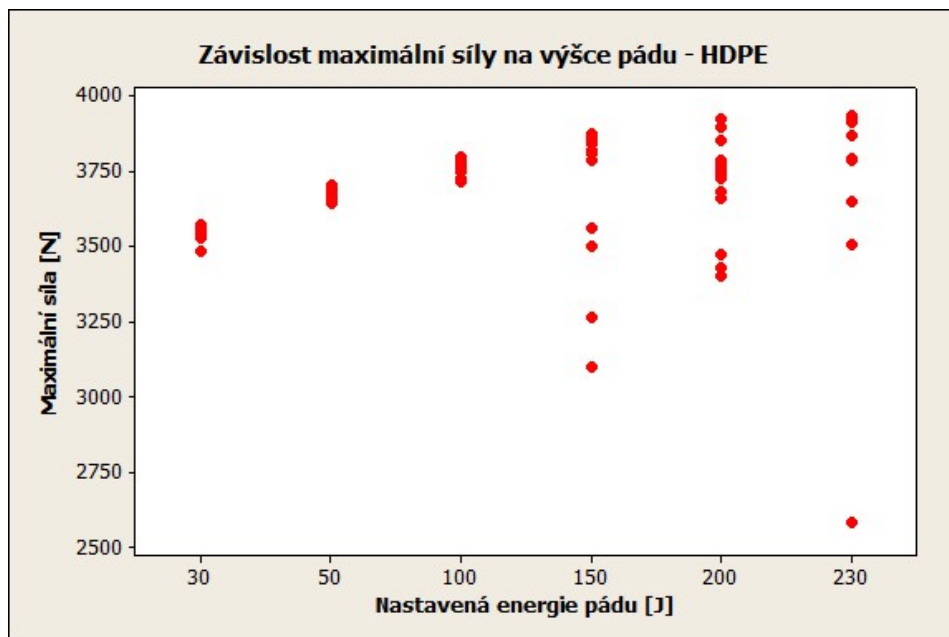
8.6 Vysoko-hustotní polyetylen

Posledním zkoušeným materiálem byl vysoko-hustotní polyetylen, který se řadí do kategorie spotřebních polymerních materiálů (standardních plastů). Polyetyleny jsou nejvíce využívané polymery, co se týče objemu produkce. Mají výbornou chemickou a zejména rázovou odolnost i při nízkých teplotách (hluboko pod bodem mrazu), vynikají svou vysokou houževnatostí a odolností k šíření napětí za studena. Největší nevýhodou je nízká teplotní odolnost, která se může zvýšit pomocí modifikací, např. radiačním síťováním (stejným způsobem se upravují vlastnosti i u ostatních polymerů: PA, PP atd.). Nicméně modifikace polymeru může způsobit zhoršení rázových vlastností.

Zkušební tělesa z vysoko-hustotního polyetylenu byla zkoušena na padostroji při šesti energiích pádu (30, 50, 100, 150, 200 a 230 J). Energie byla nastavována v programu TestXpert II propojeným s padostrojem, která představuje výšku padajícího tlouku se závažím. Pádová zkouška byla provedena na 15 zkušebních tělesech pro každou energii pádu.

8.6.1 Závislost maximální síly na výšce pádu

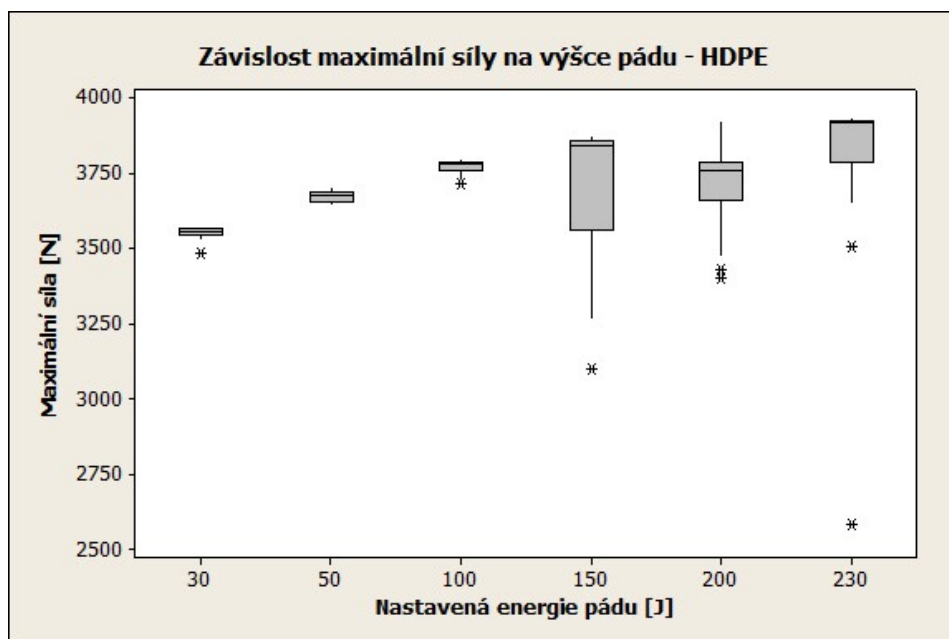
Maximální síla je veličina získaná z pádové zkoušky, statisticky vyhodnocována v závislosti na nastavené energii pádu. Při nejnižší nastavené energii pádu 30 J nedošlo k proražení materiálu, což se projevilo sníženou maximální silou, znázorněno v individuálním bodovém grafu na obrázku (Obr. 48). Z naměřených hodnot byla vytvořena tabulka (Tab. 30), ve které jsou vypsány vyhodnocené statistické charakteristiky pro výběrový statistický soubor s počtem měření 15. Dále byl vytvořen krabicový graf (Obr. 49), ze kterého lze určit vychýlené hodnoty, které jsou znázorněny hvězdičkou. Vychýlené hodnoty byly zaznamenány zejména u vyšších energií (150, 200 a 230 J). Na základě jednotnosti vyhodnocení výsledků maximální síly byly vyřazeny vychýlené hodnoty u všech pozitivních energií pádu. Po statistickém vyhodnocení a studiu grafických záznamů požiténých z instrumentované zkoušky pádem byl výběrový statistický soubor redukován na počet měření 10 pro každou nastavenou výšku pádu.



Obr. 48 Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – HDPE, $n=15$

Tab. 30 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – HDPE, $n=15$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	3549	3673	3772	3713	3711	3765
Chyba typu A	6	4	7	64	41	91
Směrodatná odchylka	22	17	25	246	160	350
Minimální hodnota	3482	3645	3715	3097	3402	2581
Medián	3552	3675	3783	3842	3759	3917
Maximální hodnota	3571	3706	3797	3876	3923	3931
Variační rozpětí	89	60	82	778	521	1350

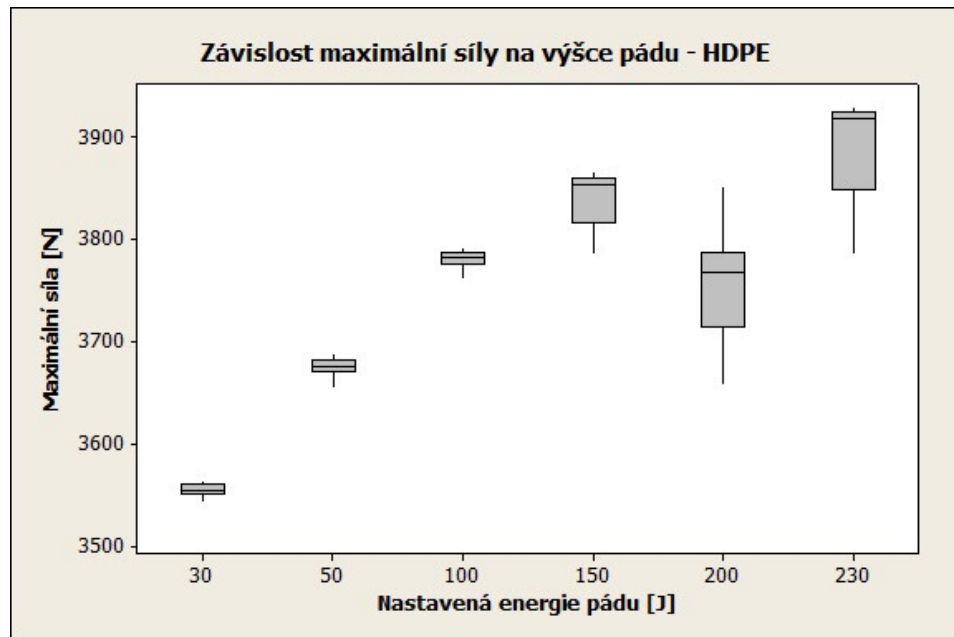


Obr. 49 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – HDPE, $n=15$

Vyhodnocené statistické charakteristiky pro výběrový statistický soubor s počtem měření 10 jsou zobrazeny v tabulce (Tab. 31). Grafické zobrazení statistických charakteristik je znázorněn v krabicovém grafu (Obr. 50). Z měření maximální síly nelze vypočítat optimální energii pádu, nicméně hodnota by se mohla pohybovat mezi 50 a 100 J. Pro přesné určení počáteční energie pádu by bylo vhodné rozšířit výběrový statistický soubor a potvrdit toto zjištění.

Tab. 31 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – HDPE, $n=10$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	3554	3675	3780	3840	3754	3890
Chyba typu A	2	3	3	9	18	18
Směrodatná odchylka	7	9	10	27	56	55
Minimální hodnota	3543	3655	3761	3786	3657	3786
Medián	3553	3675	3783	3853	3767	3918
Maximální hodnota	3564	3688	3792	3866	3851	3929
Variační rozpětí	21	33	32	80	194	143



Obr. 50 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – HDPE, $n=10$

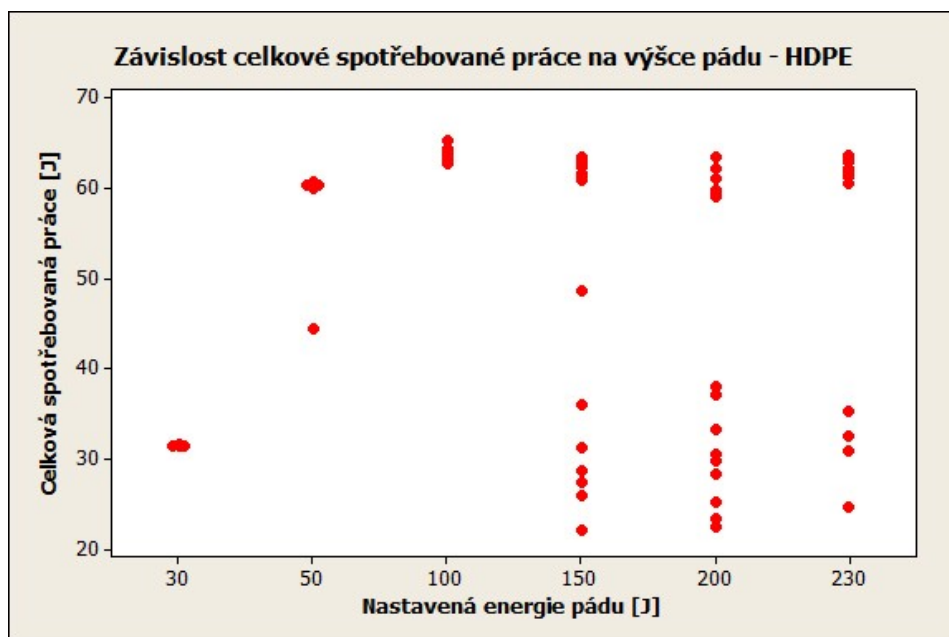
8.6.2 Závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu

Celková spotřebovaná práce je veličina, která se statisticky vyhodnocovala v individuálním bodovém grafu, krabicovém grafu a dále byla sestavena tabulka s číselnými charakteristikami. V grafech i tabulce se vyskytuje závislost celkové spotřebované práce na výšce pádu.

Na obrázku (Obr. 51) je znázorněn individuální bodový graf, ze kterého lze pozorovat obdobný trend jako u vyhodnocení maximální síly, pro stejný materiál (popsáno v předchozí kapitole). Číselně (v Tab. 32) a graficky z krabicového grafu (Obr. 52) je patrné, že variační rozpětí u nastavených energií 150, 200 a 230 J je velmi široké. A proto z pohledu celkové spotřebované práce, tyto nastavené energie nejsou vhodné pro měření tohoto materiálu. Na základě krabicového grafu (Obr. 52) a vyhodnocení záznamů z instrumentovaného měření byly vyřazeny vychýlené hodnoty celkové spotřebované práce.

V tabulce (Tab. 33) jsou vyhodnoceny statistické charakteristiky u celkové spotřebované práce v závislosti na nastavené energii pádu pro výběrový statistický soubor s počtem měření 10. Dále byl zpracován krabicový graf, který je zobrazen na obrázku (Obr. 53). Z grafu vyplývá, že optimální energií pádu by mohla být hodnota 100 J. Zdá se, že u této nastavené energie nedochází k tak velkému úbytku rychlosti jako u energie 50 J, kdy může docházet k většímu tření mezi tloučkem a materiálem, při průchodu skrz materiál. Vliv tření

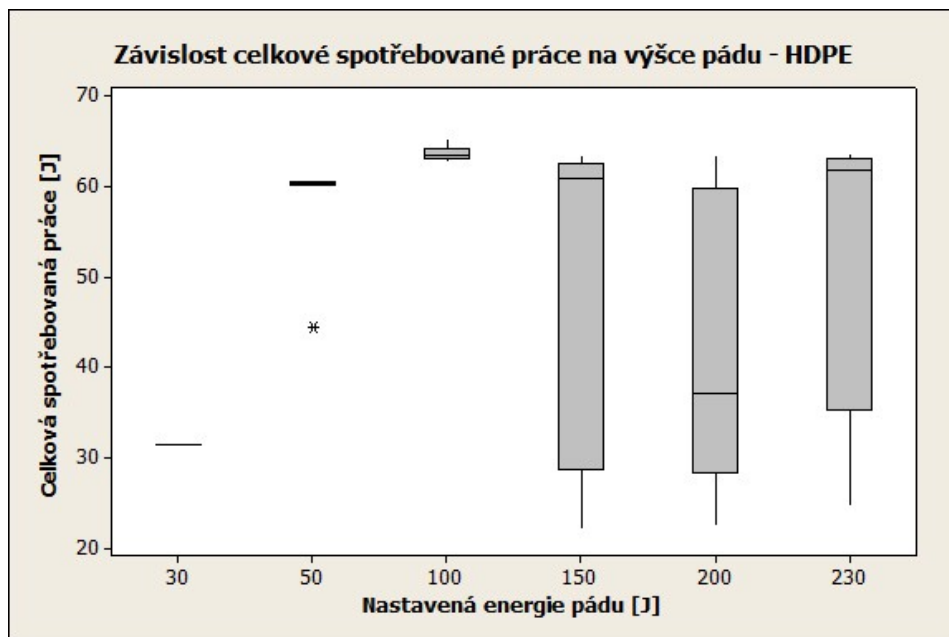
mezi procházejícím tloučkem a materiálem může být eliminováno mazáním tloučku vazelínou.



Obr. 51 Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - HDPE, $n=15$

Tab. 32 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - HDPE, $n=15$

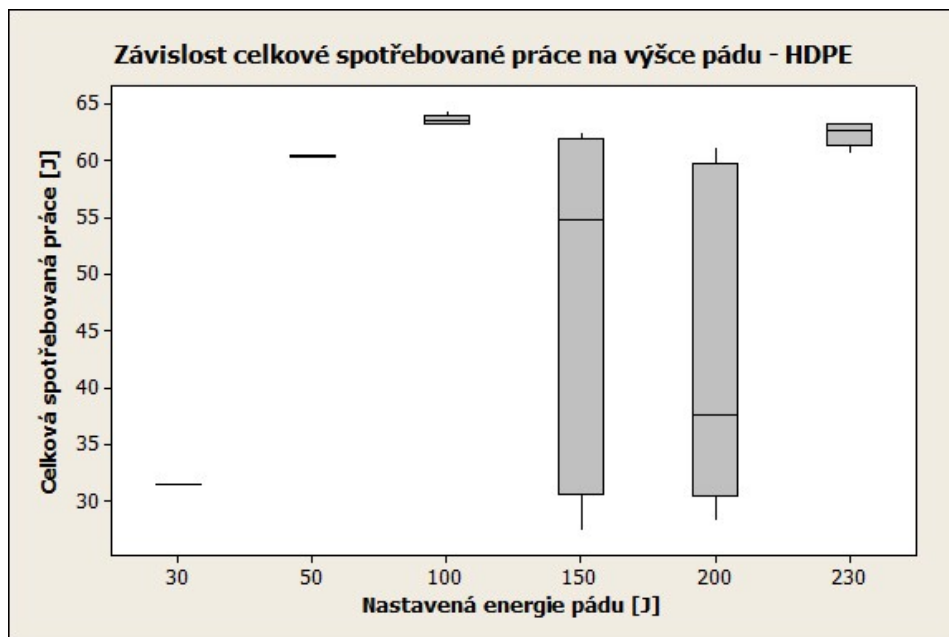
Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	15	15	15	15	15	15
Aritmetický průměr	31,4	59,4	63,6	47,9	42,3	54,0
Chyba typu A	0,0	1,1	0,2	4,4	4,2	3,8
Směrodatná odchylka	0,0	4,1	0,7	17,0	16,4	14,7
Minimální hodnota	31,4	44,5	62,8	22,0	22,4	24,6
Medián	31,4	60,4	63,5	60,9	37,2	61,9
Maximální hodnota	31,5	60,7	65,3	63,6	63,5	63,6
Variační rozpětí	0,2	16,2	2,5	41,6	41,1	39,1



Obr. 52 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - HDPE, $n=15$

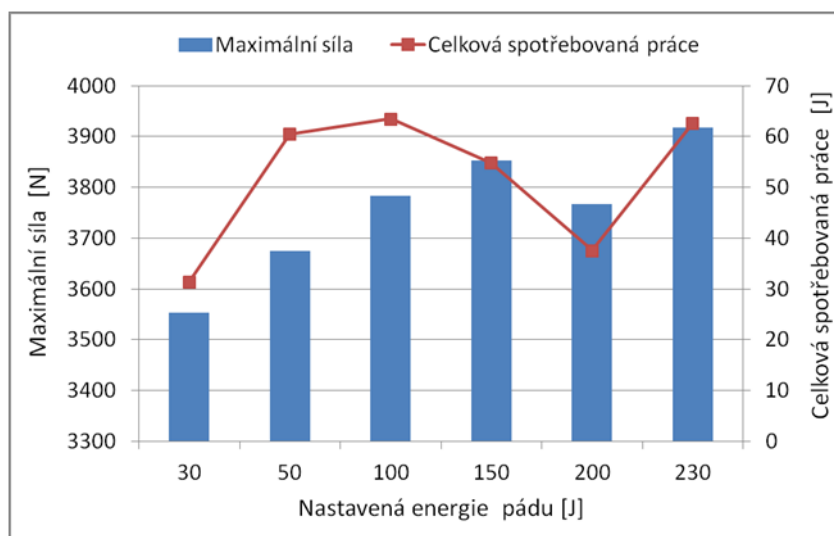
Tab. 33 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - HDPE, $n=10$

Nastavená energie pádu [J]	30 J	50 J	100 J	150 J	200 J	230 J
Statistické charakteristiky [N]						
Počet měření	10	10	10	10	10	10
Aritmetický průměr	31,4	60,4	63,6	48,1	43,7	62,3
Chyba typu A	0,0	0,0	0,1	4,9	4,5	0,3
Směrodatná odchylka	0,0	0,1	0,4	15,6	14,3	1,0
Minimální hodnota	31,4	60,3	63,2	27,4	28,3	60,6
Medián	31,4	60,5	63,5	54,8	37,6	62,6
Maximální hodnota	31,5	60,7	64,4	62,6	61,2	63,4
Variační rozpětí	0,1	0,4	1,2	35,2	32,9	2,9



Obr. 53 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - HDPE, $n=10$

8.6.3 Porovnání parametrů pádové zkoušky



Obr. 54 Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – HDPE

Porovnávací graf na obrázku (Obr. 54) zobrazuje potřebnou maximální sílu a celkovou spotřebovanou práci, vynaloženou na proražení zkušebního tělesa z vysoko-hustotního polyetylénu, závislou na šesti nastavených energiích pádu. Maximální síla a celková spotřebovaná práce na proražení zkušebního tělesa jsou v grafu mediánem z výběrového souboru po vyřazení chybných hodnot. Optimální hodnotou energie by mohla být hodnota

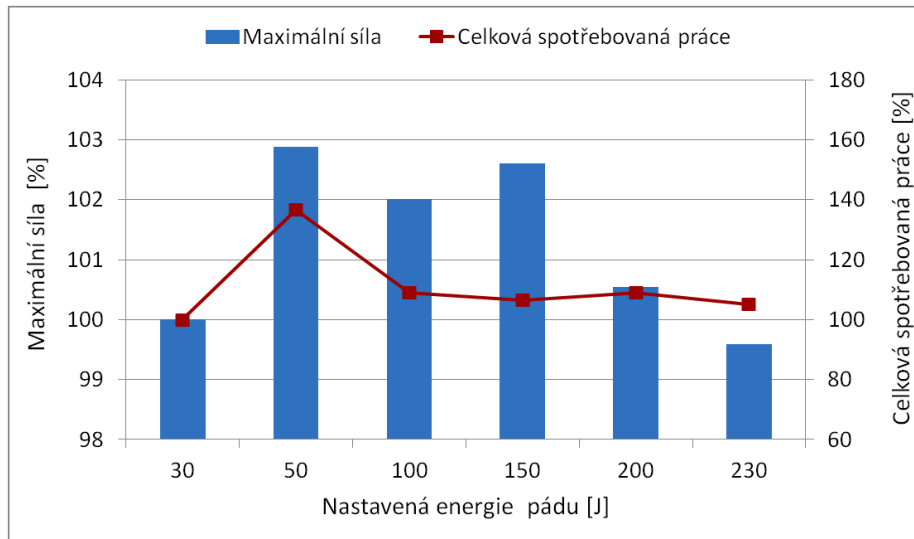
100 J, nicméně tuto hodnotu by bylo vhodné potvrdit rozšířením výběrového statistického souboru a dalším měřením s mazáním tlouku, aby bylo eliminováno tření mezi procházejícím tloukem a materiálem, který se plasticky deformuje, až dojde k protržení s následným třením mezi tloukem a stěnou testovaného materiálu.

9 DISKUZE

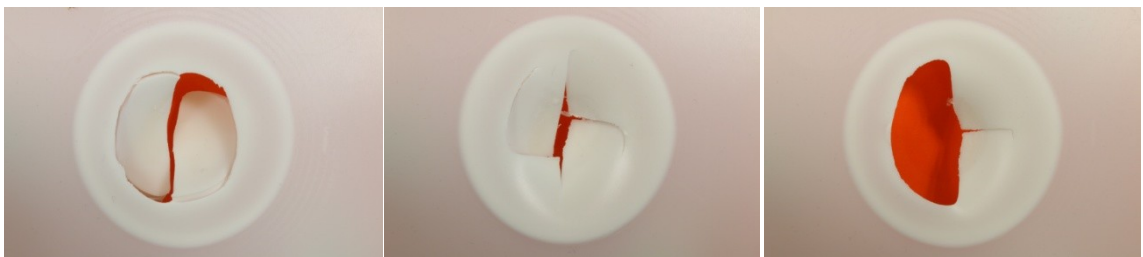
Pro diskuzi získaných výsledků, které byly v předchozí kapitole statisticky vyhodnoceny, byl zvolen medián. Medián byl vybrán z důvodu menší náchylnosti na nesourodost získaných výsledků z pádové zkoušky. Vyhodnocení vychází z Gaussova normálního rozdělení. U vybraných šesti materiálů byla vyhodnocována maximální síla a celková spotřebovaná práce v závislosti na výšce pádu, přepočítanou na energii pádu, která se nastavovala v programu TestExper II, který ovládal zkušební zařízení a zajišťoval sběr dat s primárním vyhodnocením. Samotné statistické vyhodnocení probíhalo v programu Minitab, který je speciálně určený pro statistické vyhodnocení zejména v technické praxi. Vyniká svou jednoduchostí, rychlostí a přehledností získaných výsledků. Na závěr byl využit program MS Excel, ve kterém byly zpracovány hodnoty mediánu maximální síly a celkové spotřebované práce do přehledných barevných grafů s procentuální změnou vztaženou vždy k první hodnotě v grafu, kterou byla zvolena nastavená energie pádu 30 J (100 % na svislé ose).

Z obrázku (Obr. 55) je patrné, že změna maximální síly v závislosti na nastavené energii pádu je minimální, pohybuje se v rámci 3 %. Nicméně, celková spotřebovaná práce se mění v závislosti na nastavené výšce značně v závislosti na aktuální deformaci materiálu. Největší změna se objevila u hodnoty energie pádu 50 J, kde hodnota celkové spotřebované práce vzrostla o 38 % vůči základní nastavené energii pádu 30 J. Ostatní hodnoty se pohybují v rozmezí 10 %. Na základě vyhodnocení naměřených dat se jeví jako optimální nastavená energie pádu 100 J pro houževnatý polystyren.

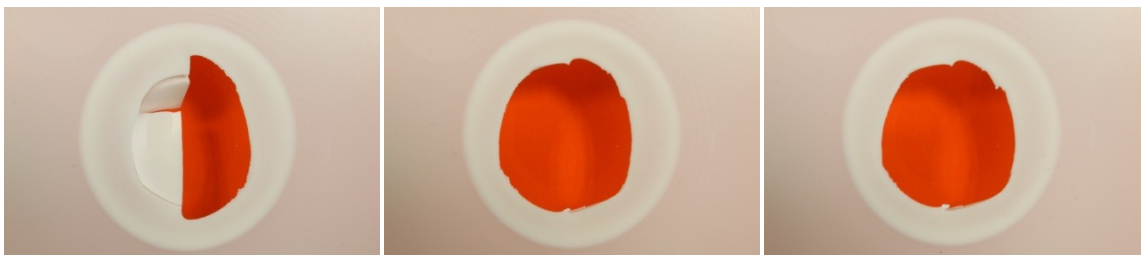
U materiálu PS došlo k proražení všech zkušebních těles, jak je zobrazeno na obrázcích (Obr. 56 a Obr. 57). Průchodem tlouku skrz materiál vzniká hlavní trhlina, která postupuje materiálem, v některých případech vzniká na ni trhlina kolmá, následně dochází buď k částečnému zlomení, anebo úplnému vylomení materiálu, na který působil tlouk. Na postupu šíření trhliny či trhlín závisí hodnota celkové spotřebované práce.



Obr. 55 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J - PS



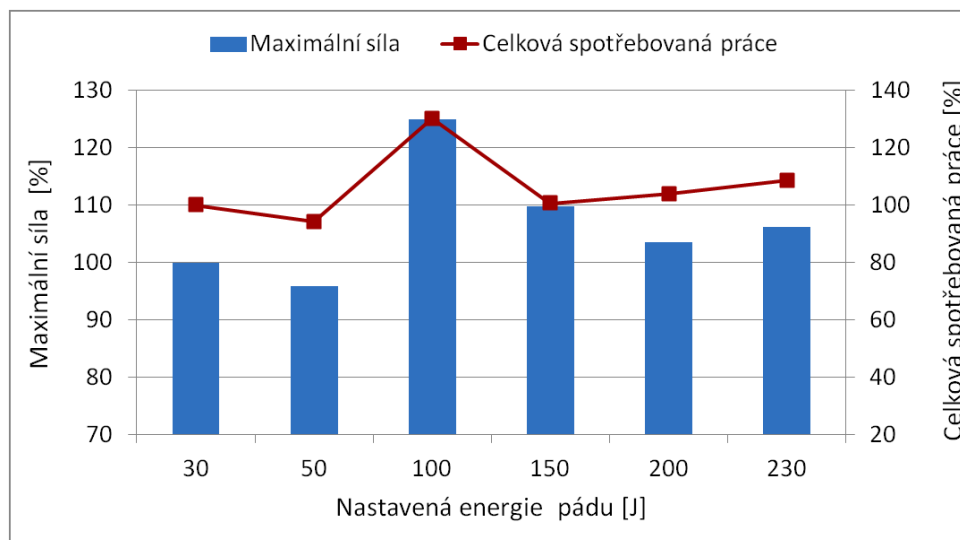
Obr. 56 Deformace zkušebního tělesa z PS po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J



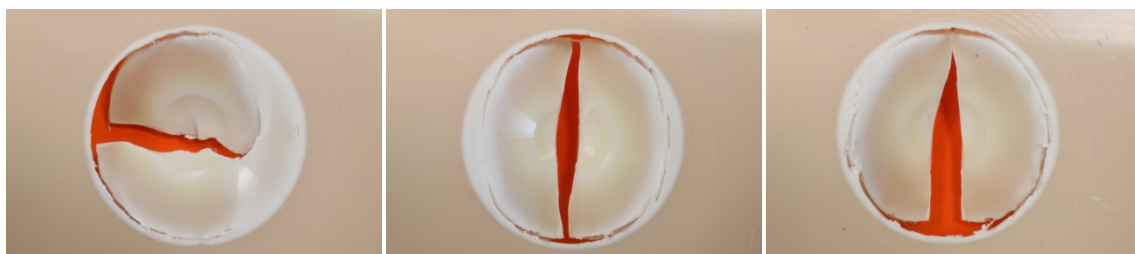
Obr. 57 Deformace zkušebního tělesa z PS po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J

Z obrázku (Obr. 58) je patrné, že změna maximální síly v závislosti na nastavené energii pádu je v rozsahu 10 % mimo hodnotu nastavené energie 100 J, která je větší o 25 % vůči základní nastavené energii 30 J. Obdobné chování bylo zaznamenáno i u celkové spotřebované práce v závislosti na výšce pádu. Na základě vyhodnocení naměřených dat se jeví jako optimální nastavená energie pádu 30 J pro ABS.

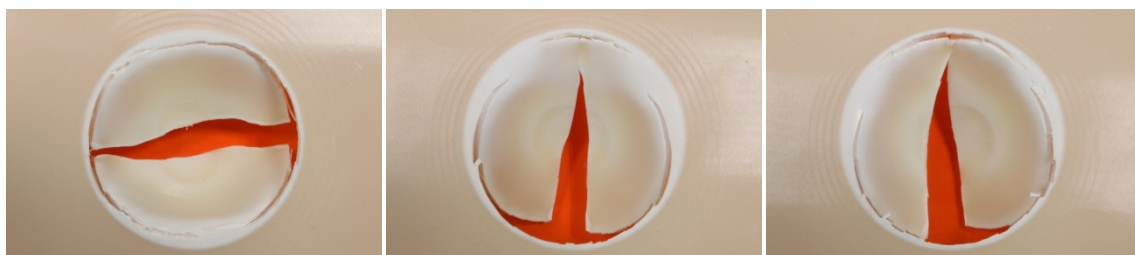
U materiálu ABS došlo k proražení všech zkušebních těles, jak je zobrazeno na obrázcích (Obr. 59 a Obr. 60). Průchodem tlouku skrz materiál vzniká hlavní trhlina uprostřed, která postupuje materiálem, až dorazí k okraji přídržného kroužku, na kterém se zastaví a pokračuje po obvodu, než dojde k průchodu tlouku skrz celý materiál. Na postupu šíření trhliny závisí hodnota celkové spotřebované práce.



Obr. 58 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J - ABS



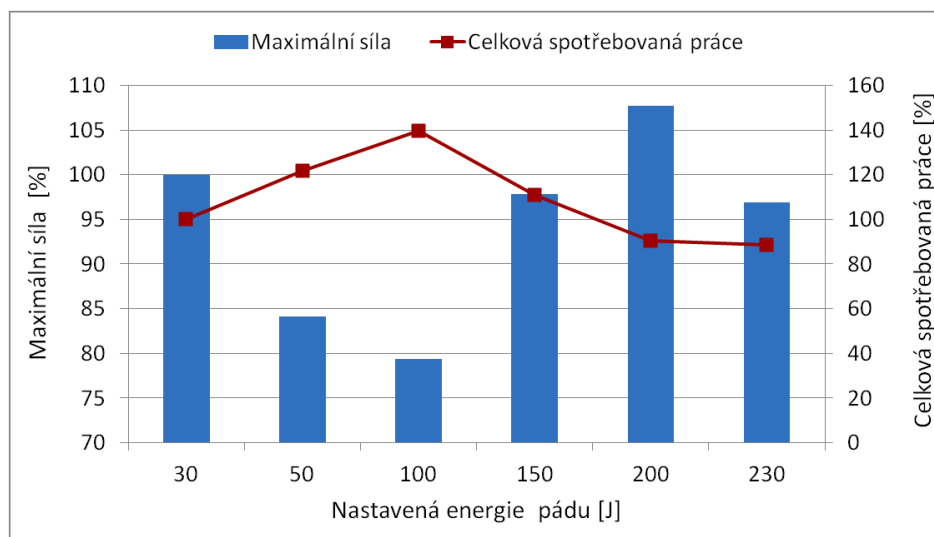
Obr. 59 Deformace zkušebního tělesa z ABS po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J



Obr. 60 Deformace zkušebního tělesa z ABS po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J

Z obrázku (Obr. 61) je patrné, že změna maximální síly v závislosti na nastavené energii pádu je v rozsahu 10 % mimo hodnoty nastavené energie 50 a 100 J, které jsou nižší až o 20 % vůči základní nastavené energii 30 J. U celkové spotřebované práce bylo zaznamenáno nárůstu až do hodnoty 100 J, následně se projevil pokles se zvyšující se energií do 200 J, další zvyšování nevedlo ke změně celkové spotřebované práce. Na základě vyhodnocení naměřených dat se jeví jako optimální nastavená energie pádu 30 J pro SAN.

U materiálu SAN došlo k proražení všech zkušebních těles, jak je zobrazeno na obrázcích (Obr. 62 a Obr. 63). Materiál SAN je křehkým materiálem, který se nehodí pro rázové zatížení, po překročení maximální síly, při nízké deformaci dochází k postupu trhlin od středu ke kraji a následnému roztříštění celého povrchu pod plochou tlouku na drobné úlomky s ostrými hranami. Křehké materiály jsou velmi náchylné na vnitřní nedokonalosti, které se při rázovém zatížení projevují nárůstem chyby měření.



Obr. 61 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J - SAN



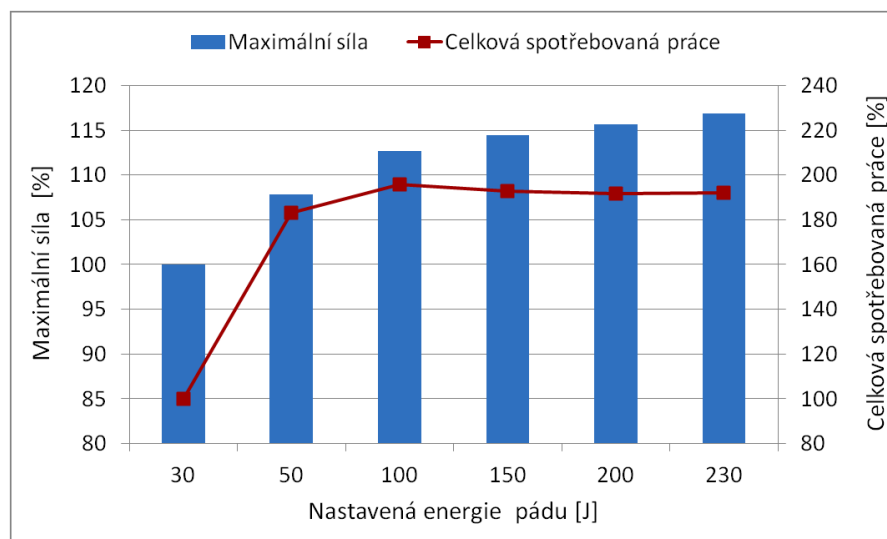
Obr. 62 Deformace zkušebního tělesa ze SAN po pádové zkoušce při energiích pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J



Obr. 63 Deformace zkušebního tělesa ze SAN po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J

Z obrázku (Obr. 64) je patrné, že změna maximální síly a celkové spotřebované práce v závislosti na nastavené energii pádu je v rozsahu 5 % mimo hodnoty nastavené energie 30 a 50 J. U hodnoty 30 J nedošlo k proražení a u hodnoty 50 J mohlo dojít vlivem nižší rychlosti dopadu k tření mezi tloučkem a materiálem a tím ovlivnění zkoumaných veličin. Tato skutečnost by se mohla eliminovat použitím maziva. Na základě vyhodnocení naměřených dat se jeví jako optimální nastavená energie pádu 100 J pro polypropylen.

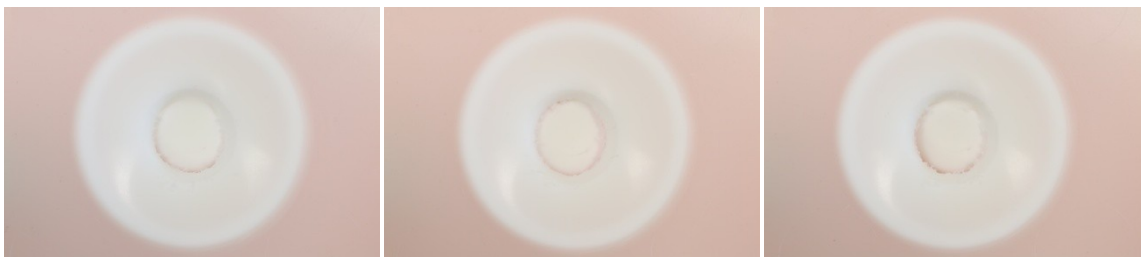
U materiálu PP nedošlo k proražení zkušebních těles energií 30 J, došlo pouze k plastické deformaci. U nastavených energií pádu s vyšší hodnotou došlo k proražení všech zkušebních těles, jak je zobrazeno na obrázcích (Obr. 65 a Obr. 66). Materiál průchodem tlouku se protahuje (plasticky deformuje) do hodnoty, kdy napětí na obvodu, kde působí tlouk, dojde k maximální koncentraci napětí, začnou se tvořit mikrotrhliny s následnou trhlinou skrz celý materiál.



Obr. 64 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J - PP



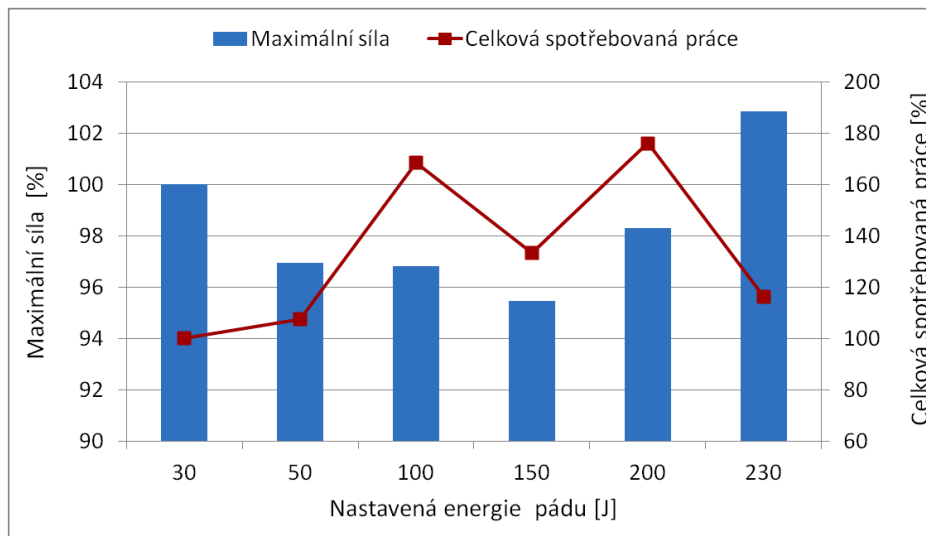
Obr. 65 Deformace zkušebního tělesa z PP po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J



Obr. 66 Deformace zkušebního tělesa z PP po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J

Z obrázku (Obr. 67) je patrné, že změna maximální síly v závislosti na nastavené energii pádu je v rozsahu 10 % pro všechny testované výšky. Nicméně celková spotřebovaná práce se mění výrazně (až o 80 %) v závislosti na nastavené energii pádu. Příčinou může být rozdílná deformace (postup trhlin) materiálu v závislosti na nastavené výšce pádu, resp. rychlosti dopadu tlouku na povrch a následným průchodem při různé rychlosti. Na základě vyhodnocení naměřených dat se jeví jako optimální nastavená energie pádu 50 J pro polypropylen s 30 % skelných vláken. Pro potvrzení této hodnoty by bylo vhodné měření zopakovat pro větší výběrový statistický soubor s minimálním počtem měření 30.

U materiálu PP s 30 % skelných vláken došlo k proražení všech zkušebních těles, jak je zobrazeno na obrázcích (Obr. 68 a Obr. 69). Čistý polypropylen se chová jako houževnatý materiál, nicméně s rostoucím obsahem skelných vláken se stává polypropylen více a více křehčím, a proto je vhodné najít optimální plnění z pohledu tuhosti a houževnatosti výsledného materiálu, aby vyhověl koncové aplikaci. Při deformaci dochází k postupu trhlin od středu ke kraji a následnému proražení celého povrchu pod plochou tlouku na několik sousedních částí.



Obr. 67 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J – PP30 % GF



Obr. 68 Deformace zkušebního tělesa z PP 30% GF po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J

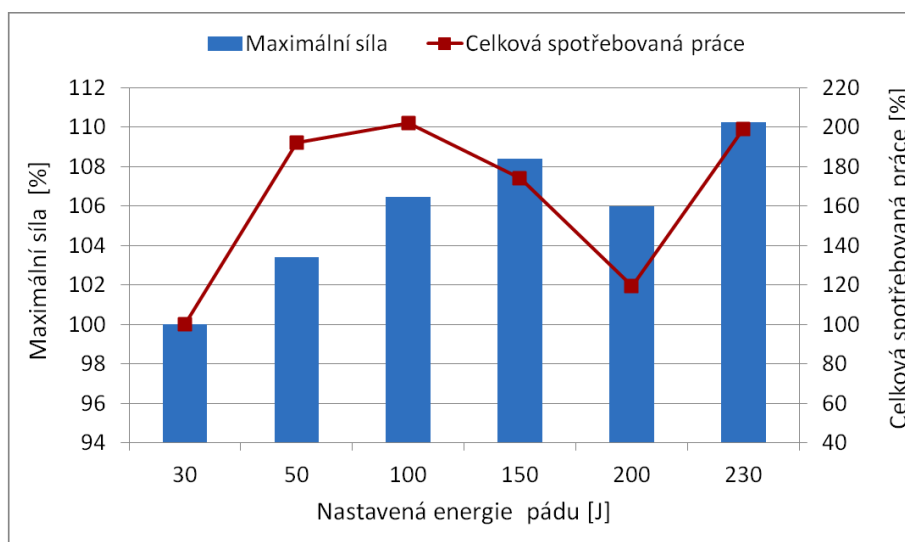


Obr. 69 Deformace zkušebního tělesa z PP 30% GF po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J

Z obrázku (Obr. 70) je patrné, že změna maximální síly v závislosti na nastavené energii pádu je v rozsahu 10 % pro všechny hodnoty nastavené energie pádu. Nicméně celková spotřebovaná práce se mění výrazně (až o 100 %) v závislosti na nastavené energii pádu. Příčinou může být rozdílná rychlost dopadu tloučky (vlivem změny nastavené energie do-

padu) na povrch materiálu a následné tření průchodem skrz materiál. Na základě vyhodnocení naměřených dat se jeví jako optimální nastavená energie pádu 100 J pro HDPE. Vhodné by bylo porovnání výsledků s mazaným tloučkem, aby se potvrdily již získané výsledky.

U materiálu HDPE nedošlo k proražení zkušebních těles energií 30 J, došlo pouze k plastické deformaci. U nastavených energií pádu s vyšší hodnotou došlo k proražení všech zkušebních těles, jak je zobrazeno na obrázcích (Obr. 71 a Obr. 72). Materiál průchodem tloučku se protahuje (plasticky deformuje) do hodnoty, kdy napětí na obvodu, kde působí tlouk, dojde k maximální koncentraci napětí, začnou se tvořit mikrotrhliny s následnou trhlinou skrz celý materiál.



Obr. 70 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J – HDPE



Obr. 71 Deformace zkušebního tělesa z HDPE po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J



Obr. 72 Deformace zkušebního tělesa z HDPE po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J

ZÁVĚR

Zkoumání mechanických vlastností u polymerních materiálů, stejně jako u ostatních materiálů, je velmi důležité. Čím dál více náročné aplikace si žádají vhodné materiály, které obstojí i v náročných podmínkách, např. při zvýšených teplotách prostředí. Zejména automobilový průmysl, který je v naší zemi hlavním tahounem ekonomiky exportu, si žádá kvalitní materiály, které se pečlivě testují, aby nedošlo k nečekanému selhání a následné újmě na životě. Jak se vyvíjejí materiály, tak se zdokonalují metody zkoušení, které jsou plně podporované počítačovou technikou. Na základě měření se predikují mezní stavy konstrukčních dílů či celých sestav.

Zkoušení materiálů se rozděluje na základě namáhání na statické a dynamické. Nejznámější statickou zkouškou je klasická zkouška v tahu či ohybu. Na druhou stranu nejznámější dynamickou (rázovou) zkouškou je Charpyho zkouška houževnatosti, která se provádí na rázovém kladivu. Dalšími zkouškami, které nejsou běžnou součástí běžné firemní zkušebny, může být např. rázová zkouška v tahu nebo pádová zkouška (penetrační zkouška), která je vhodná pro určení vhodnosti materiálů v interiéru a exteriéru automobilu, kde musí být voleny materiály, které se nesmí tříštit a když dojde k rozbití, nesmí vznikat ostré hrany. Zkoušky se řídí normami a vnitřními předpisy, které si vytvářejí zejména velké koncerny, jakož je např. VW, DAIMLER atd.

V bakalářské práci byl zkoumán vliv výšky pádu (nastavené energie pádu) na parametry pádové zkoušky, zejména byla vyhodnocována maximální dopadová síla a celková spotřebovaná práce u šesti vybraných materiálů, kterými byly PS, ABS, SAN, PP, PP 30 % GF, HDPE. Bylo zjištěno, že nastavená výška pádu má vliv na vyhodnocované parametry a samotnou deformaci materiálu.

Pro všechny testované materiály bylo použito šest výšek pádu, které v této práci znázorňuje nastavená energie pádu (jmenovitě 30, 50, 100, 150, 200, 230 J). Pro každý materiál se vyhodnocoval výběrový statistický soubor s počtem měření 10 pro každou výšku pádu. Bylo zjištěno, že křehké materiály (reprezentant SAN) nejsou vhodné pro rázové zatížení, při všech nastavených výškách došlo k proražení, kdy materiál se tříštil na drobné, ostré úlomky. Naproti tomu houževnaté materiály (reprezentanti PP a HDPE) jsou vhodné pro rázové zatížení, kdy materiál absorbuje podstatnou část energie, kterou přeměňuje na mechanickou práci (plastickou deformaci) a teplo. PP je houževnatý materiál, ale často se vyžaduje vyšší tuhost, dostatečné tuhosti se dosahuje plněním materiálu skelnými vlákny.

Nicméně s rostoucí tuhostí klesá houževnatost materiálu. Další skupinou jsou materiály, které se chovají kombinovaně (nejsou ani křehké, ani houževnaté), takto se chovají materiály houževnatý PS a ABS.

Z vyhodnocení maximální síly a celkové spotřebované práce vyplývá, že záleží na výšce pádu, ze které tlouk dopadá na daný materiál. Pro PS byla vyhodnocena optimální nastavená energií pádu 100 J, pro ABS 30 J, SAN 30 J, PP 100 J, PP 30 GF 50 J a pro HDPE 100 J. Rovněž výška pádu měla vliv na deformaci materiálu (šíření trhliny). Nicméně tyto hodnoty nastavené energie pádu nejsou striktně dány, vždy záleží na konkrétní aplikaci. Např. u krytů čelních světlometů, které jsou vyrobeny z polykarbonátu, se zjišťuje maximální energie, při které nedojde ke zničení krytu (nedojde k průrazu ani patrným plastickým deformacím).

Cílem bakalářské práce bylo potvrdit či vyvrátit vliv výšky pádu (bez mazání tlouku) na parametry pádové zkoušky a deformaci materiálu v průběhu testu a následné zhodnocení deformace po testu. Určitý vliv výšky pádu byl prokázán, nicméně pro přesnější vyhodnocení by bylo vhodné rozšířit výběrový statistický soubor na počet měření minimálně 30. Dále by bylo zajímavé porovnání výsledků mezi mazaným a nemazaným tloukem, zejména u houževnatých materiálů (PP a HDPE), kde dochází k velkému tření mezi tloukem a materiálem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006. 280 str. ISBN 80-7080-617-6.
- [2] DOMININGHAUS, Hans. *Plastics for Engineers: Materials, Properties, Applications*, Munich: Hanser, 1993. 785 str. ISBN 3-446-15723-9.
- [3] Rozdělení a charakteristika polymerů. *Publi* [online]. 2012 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>.
- [4] KOLOUCH, Jan. *Strojní součásti z plastů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981. 260 str. ISBN 04-234-81.
- [5] Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. *Technická univerzita Liberec – Fakulta strojní* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm.
- [6] MISRA, Ashok a Anup K. Ghosh. *Engineering polymers as functional materials. Popular Plastics* [online]. 2008, roč. 53, č. 1, s. 13-21 [cit. 2016-12-04].
- [7] PRITCHARD, Geoffrey. *Reinforced plastics durability*. Boca Raton: CRC Press, 1999, 374 s. ISBN 978-1-85573-320-6.
- [8] MITTAL, Vikas. *High performance polymers and engineering plastics*. Hoboken: John Wiley, 2011, 430 s. ISBN 978-1-118-01669-5.
- [9] KNIEWALD, Dušan. *Náuka o plastoch*. 1. vyd. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2007, 244 s. ISBN 978-80-8073-815-0.
- [10] CAMPO, E. *Selection of polymeric materials: how to select design properties from different standards*. Norwich, NY: William Andrew, 2008, 253 s. ISBN 978-0-8155-1551-7.
- [11] LEDNICKÝ, František. *Mikroskopie a morfologie polymerů: díl 2. Morfologie polymerů*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. 97 str. ISBN 978-80-7372-487-0.
- [12] Molekulární fyzika polymerů. *Nanoed.tul* [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/739/course/section/303/Uvod-Raab%2023_2_2013.pdf.
- [13] JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů*. 1. vyd. Pardubice: VŠCHT Pardubice, 1984. 105 str. ISBN 80-85113-01-5.

- [14] SOVA, Miloš, KREBS, Jaroslav. *Termoplasty v praxi: praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů*. 5. aktualit. vyd. Praha: Verlag Dashoffer, 1999-2000. ISBN 80-86229-15-7.
- [15] MLEZIVA, Josef, ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Polymery: Výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. 544 str. ISBN 80-85920-72-7
- [16] Ostatní termoplasty – popis termoplastů. *Koplast*[online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.koplast.cz/ostatni-termoplasty-popis-termoplastu/>.
- [17] SCHÄTZ, Miroslav, VONDRÁČEK, Petr. *Zkoušení polymerů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979. 264 str.
- [18] LAPČÍK, Ľubomír, RAAB, Miroslav. *Nauka o materiálech II*. 2. vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, 2004. 132 str. ISBN 80-7318-229-7.
- [19] ČSN EN ISO 179-1: *Plasty- Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 20 s. Třídící znak 62 547.
- [20] Dynamické zkoušky. *ufmi.ft.utb*. [online]. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf.
- [21] ČSN EN ISO 180: *Plasty- Určení dopadové síly Izod*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 20 s. Třídící znak 62 547.
- [22] ČSN EN ISO 6603-2: *Plasty- Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání – Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 24 s. Třídící znak 62 507.
- [23] Rázové kladiva a padostroje. *Labortech* [online]. [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.labortech.cz/produkty/razove-kladiva-a-padostroje/>.
- [24] Padostroj. *Zwick* [online]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.zwick.cz/cs/produkty/produkty-pro-razove-zkousky/padostroje/padostroj-230-j.html>.
- [25] CEAST 9340 Drop Tower Impact System. *Instron* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/impact-systems/drop-weight-testers/9340-drop-tower>.
- [26] Schlagbeständigkeit. *Products.coesfeld* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: http://products.coesfeld.com/epages/44402782.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/44402782/Categories/Kunststoffe/Schlagbest%C3%A4ndigkeit_KM.

- [27] SOUČEK, Eduard. *Statistika pro ekonomy*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola ekonomie a managementu, 2006. 267 str. ISBN 80-86730-06-9.
- [28] Základní analýza dat. *Bylany* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: http://www.bylany.com/kvetina/kvetina_quapina1/02_STATISTIKA.pdf.
- [29] KUBANOVÁ, Jana. *Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi*. 3. vyd. Bratislava: Statis, 2008. 245 str. ISBN 978-80-85659-47-4.
- [30] Vstřikování plastů. *Technická univerzita Liberec – Fakulta strojní* [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm.
- [31] Arburg Allrounder 470 H. *Elmia polymer* [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <https://www.elmia.se/globalassets/externa-nyheter/1365/423a79f8-c817-4622-bc29-2c1c6c8daa47.jpg>.
- [32] Arburg Allrounder 470 H. *Wplompen* [online]. [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <http://www.wplompen.nl/matrijzen/ALLROUNDER%20470%20H.pdf>.
- [33] Polystyrene Edistir SR 550 07. *Granulat* [online]. [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://www.granulat.com.pl/media/pdf/edistir%20sr%20550.pdf>.
- [34] ABS Starex HF – 06601W. *Matweb* [online]. [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=6d02c7a52f474781b143d7d43be68db1&ckck=1>.
- [35] SAN Starex HF - 5661. *Swchemical.co* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://swchemical.co.kr/download/ds/hf5661.pdf>.
- [36] PP Tatren IM 2575. *Materialdatacenter* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.materialdatacenter.com/ms/en/Tatren/Slovnaft+A%252ES/TATREN+IM+25+75/2a659de6/2226>.
- [37] PP Scolefin 53 G 10-0. *Ponci* [online]. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.ponci.com.cn/wuxingbiao/scolefin%2053%20g%2010-0%20pp.pdf>.
- [38] HDPE DOW 25055 E. *Catalog.ides* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://catalog.ides.com/docselect.aspx?I=70673&E=49382&DOC=DOWTDS&D S=123&DK=STD&DC=en>.
- [39] ČSN EN ISO 6603-1: Plasty- Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. Praha: Český normalizační institut, 2000. 24 s. Třídící znak 60 190.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitril-butadien-styren.
CAI	Compression After Impact.
ČSN	Česká technická norma.
EN	Evropská norma.
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung (společnost s ručením omezeným).
HDPE	Vysoko-hustotní polyetylen.
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro standardizaci).
LDPE	Nízko-hustotní polyetylen.
n	Počet měření.
PA	Polyamid.
PAEK	Polyaryletherketone
PB	Polybuten.
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát.
PE	Polyetylen.
PEEK	Polyetereterketon
PEI	Polyetherimid.
PEK	Polyetherketone.
PES	Polyester.
PET	Polyetylentereftalát.
PEI	Polyethylenimine.
PMMA	Polymethylmethakrylát.
POM	Polyoxymetylen.
PP	Polypropylen.

PPA	Polyphthalamide
PPO	Poly(p-phenylene oxide)
PP 30 % GF	Polypropylen plněný 30 % skelných vláken
PPS	Polyfenylsulfid.
PS	Polystyren.
PSU	Polysulfon.
PTFE	Polytetrafluoretylen.
PVC	Polyvinylchlorid.
SAN	Styren-akrylonitril.
VW	Volkswagen

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Dělení polymerů [2]</i>	12
<i>Obr. 2 Rozdělení polymerů podle aplikace a nadmolekulární struktury [9]</i>	14
<i>Obr. 3 Padostroj HIT230F pro zkoušení plastů [24]</i>	23
<i>Obr. 4 Padostroj HIT230F pro zkoušení upravených vláknitých kompozitů [24]</i>	23
<i>Obr. 5 Padostroj CEAST 9340 [25]</i>	24
<i>Obr. 6 Padostroj Primus [26]</i>	25
<i>Obr. 7 Padostroj Magnus [26]</i>	25
<i>Obr. 8 Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470 H 1000 – 400 [31]</i>	31
<i>Obr. 9 Rozměry a tvar zkušebního tělesa</i>	32
<i>Obr. 10 Padostroj ZWICK HIT230F</i>	37
<i>Obr. 11 Schéma systému padajícího tlouku [22]</i>	38
<i>Obr. 12 Schéma upínacího zařízení [22]</i>	39
<i>Obr. 13 Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PS, n=15</i>	42
<i>Obr. 14 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PS, n=15</i>	43
<i>Obr. 15 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PS, n=10</i>	44
<i>Obr. 16 Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PS, n=15</i>	45
<i>Obr. 17 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PS, n=15</i>	46
<i>Obr. 18 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PS, n=10</i>	47
<i>Obr. 19 Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – PS</i>	48
<i>Obr. 20 Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – ABS, n=15</i>	49
<i>Obr. 21 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – ABS, n=15</i>	50
<i>Obr. 22 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – ABS, n=10</i>	51
<i>Obr. 23 Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - ABS, n=15</i>	52
<i>Obr. 24 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - ABS, n=15</i>	53

<i>Obr. 25</i> Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - ABS, <i>n=10</i>	54
<i>Obr. 26</i> Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – ABS	55
<i>Obr. 27</i> Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – SAN, <i>n=15</i>	56
<i>Obr. 28</i> Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – SAN, <i>n=15</i>	57
<i>Obr. 29</i> Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – SAN, <i>n=10</i>	58
<i>Obr. 30</i> Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - SAN, <i>n=15</i>	59
<i>Obr. 31</i> Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - SAN, <i>n=15</i>	60
<i>Obr. 32</i> Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - SAN, <i>n=10</i>	61
<i>Obr. 33</i> Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – SAN	62
<i>Obr. 34</i> Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PP, <i>n=15</i>	63
<i>Obr. 35</i> Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PP, <i>n=15</i>	64
<i>Obr. 36</i> Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PP, <i>n=10</i>	65
<i>Obr. 37</i> Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PP, <i>n=15</i>	66
<i>Obr. 38</i> Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PP, <i>n=15</i>	67
<i>Obr. 39</i> Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PP, <i>n=10</i>	68
<i>Obr. 40</i> Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – PP	69
<i>Obr. 41</i> Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – PP 30 % GF, <i>n=15</i>	70
<i>Obr. 42</i> Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu –	71
<i>Obr. 43</i> Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu –	72
<i>Obr. 44</i> Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu – PP 30 % GF, <i>n=15</i>	73

Obr. 45 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu – PP 30 % GF, n=15.....	74
Obr. 46 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu – PP 30 % GF, n=10.....	75
Obr. 47 Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – PP 30 % GF.....	75
Obr. 48 Individuální bodový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – HDPE, n=15	77
Obr. 49 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – HDPE, n=15	78
Obr. 50 Krabicový graf závislosti maximální síly na výšce pádu – HDPE, n=10	79
Obr. 51 Individuální bodový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - HDPE, n=15	80
Obr. 52 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - HDPE, n=15.....	81
Obr. 53 Krabicový graf závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - HDPE, n=10.....	82
Obr. 54 Porovnání maximální síly s celkovou spotřebovanou prací v závislosti na výšce pádu – HDPE.....	82
Obr. 55 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J - PS.....	85
Obr. 56 Deformace zkušební tělesa z PS po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J.....	85
Obr. 57 Deformace zkušební tělesa z PS po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J.....	85
Obr. 58 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J - ABS.....	86
Obr. 59 Deformace zkušební tělesa z ABS po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J.....	86
Obr. 60 Deformace zkušební tělesa z ABS po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J.....	86
Obr. 61 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J - SAN.....	87
Obr. 62 Deformace zkušební tělesa ze SAN po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J.....	87

<i>Obr. 63 Deformace zkušebního tělesa ze SAN po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 64 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J - PP</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 65 Deformace zkušebního tělesa z PP po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 66 Deformace zkušebního tělesa z PP po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 67 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J – PP30 % GF</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 68 Deformace zkušebního tělesa z PP 30% GF po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 69 Deformace zkušebního tělesa z PP 30% GF po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 70 Procentuální změna maximální síly a celkové spotřebované práce vztahující se ke stanovené základní energii pádu 30 J – HDPE.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 71 Deformace zkušebního tělesa z HDPE po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 30 J, 50 J, 100 J</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 72 Deformace zkušebního tělesa z HDPE po pádové zkoušce při energii pádu vlevo 150 J, 200 J, 230 J</i>	<i>92</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Technická data vstřikovacího stroje ARBURG ALLROUNDER 470 H [32]</i>	32
<i>Tab. 2 Zvolené polymerní materiály</i>	33
<i>Tab. 3 Vybrané vlastnosti PS – EDISTIR SR 550 07 [33]</i>	34
<i>Tab. 4 Vybrané vlastnosti ABS – STAREX HF 06601W [34]</i>	34
<i>Tab. 5 Vybrané vlastnosti SAN - STAREX HF 5661 [35]</i>	35
<i>Tab. 6 Vybrané vlastnosti PP - TATREN IM 2575 [36]</i>	35
<i>Tab. 7 Vybrané vlastnosti PP 30% GF - 99 53 G10 – O [37]</i>	36
<i>Tab. 8 Vybrané vlastnosti HDPE - DOW 25 055 E [38]</i>	36
<i>Tab. 9 Tabulka rozměrů upínacího zařízení [22]</i>	39
<i>Tab. 10 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PS, n=15</i>	43
<i>Tab. 11 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PS, n=10</i>	44
<i>Tab. 12 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu</i> <i>- PS, n=15</i>	46
<i>Tab. 13 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu</i> <i>- PS, n=10</i>	47
<i>Tab. 14 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – ABS, n=15</i>	49
<i>Tab. 15 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – ABS, n=10</i>	50
<i>Tab. 16 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu</i> <i>- ABS, n=15</i>	52
<i>Tab. 17 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu</i> <i>- ABS, n=10</i>	54
<i>Tab. 18 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – SAN, n=15</i>	56
<i>Tab. 19 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – SAN, n=10</i>	57
<i>Tab. 20 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu</i> <i>- SAN, n=15</i>	59
<i>Tab. 21 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu</i> <i>- SAN, n=10</i>	60
<i>Tab. 22 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PP, n=15</i>	63
<i>Tab. 23 Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PP, n=10</i>	64
<i>Tab. 24 Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu</i> <i>- PP, n=15</i>	66

<i>Tab. 25</i> Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - PP, n=10	67
<i>Tab. 26</i> Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PP 30 % GF, n=15	70
<i>Tab. 27</i> Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – PP 30 % GF, n=10	71
<i>Tab. 28</i> Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu – PP 30 % GF, n=15	73
<i>Tab. 29</i> Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu – PP 30 % GF, n=10	74
<i>Tab. 30</i> Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – HDPE, n=15	77
<i>Tab. 31</i> Statistické vyhodnocení závislosti maximální síly na výšce pádu – HDPE, n=10	78
<i>Tab. 32</i> Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - HDPE, n=15	80
<i>Tab. 33</i> Statistické vyhodnocení závislosti celkové spotřebované práce na výšce pádu - HDPE, n=10	81