



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

VLIV PARAMETRŮ MUCELL TECHNOLOGIE NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ

INFLUENCE OF THE MUCELL TECHNOLOGY PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF
POLYMERS FOR INJECTION MOULDING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matěj Suchánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Libor Válka, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Bc. Matěj Suchánek**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Libor Válka, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv parametrů MuCell technologie na mechanické vlastnosti polymerů pro vstřikování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Podstatou technologie MuCell (Microcellular Foam Molding) je vstřikování stlačených neaktivních plynů do roztaveného termoplastu. Dochází tak k vytvoření struktury s uzavřenými póry, kdy kromě hmotnostní úspory na jednotku objemu materiálu má výsledný materiál i odlišné mechanické vlastnosti v porovnání s materiály vyrobenými klasickými technologiemi.

Cíle diplomové práce:

V teoretické části práce bude kromě popisu polymerních materiálů použitých v experimentální části práce uveden rozbor technologie vstřikování se zaměřením na termoplasty s vysokým obsahem plniva ve formě dlouhých vláken (skelných, uhlíkových). Pozornost bude věnována technologii vypěňování termoplastů se zaměřením na používané metody, tj. fyzikální a chemické postupy vypěňování. Praktická část práce bude orientována na porovnání statických a dynamických mechanických vlastností jednoho typu termoplastu vyztuženého dlouhými skleněnými vlákny v závislosti na množství plynu ve struktuře. Výsledkem by kromě jiných závěrů mělo být stanovení optimální dávky plynu při zachování požadovaného mechanického výkonu materiálu, zejména rázové houževnatosti.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 1110. Plasty - Polyamidy - Zrychlené kondicionování zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 1999. 8 s.

ČSN EN ISO 527-2. Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Praha: ÚNMZ, 2012. 16 s.

ČSN EN ISO 179-1. Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1:
Neinstrumentovaná rázová zkouška. Praha: ÚNMZ 2010. 24 s.

SOVA, M. Termoplasty v praxi. Praha: Verlag Dashofer s.r.o., 2001. ISBN 80-86229-15-7.

MEISSNER, B., ZILVAR, V. Fyzika polymerů. SNTL, Praha, 1987. ISBN 04-634-87.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 16. 10. 2017



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vlivem obsahu plynu ve struktuře polymerních materiálů na mechanické vlastnosti. Zkušební tělesa byla zhotovena pomocí technologie MuCell z polyftalamidu vyztuženého 50% podílem skelných vláken. Teoretická část práce je věnována polymerním materiálům se zaměřením na polyamidy a technologii injekčního vstřikování. V experimentální části práce je zkoumána závislost mezi charakteristikami získanými ze zkoušky tahem a zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy na množství plynu v polymeru.

KLÍČOVÁ SLOVA

polymer, kompozit, injekční vstřikování, skelná vlákna, polyamidy, polyftalamid, MuCell, porozita, zkouška tahem, zkouška typu Charpy

ABSTRACT

This master's thesis deals with influence of gas content in structure of polymer materials to mechanical properties. Test specimens were prepared by MuCell technology from polyphthalamide reinforced by 50 % of glass fiber content. The theoretical part of this thesis is focused on polymer materials with attention to polyamides and injection moulding technology. In the experimental part, the dependence between the characteristics obtained from the tensile test and the Charpy impact test on the amount of gas in the polymer is examined.

KEY WORDS

polymer, composite, injection moulding, glass fiber, polyamides, polyphthalamide, MuCell, porosity, tensile test, Charpy impact test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SUCHÁNEK, M. *Vliv parametrů MuCell technologie na mechanické vlastnosti polymerů pro vstřikování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Válka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením mého vedoucího Ing. Libora Války, CSc., s využitím informačních zdrojů a literatury, které jsou uvedeny v seznamu na konci práce.

V Brně dne 24. 5. 2018

.....
Bc. Matěj Suchánek

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce Ing. Liboru Válkovi, CSc. za vedení mé práce, pomoc a užitečné rady. Dále děkuji Ing. Martinu Kachlíkovi, Ph.D., Ing. Igoru Moravčíkovi, Ph.D. a Ing. Lukáši Řehořkovi, Ph.D. za pomoc s experimentální částí práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mojí rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

1 Úvod.....	11
2 Teoretická část – polymery	12
2.1 Dělení polymerních materiálů.....	13
2.2 Polyamidy	15
2.2.1 Alifatické polyamidy.....	15
2.2.2 Semi-aromatické polyamidy (polyftalamidy)	15
2.2.3 Aromatické polyamidy	16
2.3 Polymerní kompozity	17
2.3.1 Skelná vlákna	18
2.3.2 Uhlíková vlákna	19
2.3.3 Polymerní vlákna	20
2.4 Mechanické a fyzikální vlastnosti plastů	21
2.4.1 Teplota skelného přechodu	22
2.4.2 Navlhavost polymerních materiálů	23
2.5 Injekční vstřikování plastů	24
2.5.1 Technologie vstřikování strukturních polymerních pěn	26
2.5.2 Specifika vstřikování polymeru s vysokým obsahem vláken	28
3 Experimentální část.....	29
3.1 Popis materiálu.....	29
3.2 Kondicionování zkušebních těles.....	30
3.3 Příprava zkušebních těles.....	32
3.4 Zkouška tahem	32
3.4.1 Měřené veličiny a typ tahových křivek.....	32
3.4.2 Výsledky tahové zkoušky	34
3.5 Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy	39
3.5.1 Zkouška na tělesech bez vrubu za pokojové teploty (+23 °C).....	40
3.5.2 Zkouška na tělesech bez vrubu za snížené teploty (–30 °C).....	41
3.5.3 Zkouška na tělesech s vrubem za pokojové teploty (+23 °C).....	44
3.5.4 Zkouška na tělesech s vrubem za teploty (–30 °C).....	45
3.5.5 Porovnání výsledků získaných při pokojových a nízkých teplotách	48
4 Diskuze.....	50
5 Závěr	53
Seznam použitých zdrojů	55
Seznam obrázků	59
Seznam tabulek	61

Seznam použitých symbolů a zkratk	63
Seznam příloh	67

1 ÚVOD

Přestože jsou polymery ve formě přírodních materiálů, jako je například dřevo, kůže a hedvábí, známé a používané již po staletí, tak objev a použití uměle vyrobených polymerů byl záležitostí převážně 20. století. K intenzivnímu rozvoji a masové produkci těchto materiálů došlo až v období kolem 2. světové války, ale velké množství těchto polymerů bylo objeveno již o něco dříve. [1]

Mezi hlavní přednosti polymerních materiálů patří nízká hustota, příznivá cena, dobrý poměr pevnosti k hmotnosti (ve formě polymerních vláken téměř nepřekonatelný), imunita vůči korozi (degradují však vlivem UV záření), dobré kluzné vlastnosti aj. Stejně jako všechny materiály mají i plasty¹ své nevýhody, například křehnutí vlivem nízkých teplot nebo jako následek již zmíněné UV degradace. Dále je třeba zmínit užší teplotní pásmo použitelnosti než v případě kovových materiálů, nízký modul pružnosti v tahu (E modul) a obecně silnou závislost mechanických vlastností na teplotě. V neposlední řadě je třeba zmínit problémy s ekologičností těchto materiálů, narozdíl od kovů, které lze kdykoliv přetavit a tím plnohodnotně recyklovat, je problematika znouvupoužitelnosti plastů složitější. [1, 2]

Velkou část těchto nevýhod lze však kompenzovat přípravou kompozitních materiálů na bázi polymerní matrice a zpevňující fáze. Tato fáze má nejčastěji formu vláken, která mohou být skleněná, uhlíková, aramidová nebo výjimečně i jiná. Pravděpodobně nejvíce používaná jsou vlákna skleněná, jejichž kombinací s polymerní matricí vzniká skelným vláknem vyztužený polymer (glass fiber-reinforced polymer – GFRP). Materiály tohoto typu vynikají excelentní měrnou pevností, která je výrazně vyšší než u čistých polymerů. Mezi nevýhody těchto materiálů patří vyšší cena, vyšší technologické nároky na zpracování a mírně vyšší hustota. [1]

Jednou z možností, jak kompenzovat vyšší hmotnost, je aplikace plynu do tekutého polymeru při vstřikování, podobně jako při výrobě kovových pěn. Tato technologie, nazývaná se MuCell, určená pro injekční vstřikování polymerních materiálů, nabízí další možnosti, jak optimalizovat poměr pevnost/hmotnost u výrobků vyrobených touto metodou. Ačkoliv se dá očekávat, že s narůstajícím obsahem plynu, a tím pádem klesající hmotností, budou pevnostní charakteristiky, jak při statickém, tak dynamickém zatěžování klesat, tak je nezbytné tento trend vyšetřit a popsat. Na základě těchto výsledků by potom mělo být možné najít ideální poměr co možná nejnižší hmotnosti a ještě přijatelných mechanických vlastností pro daný polymerní kompozit. [1, 3]

¹ Ačkoliv bývají pojmy plast a polymer někdy zaměňovány, tak nejsou zcela totožné. Pojem polymer odkazuje na makromolekulární organickou látku, zatímco pojem plast v sobě skrývá kromě základní makromolekulární látky ještě různá aditiva, která ovlivňují jeho vlastnosti (barviva, UV stabilizátory atd.). [2]

2 TEORETICKÁ ČÁST – POLYMERY

Jak bylo zmíněno v úvodu, přírodní polymery jsou známe po staletí, zatímco ty uměle vyrobené jsou záležitostí spíše 20. století. Mezi nimi leží neostrá hranice, na které se nachází materiály původně přírodní, které však prošly jistým stupněm umělého zpracování. Jedná se například o vulkanizovaný kaučuk, gutaperču nebo celuloid, tedy materiály 19. století, které měly ve své době nemalý význam. [1, 4]

Za zmínku stojí samotný proces vulkanizace objevený v 30. letech 19. století Nathanielem Haywardem. Tento americký vynálezce spolupracoval s Charlesem Goodyearem, právě on si nechal celý proces spočívající v úpravě surového kaučuku pomocí síry patentovat. Pomocí této modifikace dochází k zesílení surového kaučuku a výraznému zlepšení jeho mechanických vlastností. [1, 4, 5]

Podobně lze zmínit celuloid, který byl v 70. letech 19. století uveden na trh Johnem Wesleyem Hyattem jako náhradní materiál pro výrobu kulečnickových koulí, a poté se rychle rozšířil (výroba různých předmětů od hraček až po celuloidové filmy), neboť do té doby používaná slonovina se stala nedostatkovou a. [4, 6]

Za první zcela syntetický polymer bývá většinou považován bakelit, který byl v roce 1907 připraven a pojmenován americkým chemikem Leo Baekelandem, což je spolu s jinými milníky v historii polymerů uvedeno v tabulce 2.1. Ačkoliv byly prováděny pokusy s pryskyřicemi na bázi fenol-formaldehydu již dříve, tak teprve Leo Baekeland dokázal komerčně prorazit, a tak se bakelit brzy dočkal použití v elektrotechnice jako izolační materiál nebo v automobilovém průmyslu, kde ho použila automobilka Rolls Royce pro prvky interiéru. [4, 6]

Dalším významným polymerem, který se dočkal úspěchu, byl polyvinylchlorid (PVC). Přestože byl poprvé připraven již v 19. století, tak si na svůj komerční úspěch musel počkat až do 20. let století dvacátého, o což se zasloužil americký vynálezce Waldo Semon a společnost B. F. Goodrich Company. [5]

V roce 1928 následoval objev polymethylmethakrylátu (PMMA), který je znám i široké veřejnosti jako jedna z polymerních náhražek skla. Následoval objev a výroba polystyrenu (PS) v roce 1930, který je v dnešní době znám především jako izolační materiál (expandovaný polystyren). [4]

Později ve 30. letech následovaly další známé polymery, mezi které patřil i polyetylen (PE), který je v současné době nejběžnějším polymerem vzhledem k objemu produkce. Zhruba ve stejné době byl americkou firmou DuPont objeven i polyamid PA66, který se spolu s polyetylenem stal za 2. světové války strategickou surovinou. Koncem 30. let minulého století byl také objeven polytetrafluorethylen (PTFE), dnes široce známý pod obchodním názvem teflon. [4, 5, 6]

V průběhu 40. a 50. let byly dále objeveny další významné polymery, například kopolymer akrylonitrilbutadienstyren (ABS), který se dnes těší popularitě v 3D tiskárnách, ale používá se i jinde (automobilový průmysl, LEGO kostičky). O něco dříve byl objeven i polyethylentereftalát (PET), avšak jeho použití pro výrobu lahví pro sycené nápoje přišlo až v 70. letech 20. století. Z hlediska významu nelze nezmínit polypropylen (PP), objevený v polovině let 50. a nedlouho poté také ve velkém produkovaný italskou firmou Montecatini. I dnes patří PP objemem produkce mezi nejprodukovanější polymery. Je třeba zmínit i polykarbonát (PC), jehož použití je podobné jako u PMMA, avšak na rozdíl od něj vyniká lepšími mechanickými vlastnostmi, především vyšší hodnotou nárazové práce. [1, 4, 5, 6, 7]

Během 60. let minulého století byla polsko-americkou chemičkou Stephanie Kwolekovou (firma DuPont) objevena nová skupina materiálů – aramidová vlákna (zkrácenina slov aromatické polyamidy). Tato vlákna se vyznačují vysokým modulem

pružnosti, vysokou pevností v tahu, houževnatostí i odolností proti creepu. Následně byla tato vlákna uvedena na trh pod názvy Kevlar a Nomex. Na konci 70. let byla na trh také uvedena vlákna z polyetyleny s velmi vysokou molekulovou hmotností (UHMWPE) pod názvy Spectra a Dyneema. [1, 2, 5, 8, 9]

V současné době probíhá výzkum a vývoj v oblasti polymerů v různých směrech. Jedním ze směrů jsou snahy o výrobu polymeru požadovaných vlastností pomocí kombinace již známých polymerů (kopolymery), dalším směrem vývoje jsou již zmiňované vláknové polymerní kompozity nebo snaha o zlepšení vlastností polymeru pomocí změny technologie výroby. [4]

Tab. 2.1 Milníky ve vývoji polymerů² [4, 5, 6, 10]

1844	vulkanizace kaučuku
1870	celuloid
1907	bakelit
1927	PVC
1928	PMMA
1930	PS
1935	PA66
1938	PE
1939	PTFE
1941	PET
1948	ABS
1953	PC
1953	PP
1961	Aramidová vlákna (Nomex)

2.1 Dělení polymerních materiálů

Plasty a polymerní materiály lze dělit podle mnoha kritérií, z nichž některá jsou znázorněna na obrázku 2.1. Pravděpodobně nejběžnější je dělení podle reakce při zvyšování teploty. [2]

Termoplasty vlivem ohřevu postupně měknou a lze je převést do stavu taveniny a následným ochlazením nechat opět ztuhnout na pevnou fázi. Tento proces je vratný a lze ho opakovat. Pokud však termoplasty zahřejeme na příliš vysokou teplotu, tak dojde k jejich degradaci. Termoplasty jsou většinou lineární polymery, některé však mohou být rozvětvené (nízkohustotní polyetylén LDPE). Mezi termoplasty patří například PE, PS, PET, PVC nebo PP. [1, 2, 10]

Druhou skupinou jsou reaktoplasty (dříve termosety), které jsou na rozdíl od termoplastů zesíťované, během zahřívání neměknou, nelze je převést do stavu taveniny a při zahřátí na příliš vysokou teplotu dochází k jejich degradaci. Při zpracovatelském procesu dochází vlivem chemické reakce, která může být způsobena teplem, zářením nebo síťovacím činidlem, k jejich vytvrzování. Obecně jsou tužší a tvrdší než termoplasty a rozměrově stabilnější. Do této skupiny patří epoxidové pryskyřice, fenol-formaldehydické pryskyřice (bakelit), elastomery a další. [1, 2, 10]

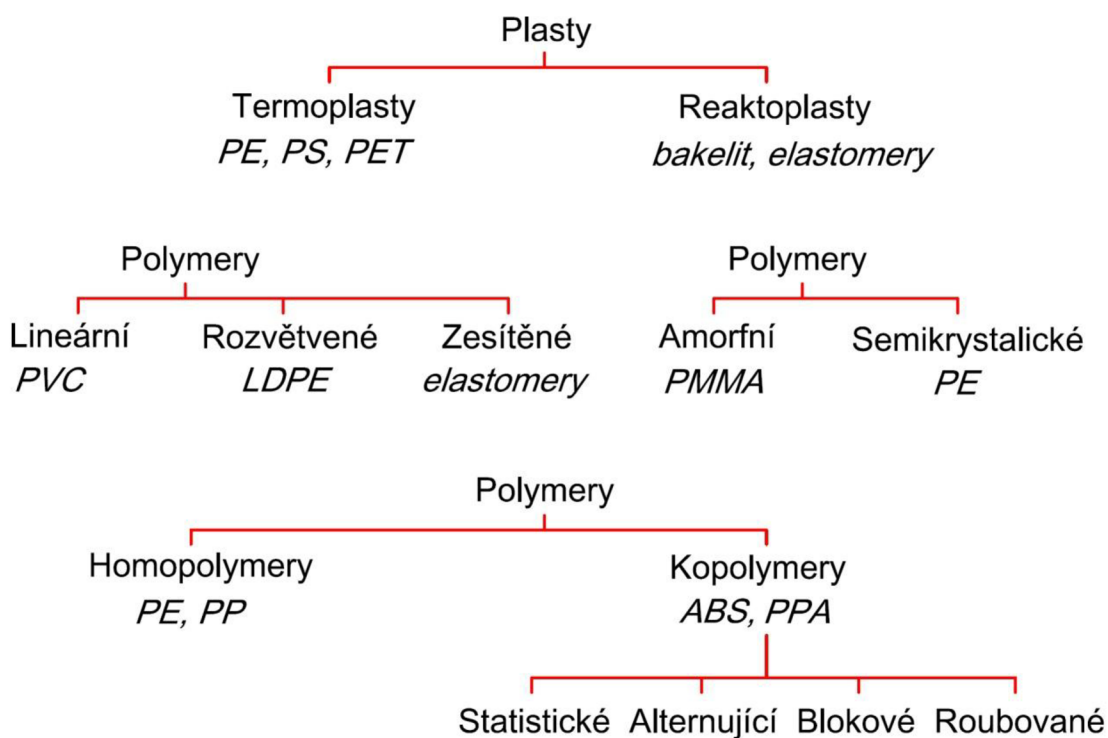
² Uvedené letopočty odpovídají spíše začátku výroby daného polymeru (případně jeho širšímu rozšíření), než datu jeho objevení, který je mnohdy obtížné určit (některé materiály byly objeveny nezávisle na sobě více lidmi současně), a proto jsou letopočty spíše orientační. Mnoho polymerů také provázely různé patentové spory s nejasným výsledkem.

Dalším kritériem pro dělení polymerů může být vzájemné propojení řetězců. Nejběžnějším typem jsou polymery lineární (jednotlivé řetězce nejsou propojeny kovalentními vazbami), dalším typem jsou polymery rozvětvené a posledním druhem polymery zesítěné. K lineárním polymerům tedy patří například PVC, PS, PMMA nebo nylon, zatímco mezi rozvětvené polymery patří například již zmiňovaný LDPE. Posledním typem jsou zesítované polymery. Jedná se o reaktoplasty, jednotlivé řetězce jsou zde vzájemně propojeny a tvoří hustou 3D síť, což je příčinou jejich neschopnosti přejít do tekutého stavu při zahřívání. [1, 2, 10]

Většina polymerů má amorfnní strukturu, existují však i polymery semikrystalické až vysoce (95 %) krystalické. Podle tohoto kritéria lze tedy polymery rozdělit na amorfnní a částečně krystalické. Vzhledem k dlouhým molekulám, kterými jsou polymery tvořeny, je zde třeba pojem krystalické struktury chápat odlišně než u kovových materiálů. Míra krystalinity je závislá jak na rychlosti ochlazování (pomalejší ochlazování zvyšuje podíl krystalické fáze), tak na základní stavební jednotce polymeru (čím je složitější, tím je krystalizace obtížnější). Důležitým důsledkem je změna hustoty v závislosti na stupni krystalinity, více krystalické polymery mají mírně vyšší hustotu. [1, 2]

Jak již bylo zmíněno, tak jednou z cest vývoje nových polymerních materiálů jsou kopolymery. Jsou to materiály, v jejichž struktuře se nějakým způsobem střídají alespoň dva monomery různého druhu. Podle uspořádání se kopolymery dělí na statistické, alternující, blokové a roubované. Příkladem kopolymery je například ABS nebo polyftalamid (PPA). [1, 2]

Jelikož se tato práce zabývá měřením mechanických vlastností materiálu na bázi polyftalamidu (PPA) vyztuženého skelnými vlákny, což je polymer ze skupiny polyamidů, bude následující kapitola věnována právě této skupině materiálů.



Obr. 2.1 Různá kritéria dělení plastů [1, 2]

2.2 Polyamidy

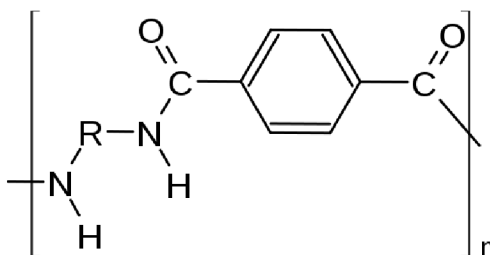
Polyamidy jsou makromolekulární látky, ve kterých se střídají amidové skupiny – CO – NH – s jinými funkčními skupinami. Syntetické polyamidy můžeme rozdělit do tří skupin. První skupinou jsou alifatické polyamidy, do této skupiny patří běžné konstrukční polymery jako například PA6 nebo PA66. Další skupinou jsou semi-aromatické polyamidy. V této skupině najdeme polyftalamidy (PPA), které se od běžných polyamidů (PA66, PA6) liší zejména podstatně vyšší teplotou skelného přechodu a teplotou tání. Poslední skupinou jsou aromatické polyamidy (aramid), tato skupina polymerních materiálů je používána převážně ve formě vláken pod obchodními názvy Kevlar, Nomex, Twaron aj. [4, 5, 11]

2.2.1 Alifatické polyamidy

Tato skupina syntetických polyamidů je nejrozšířenější. Jak již bylo zmíněno, patří sem například PA6, PA66, PA12 nebo PA610. Číslo označující daný polyamid odkazuje na počet atomů uhlíku obsažených v monomerních látkách, ze kterých se tyto polymery připravují. Všechny zmíněné materiály patří do kategorie semikrystalických termoplastů a jsou polární, což ovlivňuje jejich vlastnosti. Silná polarita, jejíž příčinou jsou skupiny $C^+ = O^-$ a $N^- - H^+$, způsobuje vysokou sorpci vody. Nejvíce navlhavé jsou polyamidy PA6 a PA66, naopak PA11, PA12 a PA610 jsou navlhavé méně. Vysoká polarita má vliv i na vzájemné působení jednotlivých makromolekul a vede ke tvorbě vodíkových můstků (např. PA66). [2, 4]

2.2.2 Semi-aromatické polyamidy (polyftalamidy)

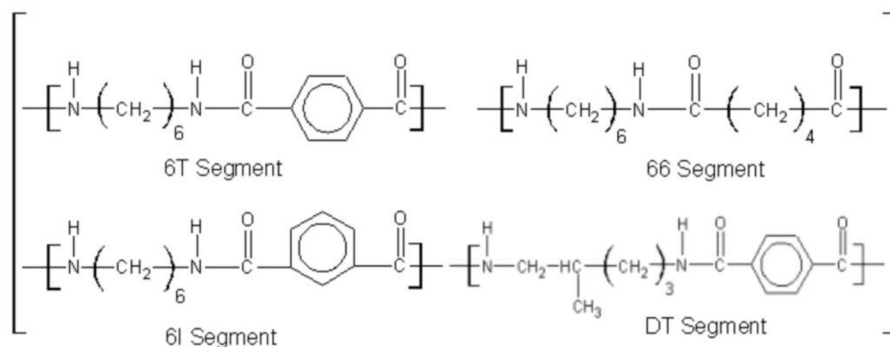
Polyftalamidy jsou stejně jako materiály z předchozí skupiny semikrystalické termoplasty. Na obrázku 2.2 můžeme vidět základní strukturní jednotku, která obsahuje benzenové jádro. Na rozdíl od alifatických polyamidů jsou méně navlhavé, více chemicky odolné a lépe odolávají vyšším teplotám, což je způsobeno vysokou teplotou skelného přechodu $T_g = 125\text{ °C}$ a teplotou tání $T_m = 312\text{ °C}$ (platí pro PA6T/6I/66). [2, 4, 11]



Obr. 2.2 Obecný vzorec základní strukturní jednotky polyftalamidu (PPA) [12]

Definice toho, jaké materiály lze označovat jako polyftalamidy, je poměrně složitá³. Vzorec strukturní jednotky na obrázku 2.2 je pro bližší zkoumání příliš obecný, neboť uhlovodíkový zbytek R se může lišit. Detailněji je situace zobrazena na obrázku 2.3, kde jsou zobrazeny jednotlivé segmenty střídající se ve struktuře polyftalamidů, z čehož plyne, že polyftalamidy jsou kopolymerní materiály. Jednotlivé segmenty jsou zde označeny jako 6T, 6I, DT a 66. Mimo jiné si můžeme všimnout, že segment 66 odpovídá základní strukturní jednotce polyamidu 66. [5, 11]

³ Norma ASTM D5336 definuje polyftalamid jako polyamid, ve kterém residua tereftalové kyseliny nebo isoftalové kyseliny nebo jejich kombinace tvoří alespoň 55 procentní podíl v dikarboxylové kyselině v opakujících se jednotkách v polymerním řetězci. [13]



Obr. 2.3 Různé typy segmentů střídající se ve struktuře běžných typů PPA [11]

Mezi typy PPA podle kombinace jednotlivých segmentů patří například 6T/66, 6T/DT a 6T/6I/66. Tyto různé kopolymery se vzájemně liší jak teplotou tání a skelného přechodu, tak mechanickými vlastnostmi i chemickou odolností. Stručné srovnání je vyobrazeno v tabulce 2.2. Nejvyšší T_g dosahuje PA6T/DT, kromě toho je z těchto tří polyftalamidů nejodolnější vůči creepu a vykazuje dobrou chemickou odolnost. [11]

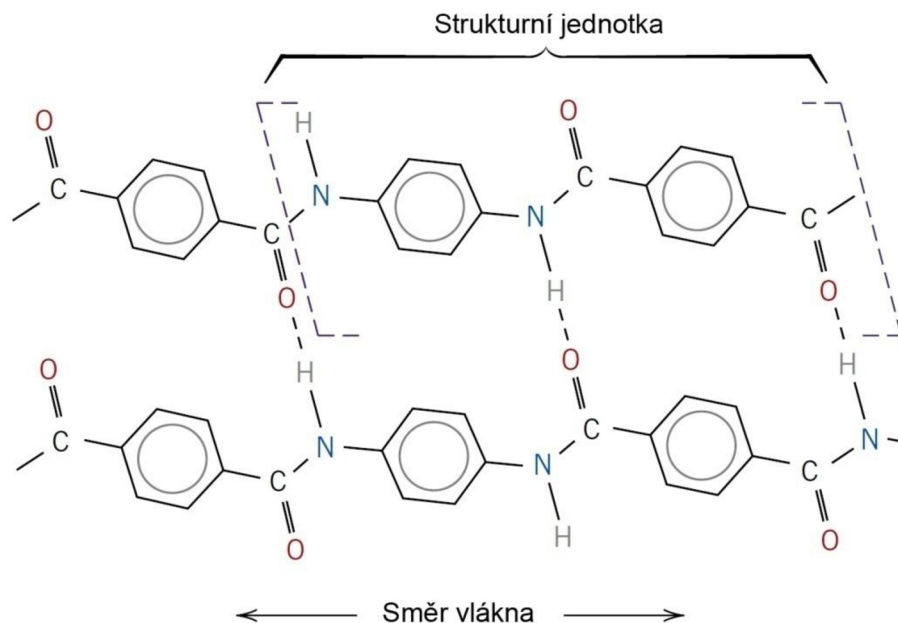
Tab. 2.2 T_g a T_m některých typů polyamidů [11]

Typ polymeru	T_g	T_m
PA6T/DT (PPA)	140	300
PA6T/6I/66 (PPA)	125	312
PA6T/66 (PPA)	90	310
PA46	80	295
PA66	65	263

Všechny typy PPA se používají ve formě kompozitů vyztužených skelnými vlákny. Jsou považovány za pokročilejší materiály než alifatické polyamidy a jsou určeny pro náročnější aplikace, což se také odráží v jejich ceně. [4, 11]

2.2.3 Aromatické polyamidy

Tyto materiály jsou známé zejména jako aramidová vlákna pod obchodními názvy Kevlar nebo Nomex. Během výroby vláken dochází k silné orientaci kovalentních vazeb podél osy vlákna, což vede k výraznému navýšení E modulu i meze pevnosti oproti objemovým polymerům. Na obrázku 2.4 je zobrazena vnitřní struktura Kevlaru, kde si můžeme povšimnout vodíkových můstků mezi sousedními makromolekulami, která mají na zpevnění také pozitivní efekt. [1, 10]



Obr. 2.4 Vnitřní struktura aramidového vlákna (Kevlar) [1]

2.3 Polymerní kompozity

Kompozity s polymerní matricí je možné rozdělit do více skupin. Například podle tvaru zpevňující fáze je možné rozdělit kompozity na částicové a vláknové. Za částicový kompozit je možné označit například pneumatiky obsahující částice sazí nanometrické velikosti za účelem zlepšení řady vlastností. Nejrozšířenějším typem disperzní fáze v polymerních kompozitech jsou však vlákna, kterými se budeme dále zabývat. [1]

Vlákny vyztužené kompozity s polymerní matricí se dají rozdělit podle několika kritérií. První důležité kritérium představuje typ vláken, jejich množství, uspořádání, délka jednotlivých vláken, případně jejich tvar. Druhým kritériem je typ matrice, která může být termoplastická nebo reaktoplastická. [1, 2]

Vlákna nejčastěji dělíme na dvě skupiny, první skupinou jsou vlákna spojitá (uspořádaná), druhou skupinu tvoří vlákna nespojitá, která mohou být buďto uspořádaná nebo náhodně orientovaná. [1]

Typ matrice je stejně jako typ vláken úzce spjat s technologií výroby, výhodou termoplastických matric je to, že se nemusí vytvrzovat a výroba tak může být produktivnější. [2]

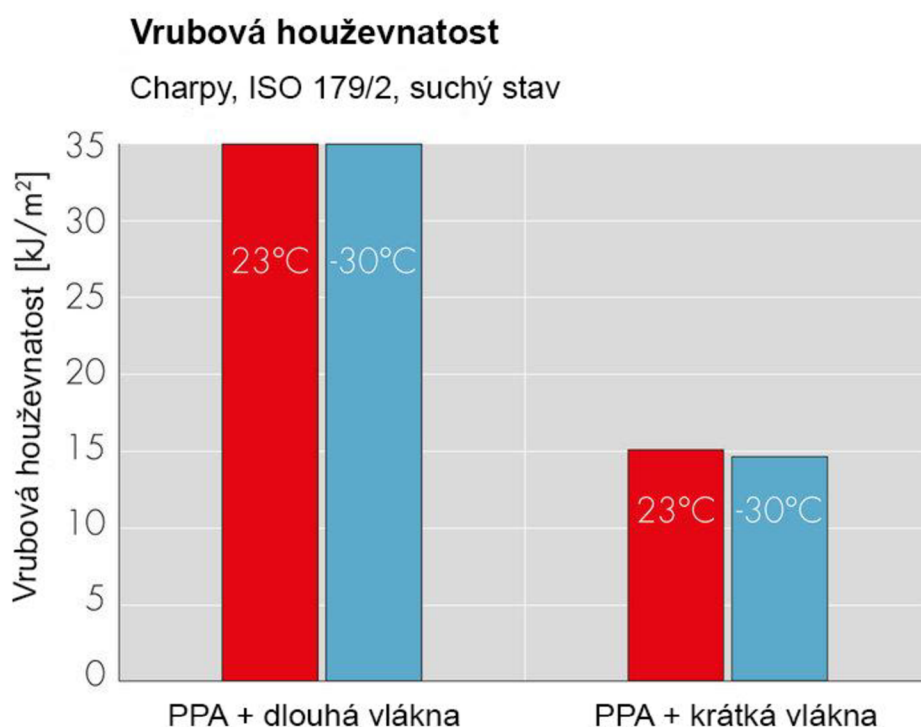
Pro výrobu technologií injekčního vstřikování se používají termoplastické matrice s krátkými náhodně orientovanými vlákny. Materiál je výrobcí často dodáván ve formě granulátu obsahující polymer včetně vláken. Tyto granule (obvyklá velikost 12 mm) se připravují mísením taveniny polymeru a sekaných vláken, při tomto procesu, a potom i při následném vstřikování dochází k lámání vláken a zkracování jejich délky, což je nežádoucí. [1, 2]

Částečným řešením je výroba granulí obsahujících vlákna, která prochází celou délkou granule, což má za následek přítomnost delších vláken i ve finálním výrobku, který potom vykazuje vyšší pevnost. Potom někdy hovoříme o dlouhými vlákny vyztuženém termoplastu („long fiber thermoplastic“, LFT). Délka vláken má významný vliv na mechanické vlastnosti, zejména na nárazovou práci. Tento vliv může být i značně vyšší než vliv teploty, což je vidět na obrázku 2.5. [1, 2, 15]

2.3.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna jsou nejpoužívanějším typem vyztužující fáze v polymerních kompozitech. Průměr vláken se obvykle pohybuje mezi 3 až 20 μm , délka vláken závisí na typu kompozitu a na technologii výroby. Mezi výhody skelných vláken patří příznivá cena, která je dána poměrně snadnou výrobou pomocí tažení z taveniny, dále vysoká pevnost a dobrá odolnost proti různým korozivním prostředím. [1]

Pro výrobu skelných vláken bývá nejčastěji používán materiál známý jako E-sklovina⁴, jehož chemické složení je uvedeno v tabulce 2.3. E-sklo vyniká především dobrým poměrem pevnost/cena. Dalším používaným materiálem pro výrobu skelných vláken je tzv. S-sklovina, která má ze všech typů skelných vláken nejvyšší pevnost, její nevýhodou je však vyšší cena. S-sklovina existuje i v cenově dostupnější variantě S-2-sklovina, jejíž pevnost je podobná. Dále existuje i C-sklovina, které vyniká svoji chemickou odolností a je používána v chemickém průmyslu. [1, 2, 14]



Obr. 2.5 Porovnání vrubové houževnatosti dvou materiálů se stejnou matricí, vlevo vyztuženého pomocí dlouhých vláken, vpravo vlákny krátkými [15]

Skelná vlákna jsou obecně citlivá na přítomnost povrchových vad, které výrazně snižují jejich pevnost. Vlákna mohou degradovat i vlivem adsorpce vzdušné vlhkosti (může dojít k poklesu pevnosti až o 50 %). Z těchto důvodů jsou vlákna už během výroby ošetřena lubrikanty. Před samotnou výrobou kompozitu je ochranná vrstva lubrikantu odstraněna a nahrazena vazebným prostředkem za účelem posílení vazby mezi vlákny a matricí. [1, 2]

Při zvyšování provozní teploty dochází k poklesu pevnosti skleněných vláken, avšak více limitujícím faktorem je u tohoto typu materiálů polymerní matrice. Maximální provozní teploty závisí na konkrétním materiálu a většinou nepřekračují 200 °C. [1, 2, 14]

⁴ někdy také E-sklo, E-glass [1, 2]

Tab. 2.3 Chemické složení skel používaných pro výrobu skelných vláken [2]

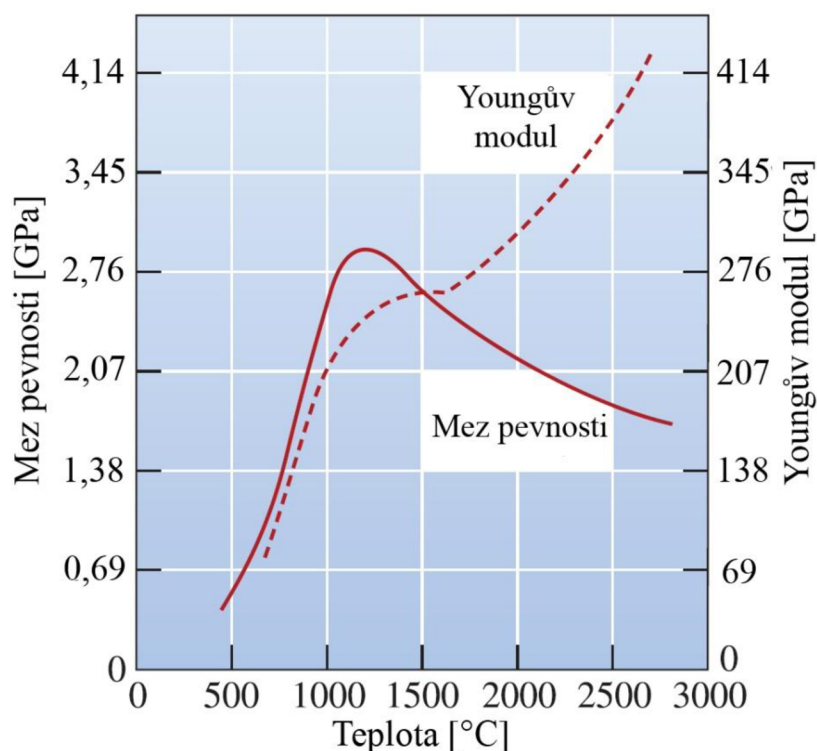
Typ skla	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	B ₂ O ₃	MgO
E-sklovina	54%	14%	20%	10%	-
S-sklovina	65%	25%	-	-	10%

Výroba skleněných vláken probíhá v několika krocích, prvním krokem je míšení složek skla za sucha, následuje tavba v peci při teplotách okolo 1370 °C. Tavenina následně prochází přes řadu otvorů a je tažena do vláken o průměru přibližně 10 μm. Vlákná jsou ošetřena ochranným povlakem lubrikantu a splétána do pramenů, které jsou posléze navijeny na buben. V této formě jsou vlákna obvykle distribuována a prodávána. [14]

2.3.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna vykazují vyšší elastický modul než vlákna skleněná, mají ve srovnání s nimi nižší hustotu a většinou i vyšší pevnost. Jejich v podstatě jedinou nevýhodou je vyšší cena v porovnání s jinými typy vláken. Mezi další přednosti patří i odolnost proti vysokým teplotám nebo rozpouštědlům, kyselinám a bázím. [2]

Pozitivem je rovněž možnost výroby uhlíkových vláken s rozdílnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, což umožňuje připravovat vlákna na míru pro dané aplikace. Rozlišujeme dva typy vláken – vysokopevnostní (HS – high strenght) a vysokomodulová (HM – high modulus). Někdy je používáno i dělení do více kategorií na standardní, středně, vysoko a ultravysoko modulové vlákna. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny mimo jiné teplotou karbonizace při výrobě vlákna, jak je uvedeno na obrázku 2.6. [1, 2, 16]



Obr. 2.6 Vliv tepelného zpracování vláken na Youngův modul a mez pevnosti [16]

Samotná vlákna mají obvykle 6–10 μm v průměru a zejména jejich měrná pevnost je téměř nepřekonatelná. V tomto ohledu mohou konkurovat pouze některá polymerní vlákna, která těžší především z mírně menší hustoty. Kromě již zmíněné vyšší ceny patří

k nevýhodám uhlíkových vláken nízká tažnost a houževnatost, tyto vlastnosti jsou však společné pro celou skupinu vysokopevnostních vláknitých materiálů. Na rozdíl od E-skloviny jsou uhlíková vlákna elektricky vodivá a vykazují i vysokou tepelnou vodivost (dokonce vyšší než měď). Přehled mechanicko-fyzikálních vlastností uhlíkových vláken je uveden v tabulce 2.4. [1, 14]

Výroba uhlíkových vláken je komplexní proces skládající se z několika kroků. Vstupní surovinou (prekurzorem) bývají buď polyakrylonitrilová (PAN) vlákna, nebo mezifázová smola⁵. [14]

V prvním případě jsou vlákna tažena z roztoku PAN a stabilizována při teplotách 200–280 °C v oxidačním prostředí, vlivem zvýšené teploty a tažení vláken dochází k uspořádání polymerních řetězců ve směru vlákna. Dalším krokem je karbonizace, při které jsou vlákna zahřívána v inertní atmosféře při teplotách 900–1200 °C, vlivem teploty dochází k eliminaci kyslíkových a dusíkových atomů. Po tomto kroku jsou vlákna tvořena téměř čistým uhlíkem. Během karbonizace musí být ve vláknech udržováno napětí, aby nedošlo k jejich smrštění. Tento způsob výroby (pomocí PAN prekurzoru) je používán pro výrobu standardních a středněmodulových uhlíkových vláken. Tyto vlákna mají také nejvyšší pevnost. [2, 14]

Druhý způsob výroby (z mezifázové smoly) se používá pro vysokomodulová uhlíková vlákna a do jisté míry se podobá výrobě vláken z PAN. Smola je nejdříve zvlákněna a stabilizována v oxidačním prostředí, následuje karbonizace (1000–2000 °C) a poté i grafitizace (2000–2900 °C), oba děje probíhají v inertním prostředí. [2, 14]

Ačkoliv jsou uhlíková vlákna schopna odolávat vysokým teplotám, na vzduchu nastává problém s jejich oxidací již při teplotách okolo 500 °C. [2]

Tab. 2.4 Mechanické a fyzikální vlastnosti materiálů používaných jako vyztužující fáze v kompozitech [1, 16, 17]

Materiál	Hustota [g/cm ³]	Mez pevnosti [GPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Skelná vlákna			
E-sklovina	2,54	2,4	75
S-sklovina	2,49	4,5	85
Uhlíková vlákna			
vysokopevnostní	1,75	5,65	280
vysokomodulová	1,90	1,86	530
Polymerní vlákna			
Aramid (Kevlar 49)	1,44	3,0	124
UHMWPE (Spectra 900)	0,97	2,6	120
PBO (Zylon)	1,56	5,8	270

2.3.3 Polymerní vlákna

Mezi polymerní vlákna s vysokou pevností patří především aramidová vlákna (Kevlar, Nomex), dále UHMWPE (Dyneema, Spectra) nebo PBO (Zylon). Z těchto vláken vyniká největší pevností Zylon, zatímco UHMWPE těži zejména z nízké hustoty, jak je zřejmé z údajů v tabulce 2.4. Výhodou aramidových vláken je především dobrá dostupnost a dobrá zmapovanost jejich vlastností. [1, 2]

⁵ anglický termín „pitch“ [2]

Pro výrobu kompozitů jsou používány především aramidová vlákna v kombinaci s epoxidy, polyestery a fenolformaldehydovými pryskyřicemi. [1, 2]

Všechna zmíněná vlákna jsou nebo byla používána pro vojenské aplikace – výroba neprůstřelných vest, přileb a balistických panelů. Při těchto aplikacích je třeba počítat s postupnou degradací vláken, přičemž náchylnost k degradaci se liší v závislosti na typu vlákna i výrobku. [1, 2, 16, 18]

2.4 Mechanické a fyzikální vlastnosti plastů

Mechanické vlastnosti plastů jsou silně závislé na teplotě a rychlosti zatěžování. U jednoho typu plastu je tedy, v závislosti na teplotě, možné naměřit různé typy tahových křivek. Počínaje od křehkého chování při nízkých teplotách, přes křivky s výraznou mezí kluzu, až po křivky s vysokým prodloužením při přetržení, vysokou houževnatostí a nevýraznou mezí kluzu při vysokých teplotách. [2, 10]

Pro většinu běžných polymerních materiálů bývají problematické již teploty kolem 100 °C. Při těchto teplotách dochází k měknutí materiálu, což se projeví snížením pevnosti a Youngova modulu pružnosti v tahu, pokud je teplota dále zvyšována, tak může docházet až k samovolné deformaci, změně barvy a trvalé degradaci polymerní součásti. Existují však i polymery schopné dlouhodobě odolávat teplotám nad 200 °C (např. polyimid, polybenzimidazol, polytetrafluorethylen). [2, 4]

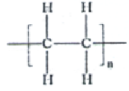
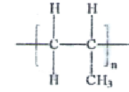
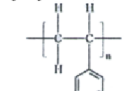
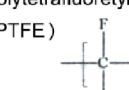
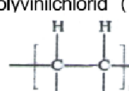
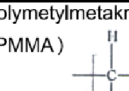
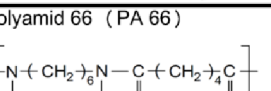

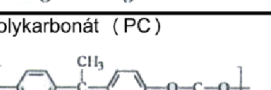
Hustota polymerních materiálů se obvykle pohybuje od 900 kg·m⁻³ (polypropylen) po 2 200 kg·m⁻³ (PTFE). V případě polymerních kompozitů vyztužených vlákny (skleněná, uhlíková) dochází obvykle k nárůstu hustoty materiálu vlivem vyšší hustoty vláken. [1, 2]

Na rozdíl od kovů se mechanické vlastnosti polymerních materiálů mohou výrazně lišit v závislosti na výrobcu a technologii výroby, což může být způsobeno řadou faktorů (linearita řetězce, stupeň krystalinity, velikost makromolekul, aditiva), a proto jsou mechanické vlastnosti uvedené v tabulce 2.5 spíše orientační. Přesnější data bychom získali vždy od konkrétního výrobce. [2, 10]

Co se týče konkrétních číselných rozsahů základních charakteristik pro plasty, tak platí, že Youngův modul pružnosti v tahu se pohybuje v rozmezí jednotek MPa až po jednotky GPa. Pro porovnání, u kovů se E modul mění pouze v rozmezí jednoho řádu. Mez pevnosti zde dosahuje maximální hodnoty okolo 100 MPa (kovy až tisíce MPa), avšak poměrná deformace při přetržení některých polymerních materiálů se může pohybovat v řádek stovek procent. [1, 2]

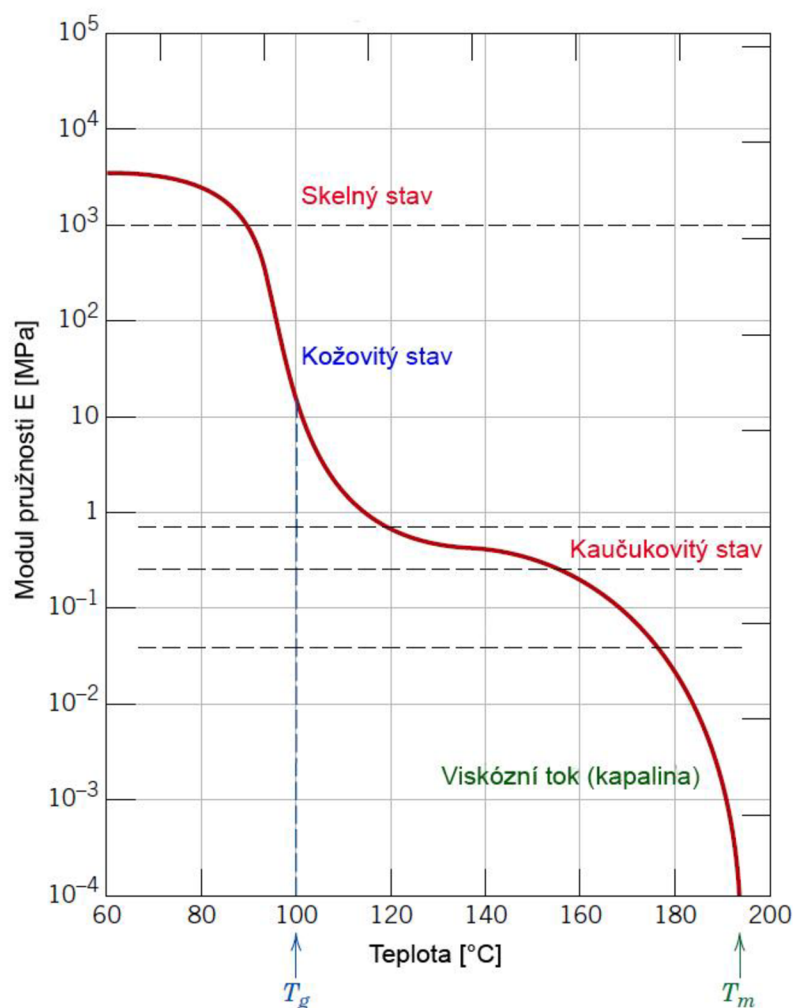
V případě polymerů pro vstřikování vyztužených pomocí skelných nebo uhlíkových vláken může tahová pevnost dosahovat 200 MPa (v případě vysokého podílu vláken i více), avšak za cenu snížení poměrné deformace při přetržení na jednotky pouze několika málo procent. [1, 2]

Tab. 2.5 Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů [2]

Název (zkratka) Opakující se konstituční jednotka	Polární (P) Nepolární (N) Amorfní (A) Krystalizující (K)	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Teplota tání [°C] Teplota skelného přechodu [°C]	Hustota [kg·m ⁻³]
Polyetylen (PE) 	N K	200 - 1400	8 - 35	120 - 137 -110 až -122	914 - 960
Polypropylen (PP) 	N K	1100 - 1300	21 - 37	176 -24	900 - 907
Polystyren (PS) 	N A	2275 - 3275	36 - 65	92	1050
Polytetrafluoretylen (PTFE) 	N K	410	14 - 36	327 -110	2150 - 2200
Polyvinilchlorid (PVC) 	P A	2500 - 3500	60 - 85	75	1390 - 1959
Polymethylmetakrylát (PMMA) 	P A	2500 - 3500	60 - 85	105	1190 - 1959
Polyamid 66 (PA 66) 	P K	1600 - 2000	77 - 84	265 65	1140
Polyethylentereftalát (PET) 	P K	3100	50 - 80	334	1370
Polykarbonát (PC) 	P A	2100 - 2400	56 - 72	114	1200

2.4.1 Teplota skelného přechodu

Vzhledem k poklesu Youngova modulu při zvyšování teploty je použitelnost plastů pro konstrukční účely omezena. Při nízkých teplotách se polymer nachází v takzvaném skelném (někdy sklovitém) stavu, v tomto stavu jsou jeho vlastnosti podobné vlastnostem běžných anorganických skel. Pokud teplota roste, dochází k měknutí a poklesu E modulu (i pevnosti), tento pokles však není lineární, jak je možno vidět na obrázku 2.7. Na tomto obrázku je možno vidět strmý pokles Youngova modulu v okolí teploty T_g , teploty skelného přechodu. Stav polymerního materiálu v okolí této teploty bývá někdy označován jako kožovitý. Při dalším zvýšení přechází materiál do stavu kaučkovitého a poté dále do stavu viskózního toku (kapalina). [1, 2]



Obr. 2.7 Závislost modulu pružnosti na teplotě (amorfní polymer) [1]

Toto chování je typické především pro amorfní polymery, u krystalizujících polymerů, jako je například PE nebo PP, není pokles Youngova modulu v okolí T_g tolik výrazný (pokles zhruba o jeden řád) a jsou tedy konstrukčně použitelné i nad teplotou skelného přechodu. [1, 2]

2.4.2 Navlhavost polymerních materiálů

Při vystavení polymerních materiálů vzdušné vlhkosti dochází k absorpci vody do materiálu, což se projevuje jak změnou mechanických vlastností, tak změnou rozměrů. Jedná se o dlouhodobý proces, který probíhá, dokud není dosaženo rovnováhy mezi obsahem vody v polymeru a vzdušnou vlhkostí. Rychlost tohoto procesu i poloha rovnovážného stavu závisí na druhu polymeru, vzdušné vlhkosti a okolní teplotě. [2, 4, 19]

Mezi silně navlhavé polymery patří například polyamidy, neboť obsahují ve své struktuře polární skupiny $C^+ = O^-$ a $N^- - H^+$. Počet těchto skupin je také důvodem, proč jsou některé polyamidy více navlhavé než jiné. Dále také platí, že krystalická fáze je méně navlhavá než fáze amorfní. Podle obsahu vody, který je polymer schopen pojmout, je možné rozdělit tyto materiály do několika skupin, jak je uvedeno v tabulce 2.6. [2, 19]

Tab. 2.6 Rozdělení polymerů podle navlhavosti [19]

Nenavlhavé (rovnovážný obsah vody do 0,1 %)	Málo navlhavé (rovnovážný obsah vody 0,1–0,5 %)	Středně navlhavé (rovnovážný obsah vody 0,6–2 %)	Silně navlhavé (rovnovážný obsah vody nad 2 %)
PE PP PS PTFE	ABS PET PC	POM PMMA PVC PA11 PA12	PA6 PA66 PA610 PA46

Vlivem vlhkosti dochází ke změně mechanických vlastností, konkrétně k poklesu pevnosti, nárůstu poměrné deformace při přetržení, poklesu modulu pružnosti v tahu a mírnému nárůstu nárazové práce. Mimo jiné dochází ke změně rozměrů, přesněji řečeno k jejich zvětšování (bobtnání polymeru). [4, 19, 20]

Kromě degradace hotových výrobků je třeba sledovat obsah vody v granulátu již při výrobě. Granulát je možné sušit jak v sušicích zařízeních (obvykle 70–120 °C po dobu několika hodin), tak v plastifikačních jednotkách. Při překročení sušicí teploty nebo příliš dlouhé době sušení může docházet k nežádoucímu žloutnutí granulátu. Pokud se nepodaří dostatečně snížit obsah vlhkosti, potom dochází k poklesu mechanických vlastností výrobku a tvorbě povrchových vad (bublinky, šmouhy, stříbření, nerovnoměrný lesk). [19, 20]

2.5 Injekční vstřikování plastů

Injekční vstřikování je v současnosti nejrozšířenější technologií pro výrobu dílů z termoplastů a termoplastických elastomerů, ale je používáno i pro reaktoplasty. Princip této technologie je podobný tlakovému lití kovových materiálů s tím rozdílem, že se zde pracuje s nižšími teplotami a jinými tlaky i vstřikovacími rychlostmi. [1, 20, 21]

Jedná se o vysoce produktivní technologii, kterou je možné vyrobit tvarově složité a rozměrově přesné díly. Nevýhodou technologie je vysoká pořizovací cena strojů a forem, a proto není příliš vhodná pro malosériovou výrobu. [20]

První komerčně využitelné stroje pro injekční vstřikování se objevily po 2. světové válce kolem roku 1947. Mezi první evropské výrobce patří firmy, které v tomto odvětví působí dodnes. Jedná se například o firmu Arburg z Německa nebo o rakouskou firmu Battenfeld. Stroje pro injekční vstřikování prošly postupně dlouhým vývojem, v dnešní době jsou již mikroprocesorově řízeny, podobně jako stroje v jiných odvětvích strojírenství. [21]

Stroje pro injekční vstřikování, někdy nazývané jako vstřikolisy, se skládají ze dvou základních částí – vstřikovací a uzavírací jednotky. Vstřikovací jednotka slouží k přípravě taveniny polymeru a následnému vstříknutí hmoty do dutiny formy, uzavírací jednotka slouží k uzavírání a otevírání dílů formy během výrobního cyklu. [20, 21]

Vstřikolisy lze dělit podle mnoha kritérií, mezi které patří například druh pohonu vstřikovací a uzavírací jednotky, podle něj můžeme stroje rozdělit na hydraulické, elektrické a hybridní. Dalším kritériem může být druh pracovního členu vstřikovací jednotky. Podle něj dělíme stroje na pístové a šnekové, přičemž řešení s pístem se vyskytuje spíše u starších strojů, modernější stroje bývají zpravidla šnekové. [20, 21]

Dále lze vstřikovací stroje rozdělit podle typu zpracovávaného polymeru na stroje určené pro vstřikování termoplastů, reaktoplastů a kaučuků. [20, 21]

Samotný proces vstřikování se skládá z několika podprocesů, kterými jsou uzavření formy, vstřikování, dotlak, chlazení výrobku v dutině formy, otevření formy a vyhození výrobku. K těmto fázím vstřikovacího cyklu je nutno připočítat strojní časy. Navíc je nutné poznamenat, že některé fáze se vzájemně překrývají (chlazení a dotlak) nebo probíhají i mimo zmíněný cyklus (dochlazení výrobku po vyhození mimo formu). [20, 21]

Prvním krokem tohoto procesu je uzavírání a otevírání formy, což je operace, u které je snaha zkrátit potřebný čas na minimum, na druhou stranu samotné dosednutí obou polovin formy musí probíhat pomaleji, aby se snížilo opotřebení formy na minimum. Během dalších fází musí být oba díly formy drženy dostatečnou silou, aby se tavenina nedostala do prostoru dělicí roviny. [20]

Další fází je samotné vstřikování, které je velmi krátké (maximálně několik sekund), aby nedošlo k zatumnutí čela taveniny. Jelikož je teplota stěn formy výrazně nižší než teplota taveniny, tak dochází k okamžité ztrátě tekutosti a následně k tunutí taveniny na stěnách formy. K plnění dutiny formy dochází v důsledku axiálního pohybu šneku, který tlačí taveninu nacházející se před čelem šneku přes trysku až do dutiny formy. Nejdůležitějšími řízenými parametry jsou vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost, které nejsou vzájemně nezávislé. Při vysokém tlaku vznikají přetoky, naopak při nízkém hrozí vznik nedostříknutých výrobků. [20]

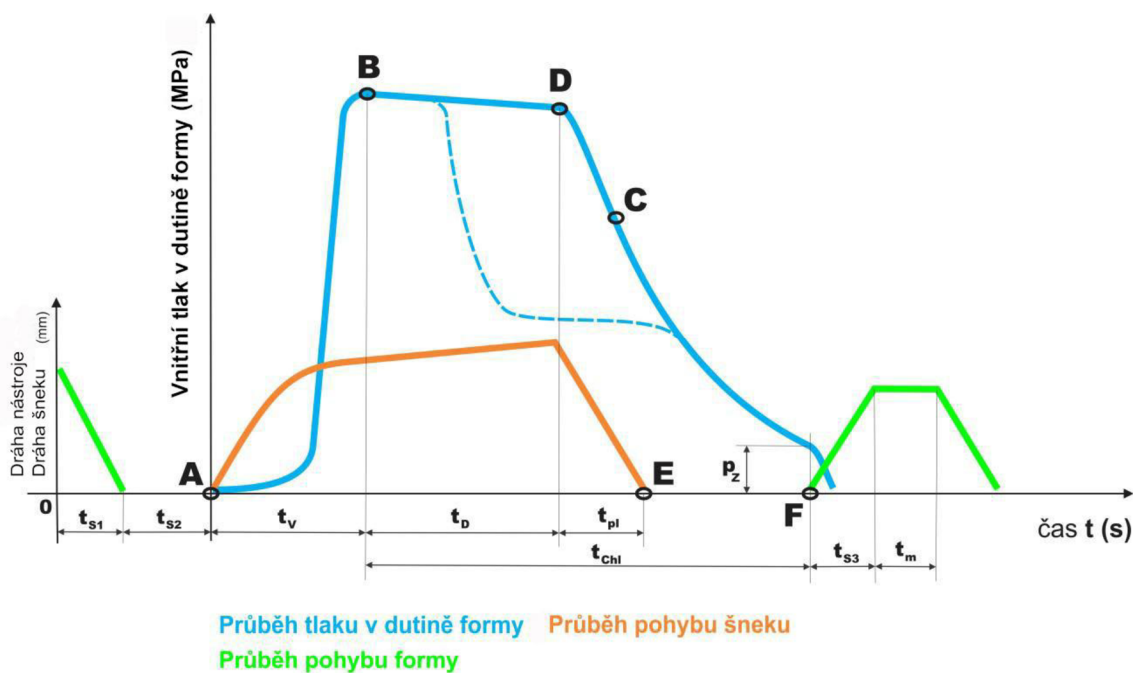
Po fázi vstřikování následuje fáze dotlaku, během této fáze dochází vlivem ochlazování ke smršťování materiálu v dutině formy, což je kompenzováno tlačáním další taveniny do formy, dokud nedojde k zatumnutí taveniny v oblasti vtokového systému. Časově se jedná o delší operaci než samotné vstřikování, která může v závislosti na velikosti výrobku trvat i desítky sekund. Současně s fází dotlaku probíhá ochlazování výrobku v dutině formy. [20]

Po dotlaku následuje plastifikace polymeru pro další vstřikovací cyklus, což se děje pomocí kombinace rotačního pohybu šneku a jeho posunu směrem dozadu. [20]

Následuje nejdelší část vstřikovacího cyklu, kterou je fáze chlazení. Tato fáze probíhá od prvotního kontaktu stěn formy s proudem taveniny a pokračuje i po vyhození výrobku z dutiny formy. [20]

Poslední fází v cyklu je otevření formy a vyhození výrobku. Zde je třeba nastavit průběh rychlostí posuvů tak, aby se čas zkrátit na minimum, ale současně byly zachovány měkké dorazy. V okamžiku vyhození výrobku musí být díl dostatečně tuhý tak, aby dále nedošlo k nepřijatelným deformacím. [20]

Průběh tlaků během jednotlivých částí vstřikovacího cyklu, s vyobrazením jednotlivých fází, je zobrazen v grafu na obrázku 2.8.



Obr. 2.8 Fáze vstřikovacího cyklu (t_{s1} , t_{s2} , t_{s3} – strojní časy, t_v – čas vstřikování, t_d – čas dotlaku, t_{pl} – čas plastifikace, t_{ch} – čas chlazení, t_m – manipulační doba) [20]

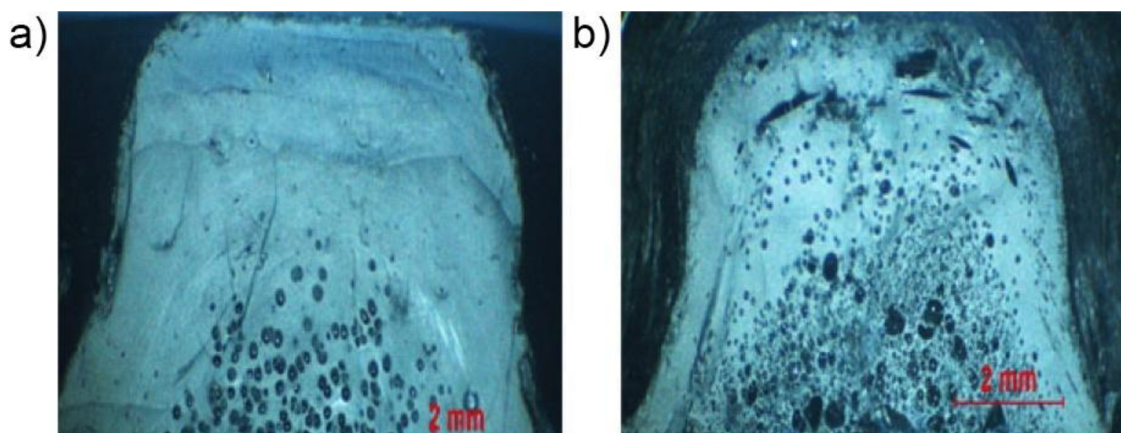
2.5.1 Technologie vstřikování strukturních polymerních pěn

Podstatou této technologie je zavedení plynu do taveniny polymeru, který po zatuhnutí vytvoří dutiny (póry), což má za následek snížení hmotnosti konečného výrobku. Tyto materiály vykazují jistou podobnost například s kovovými pěnami nebo pórobetonovými tvárnici (Ytong) používanými ve stavebnictví. Na rozdíl od těchto materiálů je zde obsah plynu v materiálu spíše menší, tím pádem je menší i úspora hmotnosti. Výhodou je naopak to, že se svými mechanickými vlastnostmi blíží původním nelehčeným materiálům. [20, 22, 23]

Můžeme rozlišit dva způsoby výroby těchto materiálů podle způsobu, jakým jsou póry vytvořeny. První způsob by se dal označit jako chemický – do taveniny je přidáno malé procento nadouvadla, které zajistí pórovitou strukturu. Druhou možností je cesta fyzikální, kdy je do taveniny dávkován plyn přímo. Tato technologie bývá označována jako MuCell (Microcellular Foam Moulding). [20, 24]

Použití chemického nadouvadla (chemický přístup)

Porézní struktury se v tomto případě dosahuje pomocí přísady několika procent nadouvadla, které se vlivem zahřátí granulátu během plastifikace aktivuje. Následuje proces vstřikování, kdy je dutina formy zaplněna pouze z 80–90 %. Působením nadouvadla dojde k zaplnění formy, navíc zde nadouvadlo převezme funkci dotlaku, na druhou stranu je nutná delší doba chlazení vlivem nižší tepelné vodivosti porézní struktury výrobku. Tento způsob vypěnění většinou neposkytuje tak dobré výsledky, jako při použití plynu (fyzikálního přístupu), jak je patrné z obrázku 2.9. [20]



Obr. 2.9 Struktura pórů při použití, a) dusíku (fyzikální přístup), b) nadouvadla (chemický přístup) [20]

Použití technologie MuCell (fyzikální přístup)

Druhou možností, jak dosáhnout mikrobuněčné struktury, je vstříkávání plynu do tavní komory před čelo šneku za pomoci injektoru, který je součástí vstříkovací jednotky. Mezi používané plyny patří dusík a oxid uhličitý, které jsou do taveniny vstříkávány ve formě superkritické kapaliny (SCF)⁶. [20, 25, 26]

Plyn je tedy dávkován do taveniny polymeru během plastifikační fáze, vlivem míchání a difuze dochází ke vzniku makroskopicky homogenní směsi superkritické kapaliny a taveniny polymeru. [20, 27]

Po vstříknutí směsi do dutiny formy dochází ke tvorbě jemných pórů vlivem poklesu tlaku v dutině formy. V ideálním případě je nukleace rovnoměrná a vznikají póry o velikosti 10 až 100 μm , které jsou rovnoměrně rozmístěny v celém objemu výrobku. [20, 27]

Tlakové špičky během vstříkovacího cyklu jsou nižší než při klasickém injekčním vstříkování, neboť plyn částečně přebírá funkci dotlaku. Výhodou je nižší opotřebení formy a snížení potřebné uzavírací síly vlivem nižších tlaků při vstříkovacím procesu. Díly vyrobené pomocí této technologie by měly vykazovat nižší vnitřní pnutí, také rozměrová přesnost by měla být lepší než při použití klasického injekčního vstříkování. [3, 20, 24, 27]

Technologie MuCell není příliš vhodná pro výrobu tenkostěnných dílů kvůli příliš rychlému tuhnutí, které potlačuje nukleaci pórů. Mezi další nevýhody technologie patří zejména nižší kvalita povrchu, na kterém vznikají šmouhy a dále vyšší pořizovací náklady celého zařízení. Schéma zařízení je uvedeno na obrázku 2.10. [20, 27]

Výhodami jsou, jak již bylo částečně zmíněno, redukce hmotnosti, zrychlení výrobního procesu, potlačení vzniku propadlin a eliminace smrštění. [20, 27]

⁶ Superkritickou kapalinou rozumíme takovou kapalinu, které se nachází nad svým kritickým tlakem a teplotou. Při těchto podmínkách se látka nachází ve stavu mezi plynem a kapalinou, s čímž se pojí unikátní fyzikální vlastnosti, které se liší v závislosti na konkrétní látce. Obecně mezi ně patří například dobrá rozpustnost, schopnost pronikat porézními materiály nebo hustota na pomezí plynu a kapaliny. Pro dusík jsou hodnoty kritického tlaku a teploty 3,4 MPa 126,15 K. [25, 26]



Obr. 2.10 Schéma vstřikovacího zařízení vybaveného technologií MuCell, výrobce Trexel, Inc. [28]

2.5.2 Specifika vstřikování polymeru s vysokým obsahem vláken

Mimo již zmíněné vyšší pevnosti a tuhosti se polymery vyztužené pomocí vláken vyznačují nižším smrštěním a horší kvalitou povrchu. Při vstřikování také dochází k určité orientaci vláken, takže vlastnosti výrobku nejsou zcela izotropní. [20]

Vlivem obsahu vláken v tavenině dochází ke zvýšení vnitřního tření, což je potřeba kompenzovat zvýšením teploty taveniny, zvýšením teploty formy a použitím vyšších vstřikovacích rychlostí. Vlivem vláken dochází také ke zvýšenému opotřebení forem. [20]

Vlákna můžeme rozdělit podle typu na skelná, uhlíková a polymerní, případně podle délky na dlouhá a krátká. Krátká vlákna jsou při výrobě granulátu dodávána do taveniny ve formě sekaných pramenů a dále dochází k jejich lámání. Jejich délka ve finálním výrobku bývá pod 1 mm. Dlouhá vlákna bývají při výrobě granulátu dodávána do taveniny ve formě nekonečné struny a jejich délka je v ideálním případě rovna délce granule. Ačkoliv jsou i tyto vlákna lámána ve vstřikolisu během plastifikace, zůstávají stále mnohonásobně delší než vlákna označovaná jako krátká. V dnešní době existuje i technologie, kdy nejsou vlákna obsažena v granulátu, ale jsou dodávána ve formě pramenů do tavicí komory, kde jsou dělena a přímo vstřikována. Nevýhodou je však nerovnoměrné rozmístění vláken ve finálním výrobku. [2, 20]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Celkem bylo testováno 240 zkušebních těles. Z tohoto počtu tvořily vzorky pro zkoušku tahem 40 kusů, vzorky pro zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpy 200 kusů. Polovina zkušebních těles pro zkoušku na Charpyho kladivu byla opatřena vrubem. Zkušební tělesa byla zhotovena technologií MuCell s pěti úrovněmi obsahu plynu: 0 % (hladina 1); 5,5 % (hladina 2); 8 % (hladina 3); 13 % (hladina 4); 18 % (hladina 5).

V rámci experimentální části diplomové práce byly provedeny tyto zkoušky:

- zkouška tahem za pokojové teploty (ČSN ISO 527) – 40 ks zkušebních těles, tělesa byla označena ST1-1 až ST5-8, kde první číslo značí hladinu obsahu plynu ve struktuře a druhé číslo označuje pořadí zkušebního tělesa
- zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy za pokojové teploty na zkušebních tělesech bez vrubu (ČSN ISO 179-1/eU) – 50 ks zkušebních těles, označení těles S1-1 až S5-10
- zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy za pokojové teploty na zkušebních tělesech s vrubem (ČSN ISO 179-1/eA) – 50 ks zkušebních těles, označení těles SV1-1 až SV5-10
- zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy za teploty $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ na zkušebních tělesech bez vrubu (ČSN ISO 179-1/eU) – 50 ks zkušebních těles, označení těles N1-1 až N5-10
- zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy za teploty $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ na zkušebních tělesech s vrubem (ČSN ISO 179-1/eA) – 50 ks zkušebních těles, označení těles NV1-1 až NV5-10

Pro zkoušku tahem bylo tedy použito osm zkušebních těles na každé hladině obsahu plynu, u zkoušky metodou Charpy bylo testováno deset zkušebních těles pro každou hladinu a typ zkoušky. Na obrázku 3.1 jsou zobrazena zkušební tělesa pro oba typy zkoušek. [29, 30, 31]



Obr. 3.1 Zkušební tělesa, nahoře pro zkoušku rázové houževnatost, dole pro zkoušku tahem

3.1 Popis materiálu

Všechna zkušební tělesa byla vyrobena ze stejného materiálu. Jedná se o polyftalamid, termoplastický kopolymer ze skupiny polyamidů, vyztužený 50% obsahem dlouhých skelných vláken. Zkušební tělesa byla vyrobena pomocí injekčního vstřikování technologií MuCell na Technické univerzitě v Liberci.

3.2 Kondicionování zkušebních těles

Jak již bylo zmíněno v teoretické části práce, u polymerních materiálů dochází k postupné změně mechanických vlastností vlivem absorpce vody z okolní atmosféry. Aby bylo možné porovnávat mechanické vlastnosti těchto materiálů mezi sebou, tak je nezbytné provádět měření na tělesech, která mají specifikovaný obsah vlhkosti. Tato skutečnost je důležitá zejména u navlhavých materiálů, mezi které patří především polyamidy. [19]

V normě ČSN EN ISO 1110 Plasty – Polyamidy – Zrychlené kondicionování zkušebních těles je uvedeno, že dosažení rovnovážného stavu mezi zkušebním tělesem z PA66 o tloušťce 4 mm a okolní atmosférou 23/50⁷ trvá více než rok, tento proces je však možné urychlit pomocí zvýšené teploty. Z tohoto důvodu byla provedena zrychlená kondicionace zkušebních těles za podmínek uvedených v již zmíněné normě. [32]

Z několika možných způsobů kondicionace, které tato norma umožňuje, byla zvolena možnost kondicionace v klimatizační skříni s řízenou teplotou a vlhkostí. Dle normy bylo třeba udržovat v klimatizační skříni teplotu 70 °C a relativní vlhkost 62 %, neboť rovnovážný obsah vlhkosti dosažený při tomto nastavení je téměř shodný s obsahem vlhkosti dosažené při vystavení těles standardní atmosféře 23/50 s tím rozdílem, že je celý proces výrazně urychlen. Nicméně i přesto je v normě uvedeno, že mechanické vlastnosti stanovené při tomto zrychleném kondicionování se mohou poněkud lišit od hodnot po kondicionaci v prostředí 23/50. [32]

Zkušební tělesa byla v průběhu kondicionace několikrát vyjmuta z klimatizační skříně a byla kontrolována jejich hmotnost pomocí analytických vah. Kondicionace byla prohlášena za dokončenou, jakmile se hmotnostní rozdíl mezi třemi po sobě jdoucími váženími zmenšil pod 0,1 %. [32]

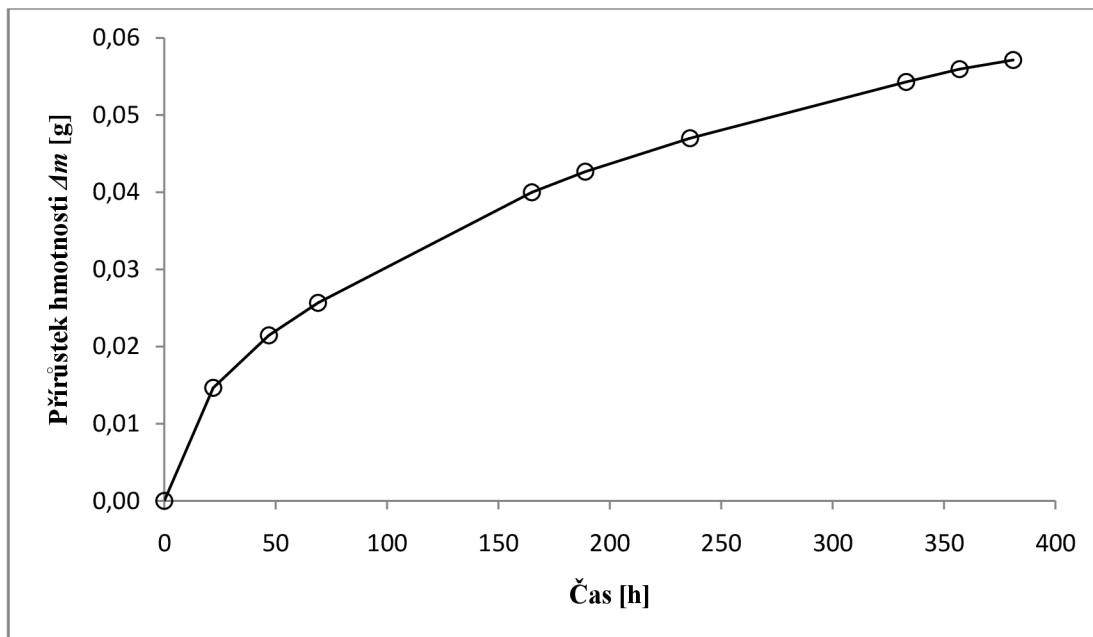
Z dat získaných během jednotlivých vážení byl sestaven graf na obrázku 3.2. Je z něj patrný postupný nárůst hmotnosti zkušebních těles v závislosti na čase. Jedná se o zkušební tělesa pro zkoušku metodou Charpy s nulovým obsahem plynu ve struktuře.

Bylo zjištěno, že kondicionování pro tuto hladinu obsahu plynu (0 %) trvá přibližně 16 dnů, avšak s narůstajícím obsahem plynu se tato doba snižuje. Pro vzorky s maximálním obsahem plynu (18 %) by stačila doba zhruba 10 dnů, navíc se zde mírně lišil i průběh nárůstu hmotnosti, který byl ze začátku strmější, ale rychleji zpomalil, a po zmíněných 10 dnech nebyly změny hmotnosti prakticky pozorovány, což se poněkud liší od již zmíněné hladiny 0 % (obr 3.2), kde i po 16 dnech stále docházelo k nárůstu hmotnosti, tento nárůst byl však malý a podle normy bylo možné prohlásit kondicionaci za ukončenou. Pro vzorky s hladinami obsahu plynu 5,5 %, 8 % a 13 % platilo, že doba jejich kondicionace se postupně snižovala s rostoucím obsahem plynu. Průběhy nárůstu hmotnosti v závislosti na době pobytu v klimatizační komoře pro hladiny 5,5 %, 8 %, 13 % a 18 % obsahu plynu ve struktuře jsou uvedeny v příloze 1 této práce.

Doba kondicionace je kromě teploty a relativní vlhkosti prostředí závislá na tloušťce zkušebních těles. Jelikož mají tělesa pro zkoušku na Charpyho kladivu i pro zkoušku tahem totožnou tloušťku (4 mm), měla by být stejná i doba potřebná ke kondicionaci.

Závislost přírůstu hmotnosti na čase kondicionace byla sledována i u těles pro zkoušku tahem, graf je uveden v příloze 1 této práce.

⁷ atmosféra o teplotě 23 °C a relativní vlhkosti 50 %



Obr. 3.2 Časová závislost změny hmotnosti zkušebních těles S1 při kondicionaci pro hladinu 0 % plynu ve struktuře

Kromě grafů byla zpracována také tabulka 3.1, ve které je uvedeno označení zkušebních těles, obsah plynu, hmotnost před a po kondicionaci a procentuální nárůst hmotnosti. Zde je důležité si uvědomit, že se jedná pouze o procentuální nárůst hmotnosti mezi dvěma stavy a ne o skutečný obsah vlhkosti v polymeru. Z tabulky je patrné, že procentuální přírůstek hmotnosti vlivem absorbované vody byl u všech vzorků přibližně stejný a pohyboval se okolo 1 %.

Určení skutečného obsahu vody v polymeru nebylo možné, neboť zkušební tělesa byla před samotnou kondicionací již delší dobu skladována⁸.

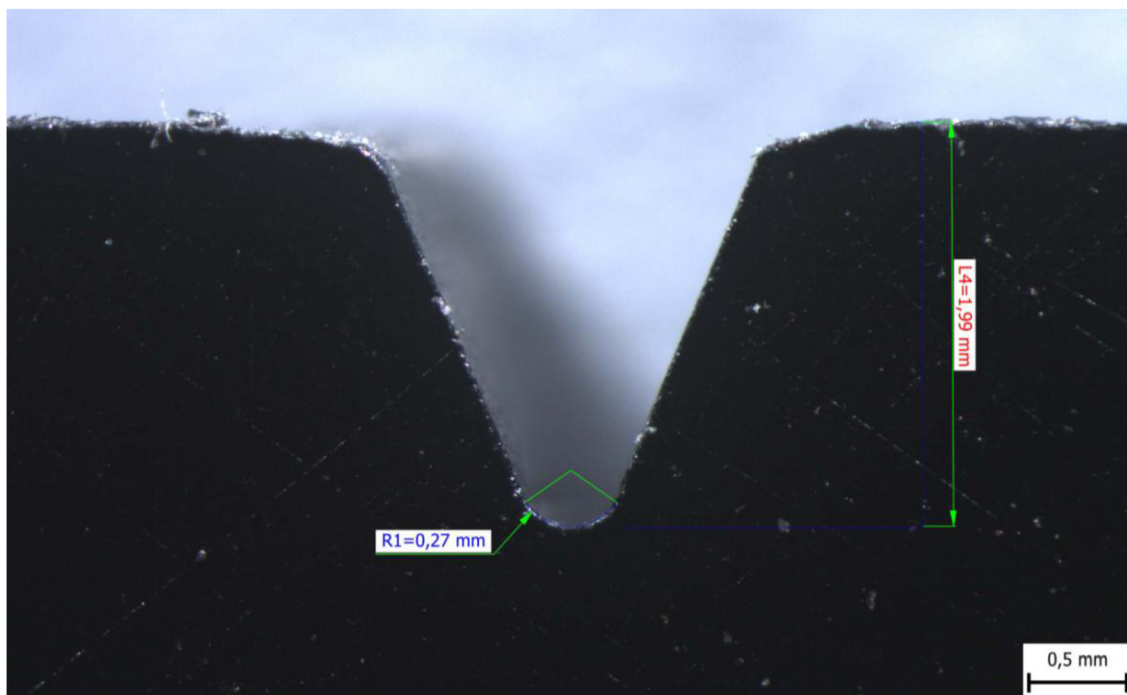
Tab. 3.1 Celkový hmotnostní přírůstek jednotlivých skupin těles během kondicionace

Typ vzorků	Hmotnost před kondicionací m_1 [g]	Hmotnost po kondicionaci m_2 [g]	Přírůstek hmotnosti Δm [g]	Procentuální nárůst [%]
Zkušební tělesa pro zkoušku typu Charpy				
S1(0 %)	5,231	5,288	0,057	1,09
S2(5,5 %)	4,940	4,994	0,054	1,10
S3(8 %)	4,785	4,838	0,053	1,11
S4(13 %)	4,523	4,569	0,046	1,02
S5(18 %)	4,288	4,332	0,044	1,03
Zkušební tělesa pro zkoušku tahem				
ST1 (0 %)	15,111	15,281	0,170	1,12
ST5 (18 %)	11,852	11,966	0,114	0,96

⁸ všechna zkušební tělesa byla nejprve vyrobena přibližně v květnu/červnu 2017 a dále skladována při pokojové teplotě a vlhkosti asi 6 měsíců. Následně byla postupně kondicionována a testována po jednotlivých sériích (listopad 2017 až leden 2018)

3.3 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa pro zkoušku na rázové houževnatosti byla dodána bez vrubu, do těles určených ke zkoušení vrubové houževnatosti byly před kondicionováním vyrobeny vruby frézováním. Následně byly vruby náhodně kontrolovány a hodnoceny pomocí stereomikroskopu. Kvalita jednotlivých vrubů se lišila, u některých vrubů byly pozorovány otřepy a stopy po obrábění, ale klíčové parametry jako hloubka vrubu, úhel nebo poloměr kořene vrubu byly dodrženy, viz obr. 3.3.



Obr. 3.3 Pohled na vrub pod stereomikroskopem

3.4 Zkouška tahem

Celkem bylo testováno osm zkušebních těles na každé hladině obsahu plynu v polymeru, celkem tedy 40 těles. Jako zkušební zařízení byl použit univerzální elektromechanický zkušební stroj Zwick Z250 Allround-Line.

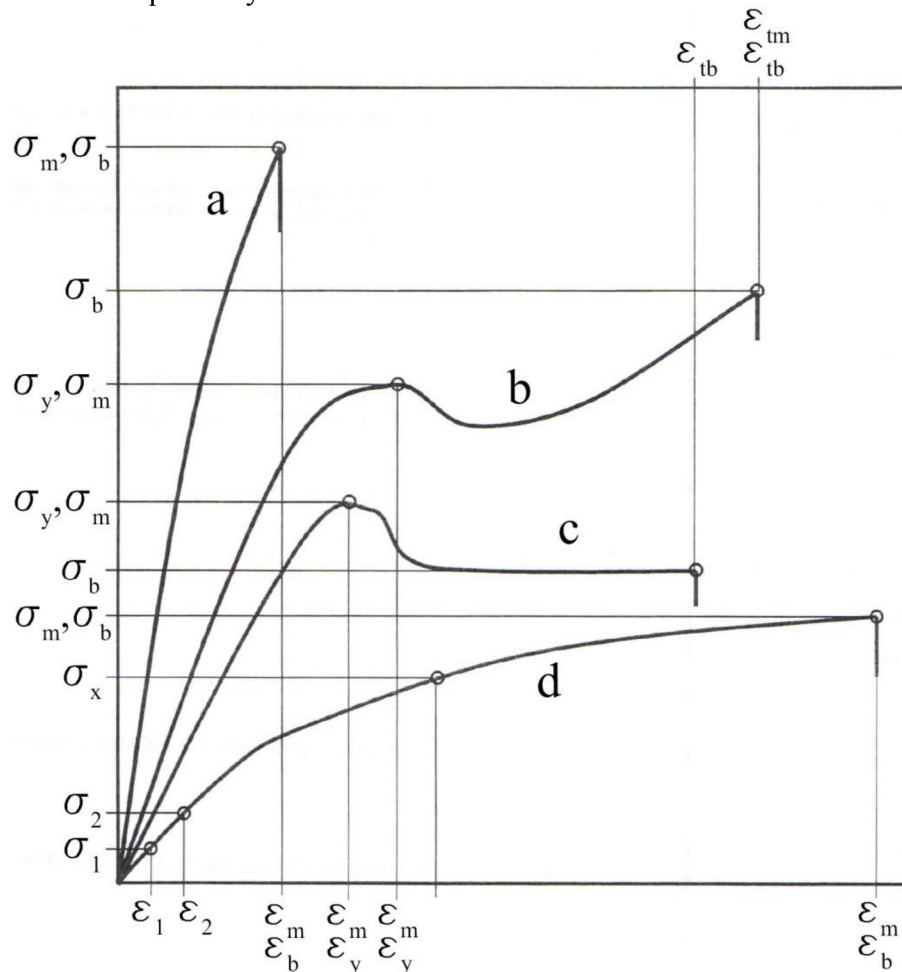
Pro měření deformačních charakteristik byl použit extenzometr. Zkušební rychlost byla volena dle normy pro všechna tělesa stejná a to $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, pouze pro počátek měření byla použita rychlost $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ z důvodu měření Youngova modulu pružnosti v tahu. Zkoušky byly ve všech případech provedeny při pokojové teplotě. [29, 30]

3.4.1 Měřené veličiny a typ tahových křivek

Podle normy ČSN EN ISO 527-1 je možné při tahové zkoušce polymerních materiálů naměřit čtyři různé průběhy tahových křivek, jak je zobrazeno v grafu na obrázku 3.4.

- křivka „a“ odpovídá tuhým křehkým materiálům, u nichž dochází k lomu při nízkých hodnotách poměrných deformací
- křivka „b“ odpovídá materiálům s mezí kluzu, u nichž je napětí při přetržení vyšší než napětí na mezi pevnosti
- křivka „c“ odpovídá materiálům s mezí kluzu, u nichž je napětí při přetržení nižší než napětí na mezi pevnosti

- křivka „d“ odpovídá měkkému materiálu, u něhož dochází k lomu při vysokých hodnotách poměrných deformací



Obr 3.4 Různé typy tahových křivek dle ČSN EN ISO 527-1[29]

Všechna testovaná tělesa vykazovala typ křivky „a“ tj. křehký materiál, vykazující porušení bez meze kluzu při nízkých hodnotách poměrných deformací dle normy ČSN EN ISO 527-1 [29]

Pro tento typ tahové křivky je možné určit následující veličiny:

- mez pevnosti σ_m [MPa]
- napětí při přetržení σ_b [MPa]
- poměrná deformace na mezi pevnosti ε_m [%]
- poměrná deformace při přetržení ε_b [%]
- modul pružnosti v tahu E_t [MPa]

Vzhledem ke tvaru tahové křivky (typ „a“) jsou si obě napěťové (σ_m , σ_b) i deformační (ε_m , ε_b) charakteristiky rovny, a proto budou dále vyhodnocovány pouze tři veličiny – napětí při přetržení (σ_b), poměrná deformace při přetržení (ε_b) a modul (E_t). Zmíněné charakteristiky mohou být určeny podle rovnic:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad (2)$$

$$E_t = \frac{\sigma_{0,0025} - \sigma_{0,0005}}{\varepsilon_{0,0025} - \varepsilon_{0,0005}} \quad (3)$$

kde:

- F_b síla při přetržení [N],
- A_0 obsah plochy průřezu zkušební tělesa [mm²],
- ΔL změna délky zkušební tělesa [mm],
- L_0 počáteční délka zkušební tělesa [mm],
- $\sigma_{0,0025}$ napětí odpovídají poměrné deformaci 0,0025 [MPa],
- $\sigma_{0,0005}$ napětí odpovídají poměrné deformaci 0,0005 [MPa],
- $\varepsilon_{0,0025}$ poměrná deformace 0,0025 [-],
- $\varepsilon_{0,0005}$ poměrná deformace 0,0005 [-].

3.4.2 Výsledky tahové zkoušky

V následující tabulce 3.2 jsou zaznamenány výsledky tahové zkoušky pro všechny hladiny obsahu plynu ve struktuře. Kromě již zmíněných veličin (σ_b , ε_b , E_t) jsou zde zaznamenány ještě výchozí rozměry zkušebních těles (šířka b_0 , tloušťka h_0) a obsah plochy průřezu A_0 . Tyto rozměry byly změřeny bezprostředně před zkouškou pomocí mikrometrického měřidla.

Pro každou hladinu obsahu plynu ve struktuře byly podle normy ČSN ISO 2602 určeny tři statistické veličiny – průměr \bar{x} , směrodatná odchylka s a levá hraniční hodnota jednostranného konfidenčního intervalu na hladině spolehlivosti 95 %⁹ u. [33]

Z výsledků uvedených v tabulce 3.2 je vidět, že s rostoucím obsahem plynu dochází k poklesu jak napěťových, tak deformačních charakteristik.

Grafická závislost průměrných hodnot napětí při přetržení, modulu pružnosti a poměrné deformace při přetržení je zobrazena na obrázku 3.5. Kromě průměrných hodnot obsahují grafy také směrodatné odchylky.

Z grafu na obrázku 3.5a je patrné, že modul pružnosti s rostoucím obsahem plynu klesá. Pokles se zdá být poměrně lineární, přičemž se zdá být patrný jistý skokový pokles mezi hladinou s nulovým obsahem plynu a hladinou následující (5,5 % plynu), zbývající body pro vyšší obsahy plynu leží na přímce. Směrodatná odchylka je poměrně vysoká, nejvyšší odchylka byla pozorována na druhé hladině obsahu plynu v polymeru (5,5 %), na následující hladině (8 %) byla naopak nejnižší.

⁹ jednostranný konfidenční interval určuje interval, který s danou pravděpodobností obsahuje výsledky jednotlivých měření za předpokladu, že statistický soubor má normální rozdělení. [33]

Tab. 3.2 Výsledky tahových zkoušek

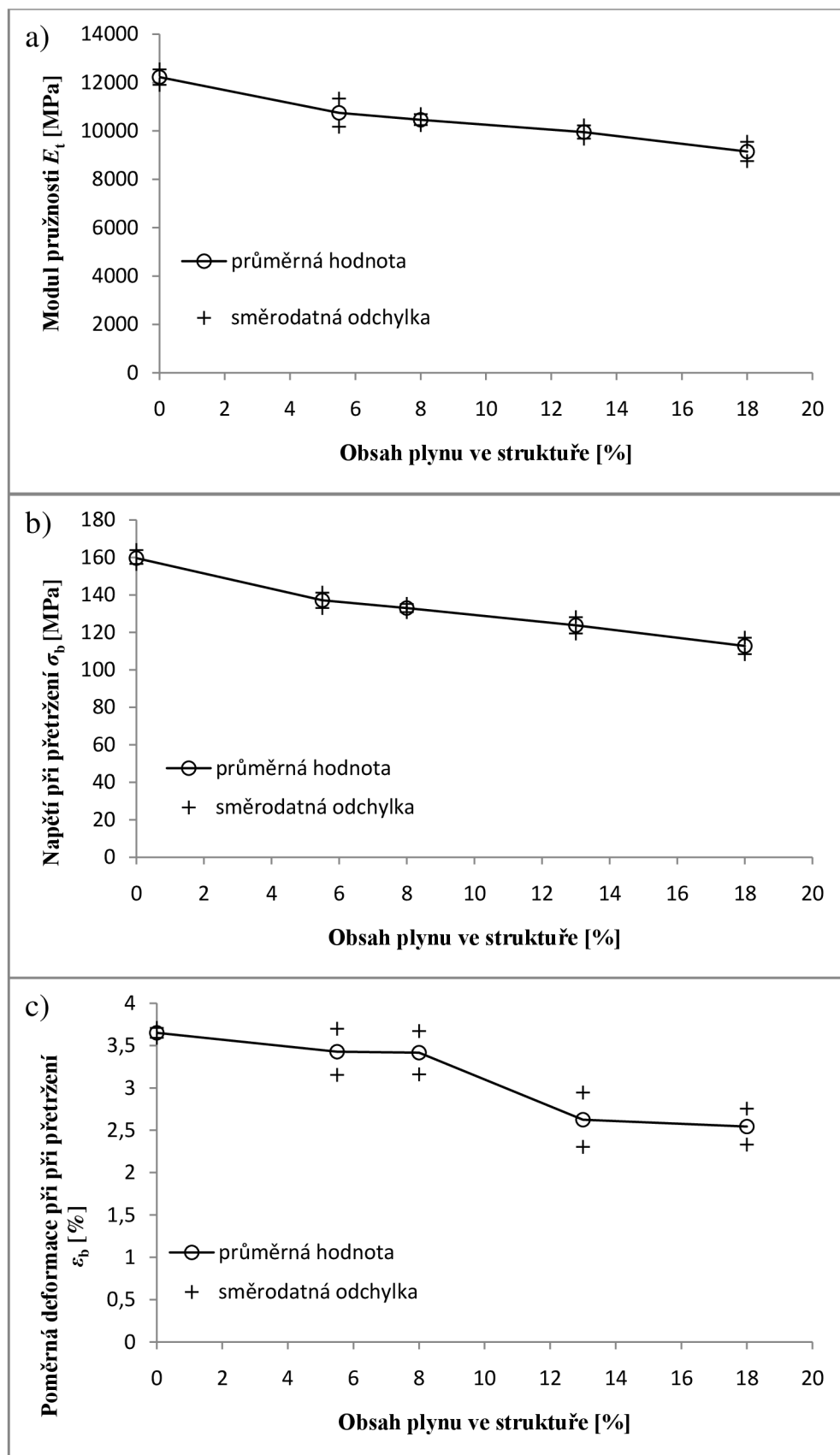
Značení vzorku	E_t	σ_b	ε_b	b_0	h_0	A_0
	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]	[mm]	[mm ²]
Obsah plynu 0 % ve struktuře						
S1-1	11900	155	3,66	10,17	4,179	42,49
S1-2	11800	158	3,71	10,24	4,173	42,73
S1-3	12500	164	3,7	10,21	4,162	42,51
S1-4	12600	166	3,55	10,23	4,181	42,77
S1-5	11900	158	3,71	10,19	4,189	42,69
S1-6	12200	159	3,66	10,22	4,178	42,71
S1-7	12400	157	3,6	10,26	4,183	42,92
S1-8	12500	160	3,62	10,24	4,164	42,64
\bar{x}	12225	160	3,65			
s	320	3,7	0,06			
u	12011	158	3,61			
Obsah plynu 5,5 % ve struktuře						
S2-1	10400	134	3,59	10,25	4,226	43,32
S2-2	10400	139	3,8	10,14	4,213	42,71
S2-3	10100	133	3,6	10,14	4,222	42,8
S2-4	10700	134	3,54	10,14	4,212	42,7
S2-5	11600	142	3,19	10,12	4,217	42,66
S2-6	10200	133	3,43	10,13	4,212	42,68
S2-7	11100	139	2,93	10,11	4,214	42,6
S2-8	11500	143	3,34	10,12	4,205	42,57
\bar{x}	10750	137	3,43			
s	583	4,1	0,27			
u	10359	134	3,25			
Obsah plynu 8 % ve struktuře						
S3-1	10400	134	3,25	10,14	4,225	42,82
S3-2	10900	135	3,64	10,13	4,208	42,61
S3-3	10700	130	2,96	10,13	4,22	42,74
S3-4	10400	136	3,55	10,11	4,227	42,73
S3-5	10400	130	3,73	10,14	4,208	42,66
S3-6	10200	134	3,47	10,13	4,22	42,76
S3-7	10300	133	3,52	10,13	4,211	42,67
S3-8	10400	132	3,22	10,19	4,225	43,05
\bar{x}	10463	133	3,42			
s	226	2,2	0,25			
u	10311	132	3,25			

Tab. 3.2 Výsledky tahových zkoušek – pokračování

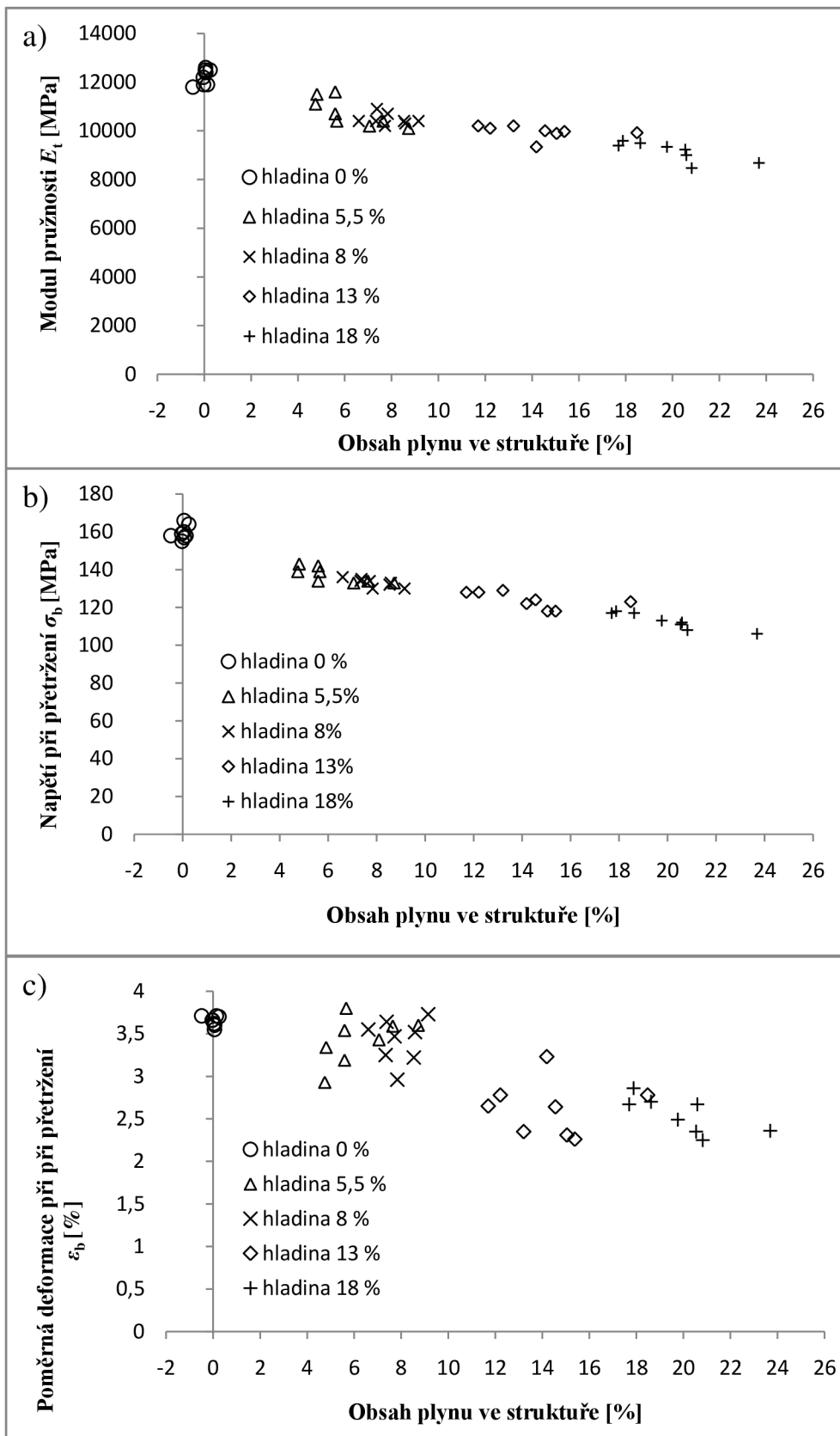
Značení vzorku	E_t	σ_b	ε_b	b_0	h_0	A_0
	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]	[mm]	[mm ²]
Obsah plynu 13 % ve struktuře						
S4-1	9340	122	3,23	10,22	4,224	43,18
S4-2	10100	128	2,78	10,22	4,223	43,17
S4-3	10200	128	2,65	10,22	4,237	43,32
S4-4	9890	118	2,31	10,24	4,245	43,46
S4-5	9920	123	2,78	10,2	4,207	42,92
S4-6	10200	129	2,35	10,22	4,22	43,11
S4-7	10000	124	2,64	10,2	4,229	43,14
S4-8	9970	118	2,26	10,21	4,225	43,12
\bar{x}	9953	124	2,54			
s	274	4,4	0,21			
u	9769	121	2,40			
Obsah plynu 18 % ve struktuře						
S5-1	9230	111	2,35	10,16	4,226	42,94
S5-2	9490	117	2,7	10,13	4,231	42,88
S5-3	9390	117	2,67	10,24	4,236	43,36
S5-4	8470	108	2,25	10,19	4,21	42,89
S5-5	8680	106	2,36	10,2	4,208	42,9
S5-6	9340	113	2,49	10,22	4,217	43,11
S5-7	9590	118	2,86	10,23	4,22	43,16
S5-8	9000	112	2,67	10,23	4,215	43,1
\bar{x}	9149	113	2,54			
s	399	4,4	0,21			
u	8881	110	2,40			

Podobná situace nastává i při pohledu na graf na obrázku 3.5b, kde napětí při přetržení opět lineárně klesá, s výjimkou prvních dvou hladin (0 % a 5,5 %), kde je možno pozorovat o něco výraznější skokový pokles. Při sledování směrodatných odchylek je situace stejná jako v předchozím případě, odchylka je největší na hladině obsahu plynu (5,5 %) a nejmenší na hladině následující (8 %).

Při sledování poměrné deformace při přetržení (3.5c) je situace mírně odlišná, neboť pokles ε_b zde nastává až na třetí hladině obsahu plynu (13 %), pro hodnoty obsahu plynu do 8 % naměřená poměrná deformace při přetržení téměř neklesá. Směrodatná odchylka je zde nízká zejména na první hladině (0 %), na ostatních hladinách byly naměřeny přibližně stejné směrodatné odchylky.



Obr. 3.5 Závislost mechanických vlastností na obsahu plynu ve struktuře a) modul pružnosti E_t , b) napětí při přetržení σ_b , c) poměrná deformace při přetržení ϵ_b



Obr. 3.6 Závislost mechanických vlastností na obsahu plynu ve struktuře jednotlivých těles
 a) modul pružnosti E_1 , b) napětí při přetržení σ_b , c) poměrná deformace při přetržení ϵ_b

Výsledky jednotlivých měření v závislosti na množství plynu

Před provedením samotné zkoušky tahem bylo všech 40 vzorků nejdříve zváženo. Hlavním důvodem tohoto vážení bylo sledování průběhu následné kondicionace, kromě toho bylo možné následně dopočítat obsah plynu v každém vzorku.

Tato nepřímá metoda určení obsahu plynu polymeru pracuje s předpokladem, že všechny vzorky mají stejný objem. Ve skutečnosti se objem jednotlivých vzorků může mírně lišit.

Závislost tří sledovaných veličin (E_t , σ_b , ε_b) na obsahu plynu ve struktuře jednotlivých zkušebních těles je uvedena v grafech na obrázku 3.6. Jako základní hladina pro polymer obsahující 0 % plynu byla zvolena hodnota získaná výpočtem z průměru hmotností deseti těles neobsahujících žádný plyn.

Z grafů je patrný poměrně velký rozptyl obsahů plynu pro jednotlivé vzorky, u většiny hladin dochází dokonce k překryvu (tj. některé vzorky z hladiny obsahu plynu 5,5 % obsahují ve skutečnosti více plynu, než vzorky z hladiny pro obsah plynu 8 % a podobně). Z těchto pozorování plyne, že u technologie MuCell nelze volit obsah plynu zcela přesně, neboť je zde jistý rozptyl obsahu plynu (přibližně 2 %, u vyšších obsahů plynu i více).

3.5 Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy

Celkem bylo testováno 200 ks zkušebních těles, typy a počty těles jsou uvedeny na začátku 3. kapitoly diplomové práce. Jelikož se jednalo o neinstrumentovanou rázovou zkoušku, byla stanovena rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu a_{cU} [kJ/m²], případně rázová houževnatost zkušebních těles opatřených vrubem a_{cN} [kJ/m²], tzv. vrubová houževnatost. [31]

Tyto charakteristiky byly určeny dle rovnic uvedených v normě ČSN EN ISO 179-1 [31] jako:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \times 10^3, \quad (4)$$

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \times 10^3, \quad (5)$$

$$E_c = E_M - E_z, \quad (6)$$

kde:

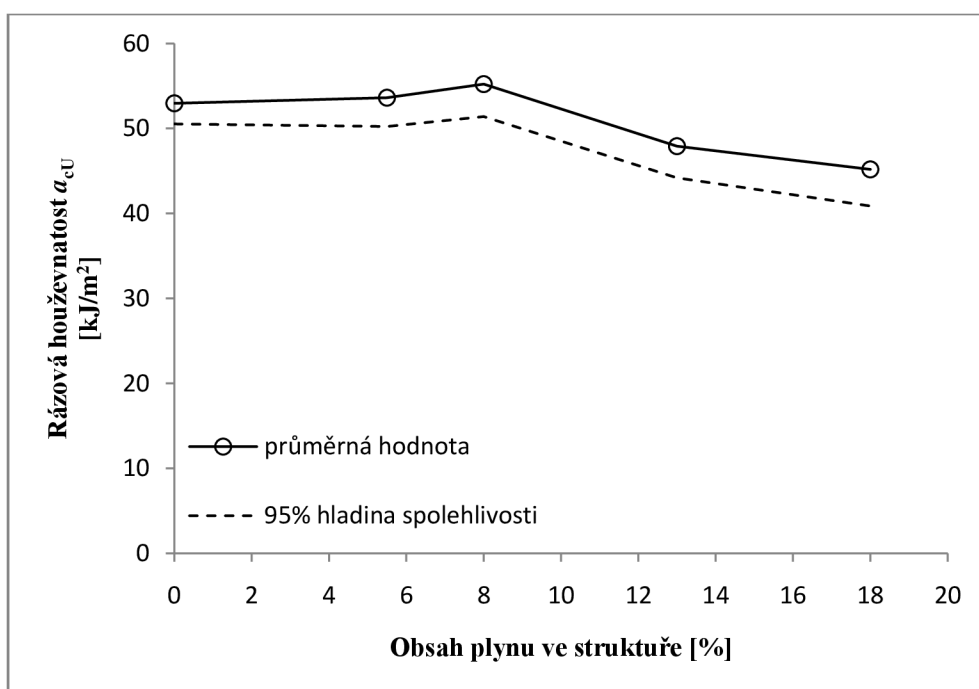
E_c	korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa [J],
h	tloušťka zkušebního tělesa [mm],
b	šířka zkušebního tělesa [mm],
b_N	šířka zkušebního tělesa pod vrubem [mm],
E_M	energie naměřená na Charpyho kladivu [J],
E_z	ztrátová energie Charpyho kladiva [J].

Ve všech případech se jednalo o ráz na užší stranu zkušebního tělesa (tzv. „edgewise“), u vrubovaných těles odpovídal vrub typu A. Ke zkoušce bylo použito neinstrumentované rázové kladivo Heckert PSd 50/15 s energetickou kapacitou 15 J a dopadovou rychlostí 3,8 m/s.

3.5.1 Zkouška na tělesech bez vrubu za pokojové teploty (+23 °C)

Bylo provedeno 50 zkoušek na tělesech bez vrubu při pokojové teplotě, na každou hladinu obsahu plynu tedy připadlo 10 zkušebních těles. Naměřené hodnoty nárazové práce byly korigovány z důvodu ztrátové energii kladiva (dle rov. 6) a poté podle rov. (4) přepočteny na rázovou houževnatost kJ/m^2 . Kompletní výsledky měření jsou vzhledem k velkému rozsahu uvedeny v příloze 3 této práce.

Pro každou hladinu obsahu plynu ve struktuře byla určena průměrná hodnota rázové houževnatosti zkušebních těles a tyto hodnoty byly následně vyneseny do grafu na obrázku 3.7. V grafu jsou uvedeny rovněž hranice jednostranných konfidenčních intervalů na hladině spolehlivosti 95 %. Je patrné, že pro hladiny 5,5 % a 8 % obsahu plynu dochází k mírnému nárůstu rázové houževnatosti. Vysvětlení tohoto chování může spočívat ve vysokém rozptylu experimentálních hodnot, čemuž odpovídají i hodnoty získané z konfidenčních intervalů. Tato skutečnost je patrná zejména u prvních tří hladin obsahu plynu v polymeru, kde průměrná naměřená hodnota roste, zatímco mezní hodnota konfidenčního intervalu se téměř nemění (mezi první a druhou hladinou dochází dokonce, na rozdíl od průměrné hodnoty, k mírnému poklesu).



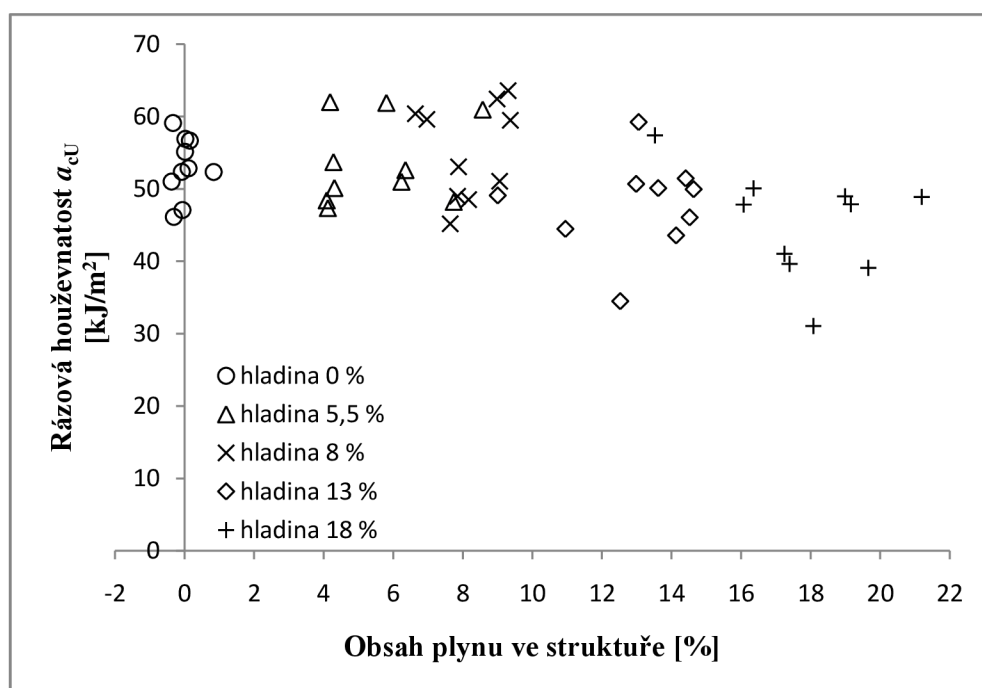
Obr. 3.7 Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu v závislosti na obsahu plynu v polymeru

Výsledné průměrné hodnoty rázové houževnatosti jsou uvedeny v tabulce 3.3 spolu se směrodatnou odchylkou této veličiny a jejím jednostranným konfidenčním intervalem.

Podobně jako v případě zkoušek tahem byly do grafu vyneseny i výsledky jednotlivých měření v závislosti na množství plynu. I zde dochází k překrývání některých hladin obsahu plynu ve struktuře, viz obrázek 3.8. Vedle zmíněného překryvu je patrný velký rozptyl hodnot rázové houževnatosti.

Tab. 3.3 Statistické vyhodnocení výsledků měření rázové houževnatosti na tělesech bez vrubu při teplotě +23 °C

Rázová houževnatost a_{cU} [kJ/m ²]			
obsah plynu ve struktuře [%]	průměr \bar{x} [kJ/m ²]	směrodatná odchylka s [kJ/m ²]	interval u [kJ/m ²]
0	52,96	4,18	50,58
5,5	53,63	5,85	50,29
8	55,22	6,60	51,46
13	47,91	6,44	44,24
18	45,19	7,46	40,94



Obr. 3.8 Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu v závislosti na obsahu plynu v jednotlivých tělesech

3.5.2 Zkouška na tělesech bez vrubu za snížené teploty (−30 °C)

Ochlazování těles pro rázové zkoušky při teplotě −30 °C probíhalo v hlubokomrazícím boxu Fryka B35-50. Jednotlivé série zkušebních těles byly před vlastní zkouškou v boxu umístěny po dobu cca 30 minut kvůli dosažení stejné teploty v celém objemu materiálu těles.

Celkem bylo testováno 50 kusů vzorků, deset pro každou hladinu obsahu plynu. Z výsledků testů byly určeny průměrné hodnoty rázové houževnatosti, které byly doplněny o hraniční hodnoty konfidenčních intervalů na hladině spolehlivosti 95 %, viz obrázek 3.9.

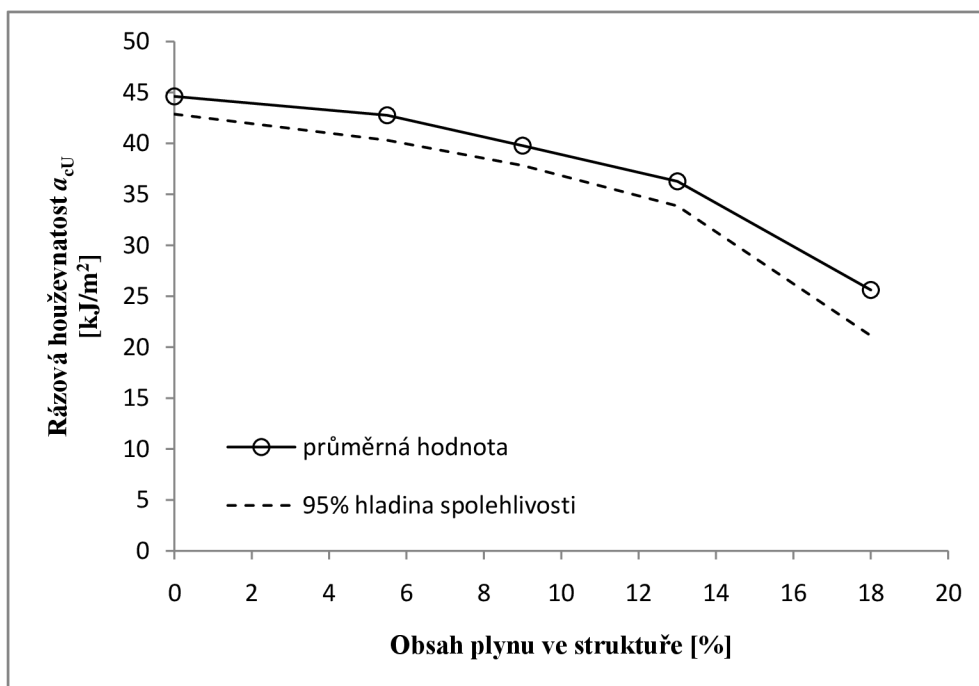
V tabulce 3.4 jsou pro porovnání uvedeny hodnoty rázové houževnatosti za pokojové a snížené teploty. Je patrné, že s poklesem teploty dochází k poklesu hodnot rázové houževnatosti, přičemž difference se zvětšuje s rostoucím obsahem plynu ve struktuře polymeru. Současně dochází, u zkoušek za snížených teplot, k vymizení intervalu, ve

kterém rázová houževnatost neklesala (hladiny 5,5 % a 8 %) nebo dokonce mírně rostla. Procentuální pokles hodnot rázové houževnatosti a_{cU} uvedený v tabulce 3.4 byl vypočten podle rov. (7) jako:

$$pokles = 100 - \frac{100}{a_{cU+23^{\circ}C}} \cdot a_{cU-30^{\circ}C} \quad (7)$$

Tab. 3.4 Porovnání rázové houževnatosti při teplotách +23 °C a -30 °C

Rázová houževnatost a_{cU} [kJ/m ²]					
obsah plynu [%]	0	5,5	8	13	18
a_{cU} [kJ/m ²] +23 °C	52,96	53,63	55,22	47,91	45,19
a_{cU} [kJ/m ²] -30 °C	44,61	42,76	39,78	36,27	25,62
pokles [%]	15,8	20,3	28	24,3	43,3



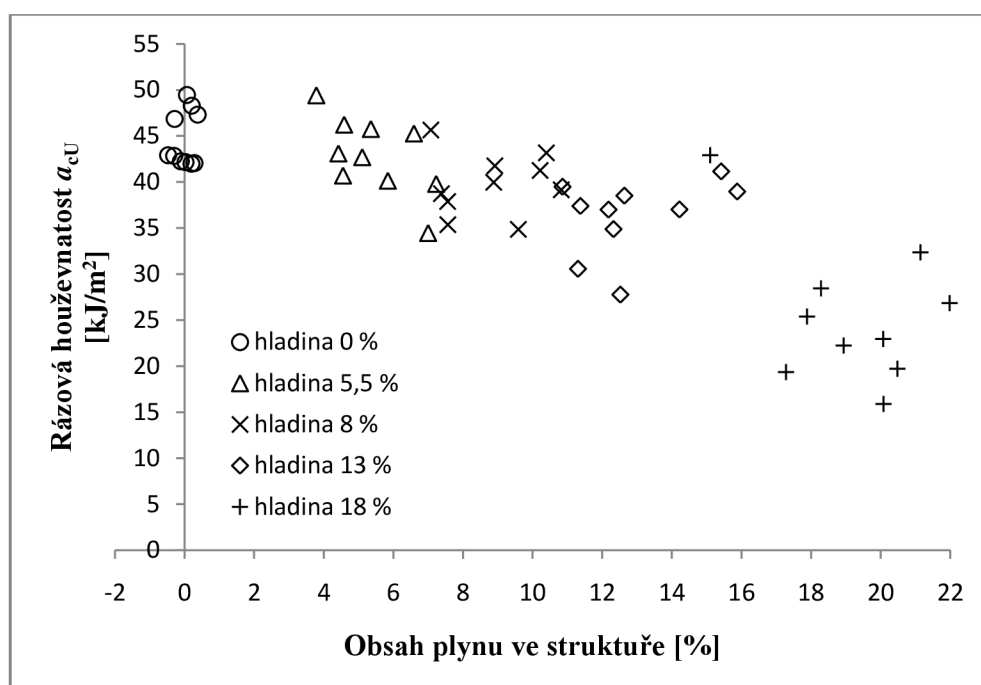
Obr. 3.9 Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu v závislosti na obsahu plynu v polymeru při teplotě -30 °C

Kromě průměrných hodnot rázové houževnatosti pro jednotlivé hladiny obsahu plynu a jednostranných konfidenčních intervalů byly určeny i směrodatné odchylky, podobně jako v předchozích případech. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.5. Pokud data z této tabulky porovnáme s údaji v tabulce 3.3, získanými při zkouškách za pokojové teploty, můžeme si všimnout mírného poklesu hodnot směrodatných odchylek, s výjimkou nejvyšší hladiny obsahu plynu.

Tab. 3.5 Statistické vyhodnocení výsledků měření rázové houževnatosti na tělesech bez vrubu při teplotě $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Rázová houževnatost a_{cU} [kJ/m^2]			
obsah plynu ve struktuře [%]	průměr \bar{x} [kJ/m^2]	směrodatná odchylka s [kJ/m^2]	interval u [kJ/m^2]
0	44,61	2,99	42,91
5,5	42,76	4,23	40,35
8	39,78	3,35	37,87
13	36,78	4,16	33,90
18	25,62	7,75	21,20

V grafu na obr. 3.10 je uvedena závislost hodnot rázové houževnatosti na obsahu plynu v polymeru pro všechna měřená tělesa zkoušená při teplotě $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 3.10 Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu v závislosti na obsahu plynu v jednotlivých tělesech při teplotě $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Překryv obsahů plynu ve struktuře jednotlivých zkušebních těles zde není tak výrazný, jako u těles, na kterých byla zkouška provedena za pokojové teploty. Dále je možné vidět, že na poslední hladině byly naměřeny jak některé velmi nízké hodnoty rázové houževnatosti (nejnižší hodnota 15 kJ/m^2), tak hodnoty víc než dvojnásobné v porovnání s hodnotou nejnižší (viz vysoká směrodatná odchylka pro poslední hladinu obsahu plynu ve struktuře tab. 3.5). Tabulka s kompletními číselnými výsledky jednotlivých měření je k dispozici v příloze číslo 3 diplomové práce.

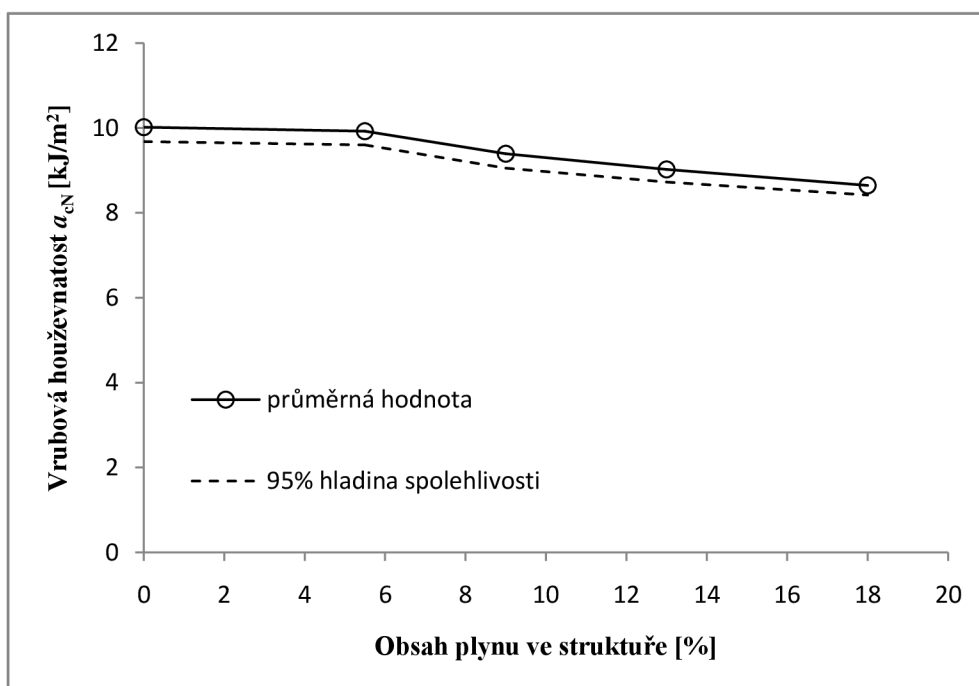
3.5.3 Zkouška na tělesech s vrubem za pokojové teploty (+23 °C)

Stejně jako v předchozích případech bylo zkušeno celkem 50 zkušebních těles, deset těles pro každou hladinu obsahu plynu v polymeru. Tvar vrubu odpovídal typu A podle normy ČSN EN ISO 179-1 [31] a vyhodnocovanou veličinou byla rázová houževnatost Charpy zkušebních těles opatřených vrubem a_{cN} , někdy označovaná také jako vrubová houževnatost Charpy. Stejně jako v předchozích dvou případech byly naměřené hodnoty energií korigovány z důvodu ztrátové energie kladiva a následně přepočteny na kJ/m^2 podle rov. (5).

V grafu na obrázku 3.11 jsou uvedeny průměrné hodnoty vrubové houževnatosti pro jednotlivé hladiny obsahu plynu a dále hraniční hodnota konfidenčního intervalu na hladině spolehlivosti 95 %.

Z grafu je možno vyzorovat jistou podobnost se závislostí, uvedenou na obrázku 3.7 (rázová houževnatost +23 °C). Vrbová houževnatost nejprve téměř neklesá (hladina 5,5 % obsahu plynu), při dále se zvyšujícím obsahu plynu již dochází k jistému, i když nepříliš velkému poklesu naměřených hodnot. Dále je možné si všimnout, že hraniční hodnota intervalu spolehlivosti leží blízko průměrných hodnot pro jednotlivé hladiny, což signalizuje malý rozptyl měření a poměrně nízké hodnoty směrodatných odchylek.

Tyto odchylky jsou spolu s průměrnými hodnotami vrubové houževnatosti a hraničními hodnotami konfidenčních intervalů zaznamenány v tabulce 3.6. Směrodatné odchylky se ve všech případech pohybují okolo 5 % naměřené hodnoty a s rostoucím obsahem plynu mírně klesají, což je opačný trend, než který byl pozorován u nevrubovaných těles.



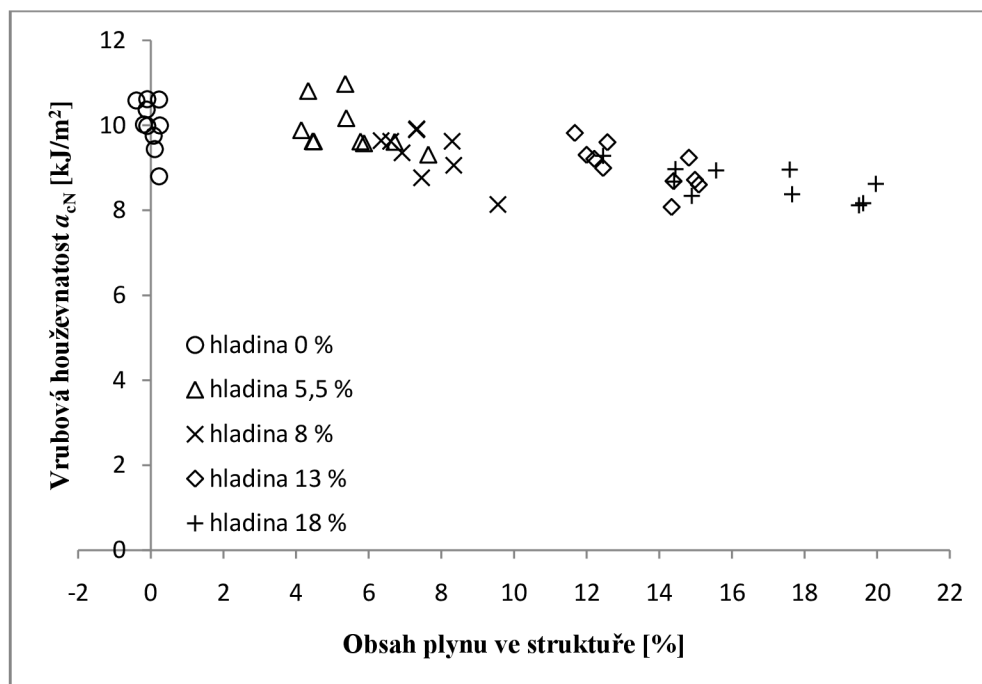
Obr. 3.11 Vrbová houževnatost Charpyho těles s vrubem v závislosti na obsahu plynu v polymeru

Podobně jako u nevrubovaných těles byly vyneseny výsledky jednotlivých měření do samostatného grafu (obr. 3.12). Opět je zde patrný výrazný překryv obsahu plynu ve struktuře jednotlivých těles z různých hladin obsahu plynu.

Tab. 3.6 Statistické vyhodnocení výsledků měření vrubové houževnatosti na tělesech s vrubem při teplotě +23 °C

Vrubová houževnatost a_{cN} [kJ/m ²]			
obsah plynu [%]	průměr \bar{x} [kJ/m ²]	směrodatná odchylka s [kJ/m ²]	interval u [kJ/m ²]
0	10,02	0,58	9,68
5,5	9,92	0,56	9,60
8	9,39	0,58	9,05
13	9,02	0,52	8,72
18	8,65	0,38	8,42

Dále je zde dobře patrný již zmiňovaný relativně nízký rozptyl naměřených hodnot, což je rozdíl oproti hodnotám rázové houževnatosti nevrubovaných těles (obr. 3.8), kde zejména na poslední (nejvyšší) hladině obsahu plynu v polymeru byly některé naměřené hodnoty velmi nízké v porovnání s průměrnou hodnotou.

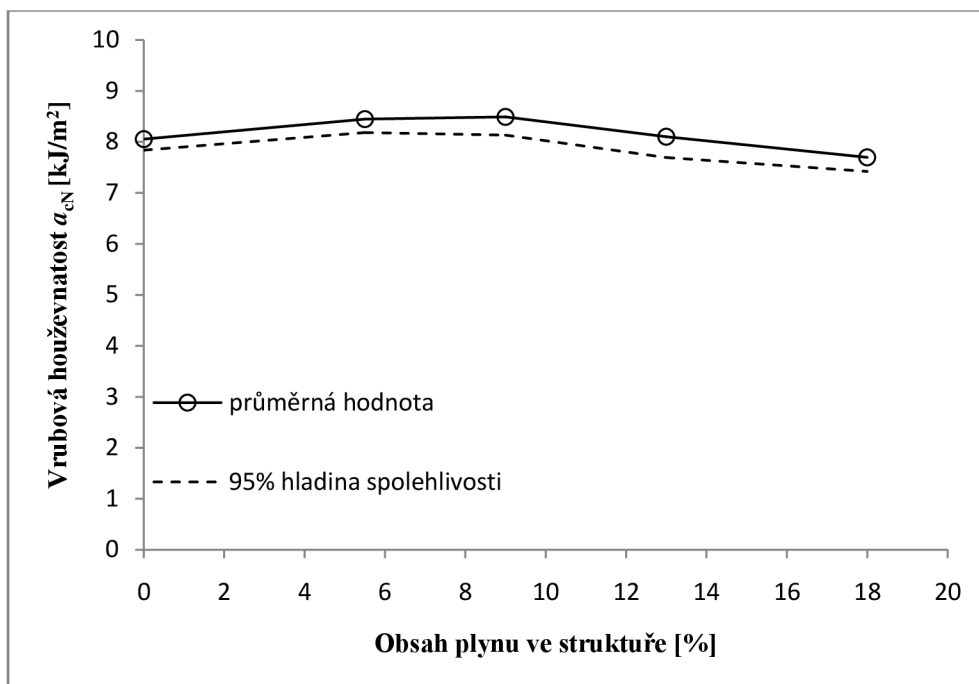


Obr. 3.12 Vrubová houževnatost zkušebních těles s vrubem v závislosti na obsahu plynu v jednotlivých tělesech

3.5.4 Zkouška na tělesech s vrubem za teploty (-30 °C)

Stejně jako v případě nevrubovaných zkušebních těles probíhalo ochlazování experimentálního materiálu v hlubokomrazicím boxu (Fryka B35-50) s výdrží na požadované teplotě přibližně 30 minut.

Pro jednotlivé hladiny obsahu plynu v polymeru byly určeny průměrné hodnoty vrubové houževnatosti, které jsou zobrazeny v grafu na obr. 3.13 spolu s mezními hodnotami konfidenčních intervalů.



Obr. 3.13 Vrubová houževnatost zkušebních těles s vrubem v závislosti na obsahu plynu při teplotě $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Z grafu je patrné, že se hodnoty měřené veličiny s rostoucím obsahem plynu téměř nemění. Tato skutečnost může být způsobena tím, že naměřené hodnoty jsou již velmi malé vzhledem k výchozí energii použitého zkušebního zařízení (Charpyho kladiva).

V porovnání s tělesy zkoušenými za normální teploty (obr. 3.11) došlo k poklesu hodnot vrubové houževnatosti (viz tab. 3.7) podobně jako tomu bylo v případě nevrubovaných těles.

Tab. 3.7 Porovnání vrubové houževnatosti při teplotách $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

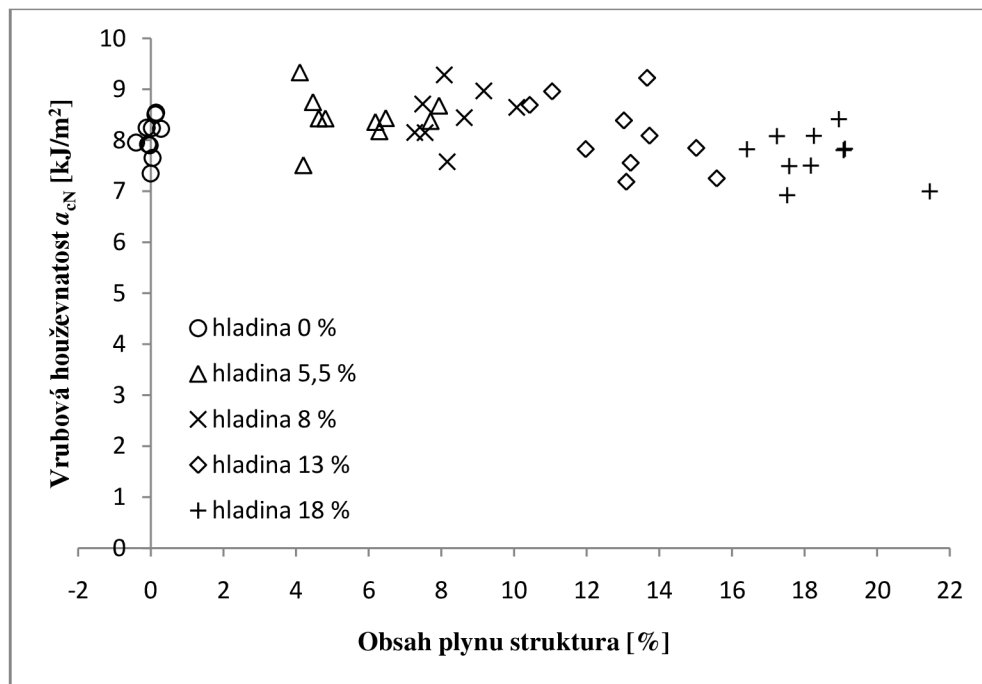
Vrubová houževnatost a_{cN} [kJ/m ²]					
obsah plynu [%]	0	5,5	8	13	18
a_{cN} [kJ/m ²] $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$	10,02	9,92	9,39	9,02	8,65
a_{cN} [kJ/m ²] $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$	8,05	8,45	8,49	8,10	7,70
pokles [%]	19,61	14,86	9,59	10,23	10,99

Stejně jako v předchozích případech byla sestavena tabulka obsahující průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a hraniční hodnoty konfidenčních intervalů vrubové houževnatosti pro jednotlivé hladiny obsahu plynu ve struktuře materiálu (tab. 3.8).

Tab. 3.8 Statistické vyhodnocení výsledků měření vrubové houževnatosti na tělesech s vrubem při teplotě $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Vrubová houževnatost a_{cN} [kJ/m^2]			
obsah plynu [%]	průměr \bar{x} [kJ/m^2]	směrodatná odchylka s [kJ/m^2]	interval u [kJ/m^2]
0	8,05	0,37	7,84
5,5	8,45	0,46	8,18
8	8,49	0,53	8,13
13	8,10	0,70	7,69
18	7,70	0,47	7,42

Podobně jako v předchozích případech byl sestrojen graf závislosti měřené veličiny na vypočteném obsahu plynu pro jednotlivá zkušební tělesa (obr. 3.14). Je patrné, že zde došlo k překryvu obsahu plynu některých těles z různých hladin, podobně jako ve většině ostatních případů.

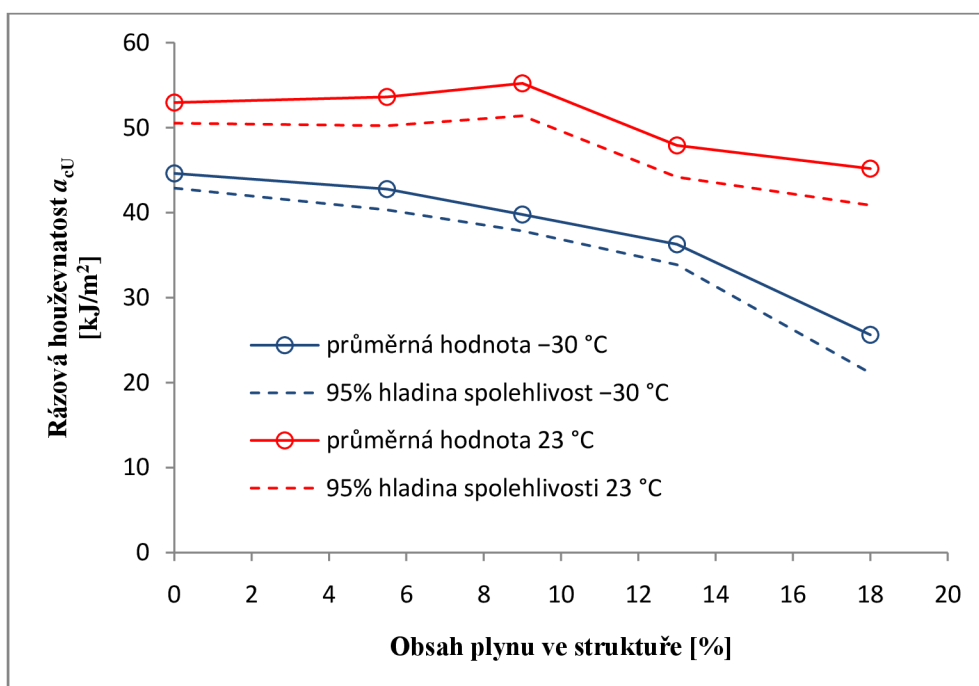


Obr. 3.14 Vrubová houževnatost zkušebních těles s vrubem v závislosti na obsahu plynu v jednotlivých tělesech při teplotě $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.5.5 Porovnání výsledků získaných při pokojových a nízkých teplotách

Ačkoliv již byly v předchozích odstavcích výsledky zkoušek při +23 °C a -30 °C porovnány a částečně okomentovány, tak je vhodné poskytnout ještě grafická srovnání v samostatných grafech.

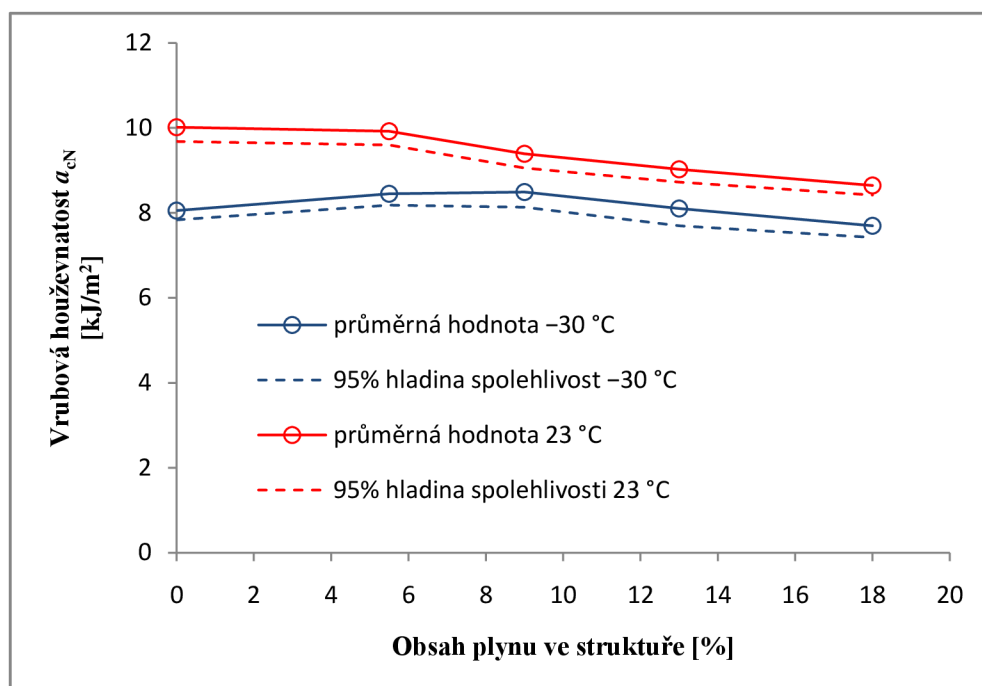
Do grafu na obrázku 3.15 byly vyneseny hodnoty rázové houževnatosti zkušebních těles pro jednotlivé hladiny obsahu plynu při obou zkoumaných teplotách, v podstatě se tedy jedná o kombinaci grafů z obrázků 3.7 a 3.9. Při porovnávání závislosti rázové houževnatosti na množství plynu ve struktuře polymeru na obrázku 3.15 je vidět, že naměřené hodnoty klesají se vzrůstajícím obsahem plynu výrazněji u těles zkoušených při teplotě -30 °C.



Obr. 3.15 Porovnání průběhů rázové houževnatosti v závislosti na obsahu plynu v polymeru při teplotách +23 °C a -30 °C

Podobný graf byl vytvořen i pro vrubovaná tělesa, na kterých byla testována vrubová houževnatost, tento graf je zobrazen na obrázku 3.16. Jak již bylo zmíněno, tak vrubová houževnatost těles testovaných při -30 °C se při zvyšujícím obsahu plynu příliš nemění, dalo by se tedy konstatovat, že situace je zde opačná jako na předchozím obrázku (obr. 3.15). U vrubovaných těles platí, že závislost vrubové houževnatosti na obsahu plynu ve struktuře je vyšší při pokojové teplotě, neboť zde dochází k poklesu naměřených hodnot, zatímco u těles testovaných při -30 °C je pokles sotva patrný.

Z grafů na obrázcích 3.15 a 3.16 je možno vyvodit, že vrubovaná tělesa nejsou obecně tolik citlivá na obsah plynu v polymeru, jako tělesa bez vrubu (rázová houževnatost Charpy zkušebních těles s vrubem klesá se zvyšujícím se obsahem plynu pomaleji než u těles bez vrubu).



Obr. 3.16 Porovnání průběhů vrubové houževnatosti v závislosti na obsahu plynu v polymeru při teplotách $+23\text{ }^\circ\text{C}$ a $-30\text{ }^\circ\text{C}$

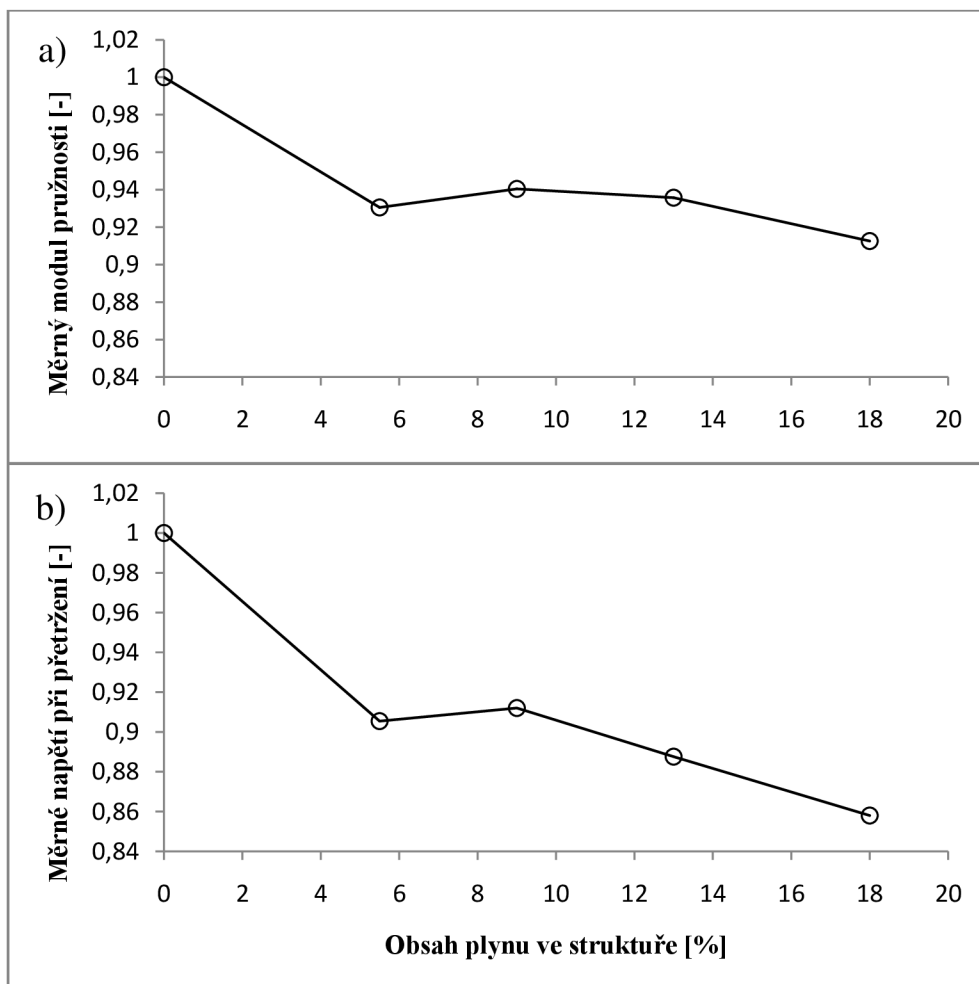
4 DISKUZE

Na základě výsledků zkoušky tahem lze konstatovat, že všechny měřené napěťové i deformační charakteristiky (mez pevnosti, Youngův modul a poměrná deformace při přetržení) s rostoucím obsahem plynu klesají. Podobné výsledky lze dohledat i v dostupné literatuře. [34, 35]

Při tahových zkouškách polymerních mikrobuněčných pěn na bázi polystyrenu (PS) připravených pomocí technologie MuCell byl zjištěn pokles meze pevnosti oproti čistému materiálu. [34]

Situace je podobná i při výrobě polymerní pěny na bázi polymléčné kyseliny (PLA) pomocí chemického nadouvadla (azodicarbonamid). Opět zde dochází k poklesu meze pevnosti materiálu, dále klesá i poměrné prodloužení při přetržení a Youngův modul. [35]

Vzhledem ke snižující se hustotě pěny se vzrůstajícím množstvím plynu ve struktuře bývají často používány pojmy jako měrná pevnost nebo měrný Youngův modul. Tyto charakteristiky jsou určovány jako podíl dané charakteristiky a hustoty materiálu a následně mohou být přepočteny vzhledem k výchozí hladině¹⁰ (viz obr. 4.1)



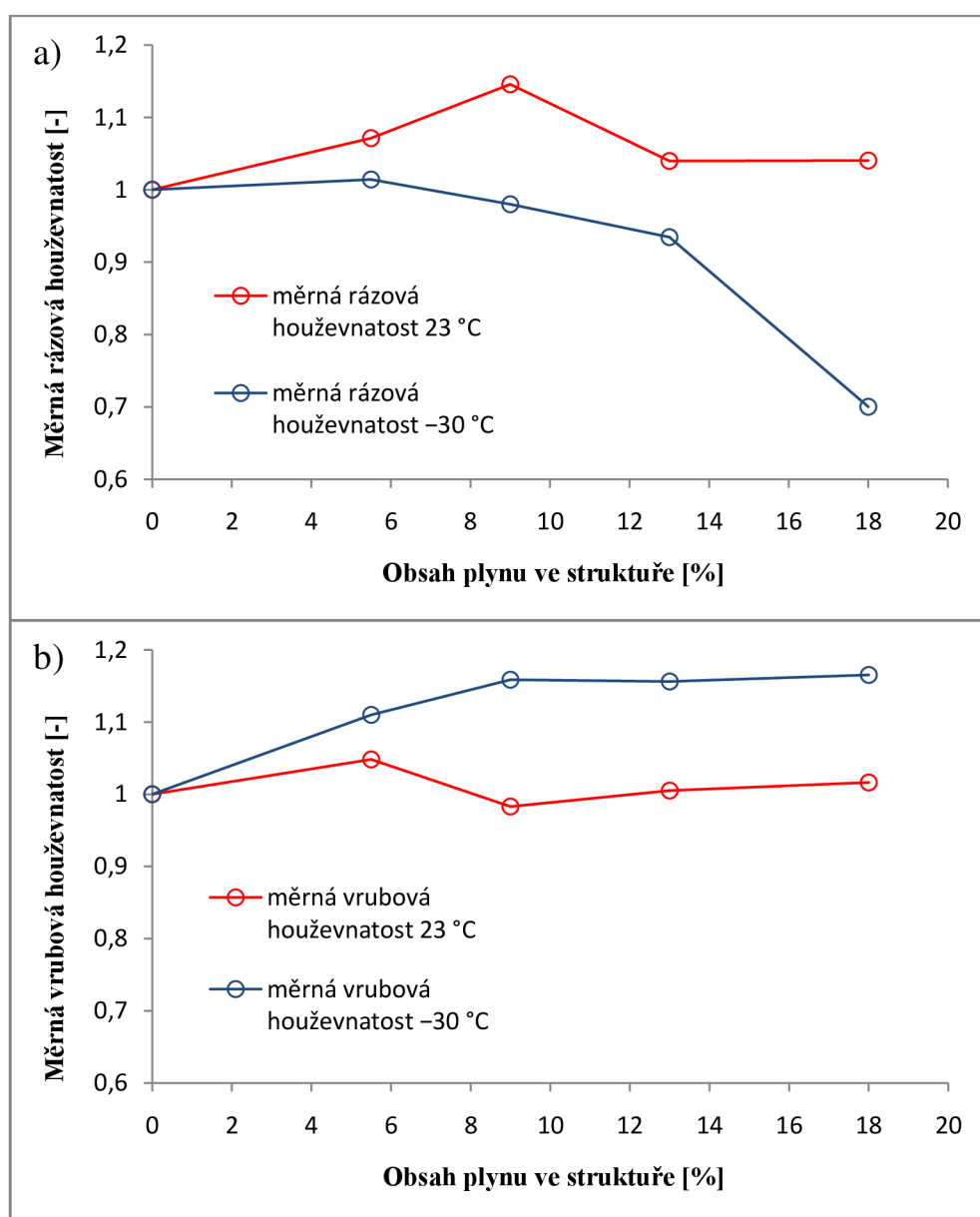
Obr. 4.1 Závislost měrného modulu pružnosti a) a měrného napětí při přetržení b) na obsahu plynu ve struktuře

¹⁰ hodnoty jsou přepočteny tak, aby zvolená charakteristika byla rovna jedné pro hladinu neobsahující žádný plyn

Z obrázku 4.1 je patrné, že i měrné veličiny (modul a napětí při přetržení) se vzrůstajícím obsahem plynu klesají, přičemž je možno pozorovat jistý skokový pokles mezi základním materiálem bez plynu a první hladinou (5,5 % plynu ve struktuře).

Pozorovaný pokles měrných veličin koresponduje s výsledky uvedenými v pracích [35, 34, 36]. Ačkoliv se typy polymerních materiálů i způsoby přípravy pěny vzájemně lišily, ve všech případech byl zaznamenán pokles meze pevnosti oproti základnímu nevypěněnému materiálu [34, 35, 36]. Ve většině případů došlo současně i k poklesu modulu pružnosti [34, 35, 36], avšak objevilo se i několik výjimek, kdy měrný modul pružnosti oproti základnímu materiálu mírně vzrostl [35].

Při měření rázové a vrubové houževnatosti nebyl pokles měřených charakteristik mezi jednotlivými hladinami v některých případech příliš patrný. Při přepočtení na měrné veličiny (měrná rázová a měrná vrubová houževnatost) je tento jev ještě víc patrný, jak je vidět na obrázku 4.2.



Obr. 4.2 Závislost měrné rázové a) a vrubové b) houževnatosti na obsahu plynu ve struktuře

Z obrázku 4.2 je vidět, že situace je zde, oproti měrným veličinám určeným z tahové zkoušky, poněkud komplikovanější a méně jednoznačná. Z průběhu křivek zobrazených v grafu na obr. 4.2 nelze vyslovit jednoznačný závěr o vlivu obsahu plynu ve struktuře na měrnou rázovou a vrubovou houževnatost.

Tyto výsledky opět korespondují s údaji zjištěnými z dostupné literatury [34, 35], kde u některých zkušebních těles docházelo k nárůstu měrné rázové houževnatosti.

Efekt nárůstu rázové houževnatosti mikrobuněčných polymerních pěnových materiálů velmi pravděpodobně závisí na velikosti, struktuře a distribuci jednotlivých pórů [35]. Pokud jsou póry dostatečně malé tj. menší než již existující defekty v polymeru, tak může dojít k úspoře hmotnosti bez negativního ovlivnění mechanických vlastností [34]. V určitých případech mohou póry přispívat k zastavení šířících se trhlin v materiálu pomocí otupení špiček trhlin [34]. V práci Colliase je dokonce možné setkat se s pojmem zhouževnatění pomocí mikrobuněčných pěn [37].

Na základě vlastního měření i studia poznatků z literatury [34, 35] je možné konstatovat, že negativní vliv obsahu plynu v polymeru na charakteristiky získané ze zkoušky tahem je pro nižší obsahy plynu částečně kompenzován mírným nárůstem měrné rázové a vrubové houževnatosti v důsledku jevů popsaných v předcházejícím odstavci.

Při pohledu na grafy zobrazené na obrázcích 4.1 a 4.2 je dále patrné, že vysoký obsah plynu (20 % a více) má na mechanické vlastnosti negativní efekt.

Pokud by měl být na základě provedených experimentů stanoven vhodný obsah plynu pro optimální kombinaci odlehčení a zachování mechanických vlastností, tak by se tento obsah plynu pohyboval kolem 10 %. Zde je však nutné připustit, že existují i jiné způsoby, jak odlehčit zkoumaný materiál (termoplast na bázi PPA vyztužený 50% obsahem skelných vláken), například pomocí snížení obsahu skelných vláken.

5 ZÁVĚR

V rámci teoretické části práce byl předložen obecný rozbor polymerních materiálů se zaměřením na polyamidy vyztužené pomocí vláken, včetně popisu těchto vláken (skelná, uhlíková, polymerní). V další části byla věnována pozornost technologii injekčního vstřikování se zaměřením na technologii MuCell a vstřikování polymerních kompozitů s vysokým obsahem plniva.

V praktické části práce byly provedeny zkoušky tahem na zkušebních tělesech s odstupňovaným obsahem plynu, dále byla testována rázová houževnatost vrubovaných i nevrubovaných těles. V případě zkoušek rázové houževnatosti bylo přistoupeno, kromě testování za pokojové teploty, i ke zkouškám za teploty $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Byl zjištěn pokles mechanických vlastností s rostoucím obsahem plynu ve struktuře, jehož průběh se lišil v závislosti na sledované vlastnosti, typu zkoušky a teplotě. Na základě měření byl stanoven ideální obsah plynu na hodnotu přibližně 10 %.

Při zvažování zavedení technologie MuCell do výroby je kromě poklesu mechanických vlastností nutné zvážit i další faktory, například nižší kvalitu povrchu výsledných výrobků a naopak využít další vlastnosti charakteristické pro pěnové materiály, jako je například nižší tepelná vodivost nebo schopnost dobře absorbovat energii.

Pro další studium mechanických vlastností polymerních kompozitů vyrobených technologií MuCell se jeví jako vhodné hledat přímou souvislost nejenom mezi mechanickými vlastnostmi a množstvím plynu, ale i mezi strukturou, velikostí a distribucí pórů a vlastnostmi. Současně by bylo vhodné pokusit se snížit negativní vliv této technologie na kvalitu povrchu vyráběných dílů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CALLISTER, William D. a David G. RETHWISCH. *Materials science and engineering: an introduction*. 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2010. ISBN 978-0-470-41997-7.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, c1999, 350 s. ISBN 80-720-4130-4.
- [3] MuCell® Injection Molding. Trexel.com [online]. [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: <http://www.trexel.com/en/mucell-injection-molding>
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2017-08-23]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [5] *Encyclopedia Britannica* [online]. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/>
- [6] Leo Hendrick Baekeland and the Invention of Bakelite. *American Chemical Society* [online]. [cit. 2017-08-23]. Dostupné z: <https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/bakelite.html>
- [7] 3D Printing Materials Guide 2018. In: *All3DP Printing Magazine* [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material/#abs>
- [8] 1935 Nylon. *DuPont USA* [online]. [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/corporate-functions/our-company/dupont-history.html>
- [9] VAN DER WERFF, H. a U. HEISSERER. High-performance ballistic fibers. *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*. Elsevier, 2016, 2016, , 71-107. DOI: 10.1016/B978-1-78242-461-1.00003-0. ISBN 9781782424611.
- [10] ASHBY, M. F. a David R. H. JONES. *Engineering materials 2: an introduction to microstructures, processing and design*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2006. ISBN 978-0-7506-6381-6.
- [11] GLASSCOCK, David, et al. High performance polyamides fulfill demanding requirements for automotive thermal management components. *DuPont Engineering Polymers*, 2008.
- [12] Polyphthalamide. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyphthalamide>
- [13] ASTM D5336 - 15A. *Standard Classification System and Basis for Specification for Polyphthalamide (PPA) Injection Molding Material*. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

- [14] MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 08-493-4205-8.
- [15] EMS-GRIVORY - Grivory, Grilamid and Grilon LFT. *EMS-GRIVORY* [online]. [cit. 2018-01-19].
Dostupné z: <http://www.emsgrivory.com/en/products-markets/products/grivory-grilamid-and-grilon-lft/>
- [16] ASKELAND, Donald R., Pradeep P. FULAY a Wendelin J. WRIGHT. *The science and engineering of materials*. 6th ed. Stamford, CT: Cengage Learning, c2011. ISBN 978-0-495-29602-7.
- [17] Properties | ZYLON is a new high-performance fiber developed by TOYOBO. *TOYOBO* [online]. [cit. 2018-01-23].
Dostupné z: http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo/zylon_bussei.html
- [18] WILHELM, Marianne; BIR, Cynthia. Injuries to law enforcement officers: the backface signature injury. *Forensic science international*, 2008, 174.1: 6-11.
- [19] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [20] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2018-01-25]. ISBN 978-80-88058-74-8.
Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [21] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2018-02-05]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Cover.html>
- [22] MICHNA, Štefan, et al. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, ISBN 80-890-4188-4.
- [23] Ytong.cz [online]. [cit. 2018-02-10].
Dostupné z: <https://www.ytong.cz/>
- [24] AVERY, Jack. Alternatives to injection molding. *Machine Design*. Cleveland: Informa, 1999, 71(15), 77-84. ISSN 00249114.
- [25] ZYCHOVÁ, MARKÉTA, et al. Vlastnosti a použití superkritické vody. *Chemické listy*, 2013, 107: 126-135.
- [26] YA-PING SUN. *Supercritical Fluid Technology in Materials Science and Engineering Synthesis, Properties and Applications*. Hoboken: Marcel Dekker, 2002. ISBN 08-247-4471-3.
- [27] Emailová komunikace s Ing. Jiřím Bobkem, Ph.D, vedoucím oddělení průmyslových technologií na Technické univerzitě v Liberci. 6. 3. 2018, jiri.bobek@tul.cz
- [28] Implementing MuCell. In: *Trexel, Inc.* [online]. 2017 [cit. 2018-02-10].
Dostupné z: <https://www.trexel.com/en/mucell-injection-molding/implementation>
- [29] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [30] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: ÚNMZ, 2012.

- [31] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [32] ČSN EN ISO 1110. *Plasty – Polyamidy – Zrychlené kondicionování zkušebních těles*. Praha: ČNI, 1998.
- [33] ČSN ISO 2602. *Statistická interpretace výsledků zkoušek. Odhad průměru. Konfidenční interval*. Praha: ČNI, 1993.
- [34] CHEN, Shia-Chung, Won-Hsion LIAO a Rean-Der CHIEN. Structure and mechanical properties of polystyrene foams made through microcellular injection molding via control mechanisms of gas counter pressure and mold temperature. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2012, 39(8), 1125-1131. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.06.015. ISSN 07351933.
- [35] NAJAFI, Naqi, Marie-Claude HEUZÉY, Pierre J. CARREAU, Daniel THERRIAULT a Chul B. PARK. Mechanical and morphological properties of injection molded linear and branched-poly(lactide) (PLA) nanocomposite foams. *European Polymer Journal*. 2015, 73, 455-465. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2015.11.003. ISSN 00143057.
- [36] SUN, H, G SUR a J MARK. Microcellular foams from polyethersulfone and polyphenylsulfone Preparation and mechanical properties. *European Polymer Journal (USA)*. 2002, 38(12), 2373-2381. ISSN 0014-3057.
- [37] COLLIAS, Dimitris I, Donald G BAIRD a Rein J.M BORGGREVE. Impact toughening of polycarbonate by microcellular foaming. *Polymer*. 1994, 35(18), 3978-3983. DOI: 10.1016/0032-3861(94)90283-6. ISSN 00323861.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Různá kritéria dělení plastů [1, 2].....	14
Obr. 2.2 Obecný vzorec základní strukturní jednotky polyftalamidu (PPA) [12].....	15
Obr. 2.3 Různé typy segmentů střídající se ve struktuře běžných typů PPA [11]	16
Obr. 2.4 Vnitřní struktura aramidového vlákna (Kevlar) [1].....	17
Obr. 2.5 Porovnání vrubové houževnatosti dvou materiálů se stejnou matricí, vlevo vyztuženého pomocí dlouhých vláken, vpravo vlákny krátkými [15].....	18
Obr. 2.6 Vliv tepelného zpracování vláken na Youngův modul a mez pevnosti [16]	19
Obr. 2.7 Závislost modulu pružnosti na teplotě (amorfní polymer) [1].....	23
Obr. 2.8 Fáze vstřikovacího cyklu (t_{s1} , t_{s2} , t_{s3} - strojní časy, t_v - čas vstřikování, t_d - čas dotlaku, t_{pl} - čas plastifikace, t_{ch} - čas chlazení, t_m - manipulační doba) [20].....	26
Obr. 2.9 Struktura pórů při použití, a) dusíku (fyzikální přístup), b) nadouvadla (chemický přístup) [20].....	27
Obr. 2.10 Schéma vstřikovacího zařízení vybaveného technologií MuCell, výrobce Trexel, Inc.[28]	28
Obr. 3.1 Zkušební tělesa, nahoře pro zkoušku rázové houževnatosti, dole pro zkoušku tahem.....	29
Obr. 3.2 Časová závislost změny hmotnosti zkušebních těles S1 při kondicionaci pro hladinu 0 % plynu ve struktuře	31
Obr. 3.3 Pohled na vrub pod stereomikroskopem.....	32
Obr. 3.4 Různé typy tahových křivek dle ČSN EN ISO 527-1[29].....	33
Obr. 3.5 Závislost mechanických vlastností na obsahu plynu ve struktuře – a) modul pružnosti E_r , b) napětí při přetržení σ_b , c) poměrná deformace při přetržení ε_b	37
Obr. 3.6 Závislost mechanických vlastností na obsahu plynu ve struktuře jednotlivých těles – a) modul pružnosti E_r , b) napětí při přetržení σ_b , c) poměrná deformace při přetržení ε_b	38
Obr. 3.7 Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu v závislosti na obsahu plynu v polymeru	40
Obr. 3.8 Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu v závislosti na obsahu plynu v jednotlivých tělesech.....	41
Obr. 3.9 Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu v závislosti na obsahu plynu v polymeru při teplotě $-30\text{ }^\circ\text{C}$	42
Obr. 3.10 Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu v závislosti na obsahu plynu v jednotlivých tělesech při teplotě $-30\text{ }^\circ\text{C}$	43
Obr. 3.11 Vrubová houževnatost zkušebních těles s vrubem v závislosti na obsahu plynu v polymeru	44
Obr. 3.12 Vrubová houževnatost zkušebních těles s vrubem v závislosti na obsahu plynu v jednotlivých tělesech.....	45
Obr. 3.13 Vrubová houževnatost zkušebních těles s vrubem v závislosti na obsahu plynu při teplotě $-30\text{ }^\circ\text{C}$	46
Obr. 3.14 Vrubová houževnatost zkušebních těles s vrubem v závislosti na obsahu plynu v jednotlivých tělesech při teplotě $-30\text{ }^\circ\text{C}$	47
Obr. 3.15 Porovnání průběhů rázové houževnatosti v závislosti na obsahu plynu v polymeru při teplotách $+23\text{ }^\circ\text{C}$ a $-30\text{ }^\circ\text{C}$	48

Obr. 3.16 Porovnání průběhů vrubové houževnatosti v závislosti na obsahu plynu v polymeru při teplotách +23 °C a -30 °C	49
Obr. 4.1 Závislost měrného modulu pružnosti a) a měrného napětí při přetržení b) na obsahu plynu ve struktuře	50
Obr. 4.2 Závislost měrné rázové a) a vrubové b) houževnatosti na obsahu plynu ve struktuře	51

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Milníky ve vývoji polymerních materiálů [4, 5, 6, 10].....	13
Tab. 2.2 T_g a T_m některých typů polyamidů [11]	16
Tab. 2.3 Chemické složení skel používaných pro výrobu skelných vláken [2].....	19
Tab. 2.4 Mechanické a fyzikální vlastnosti materiálů používaných jako vyztužující fáze v kompozitech [1, 16, 17].....	20
Tab. 2.5 Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů [2]	22
Tab. 2.6 Rozdělení polymerů podle navlhavosti [19].....	24
Tab. 3.1 Celkový hmotnostní přírůstek jednotlivých skupin těles během kondicionace	31
Tab. 3.2 Výsledky tahových zkoušek	35
Tab. 3.3 Statistické vyhodnocení výsledků měření rázové houževnatosti na tělesech bez vrubu při teplotě +23 °C	41
Tab. 3.4 Porovnání rázové houževnatosti při teplotách +23 °C a -30 °C	42
Tab. 3.5 Statistické vyhodnocení výsledků měření rázové houževnatosti na tělesech bez vrubu při teplotě -30 °C	43
Tab. 3.6 Statistické vyhodnocení výsledků měření vrubové houževnatosti na tělesech s vrubem při teplotě +23 °C	45
Tab. 3.7 Porovnání vrubové houževnatosti při teplotách +23 °C a -30 °C.....	46
Tab. 3.8 Statistické vyhodnocení výsledků měření vrubové houževnatosti na tělesech s vrubem při teplotě -30 °C	47

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
A_0	[mm ²]	obsah plochy průřezu zkušebního tělesa
a_{cN}	[kJ/m ²]	rázová houževnatost zkušebních těles s vrubem
a_{cU}	[kJ/m ²]	rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu
$a_{cU+23\text{ °C}}$	[kJ/m ²]	rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu při teplotě +23 °C
$a_{cU-30\text{ °C}}$	[kJ/m ²]	rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu při teplotě -30 °C
b	[mm]	šířka zkušebního tělesa
b_0	[mm]	šířka zkušebního tělesa (zkouška tahem)
b_N	[mm]	šířka zkušebního tělesa pod vrubem
E	[MPa]	Youngův modul
E_c	[J]	korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa
E_M	[J]	energie naměřená na Charpyho kladivu
E_z	[J]	ztrátová energie Charpyho kladiva
F_b	[N]	síla při přetržení
h	[mm]	tloušťka zkušebního tělesa
h_0	[mm]	tloušťka zkušebního tělesa (zkouška tahem)
L_0	[mm]	počáteční délka zkušebního tělesa
m_1	[g]	hmotnost před kondicionací
m_2	[g]	hmotnost po kondicionaci
T	[°C]	teplota zkoušky
t_d	[s]	čas dotlaku
T_g	[°C]	teplota skelného přechodu
t_{ch}	[s]	čas chlazení
T_m	[°C]	teplota tání
t_m	[s]	manipulační doba
t_{pl}	[s]	čas plastifikace
t_{s1}, t_{s2}, t_{s3}	[s]	strojní časy
t_v	[s]	čas vstříkávání
ΔL	[mm]	změna délky zkušebního tělesa
Δm	[g]	hmotnostní přírůstek
$\varepsilon_{0,0005}$	[-]	poměrná deformace 0,0005
$\varepsilon_{0,0025}$	[-]	poměrná deformace 0,0025
ε_b	[%]	poměrná deformace při přetržení
ε_m	[%]	poměrná deformace na mezi pevnosti
ε_{tb}	[%]	jmenovitá poměrná deformace při přetržení
ε_{tm}	[%]	jmenovitá poměrná deformace na mezi pevnosti
ε_y	[Mpa]	poměrné prodloužení na mezi kluzu
$\sigma_{0,0005}$	[Mpa]	napětí odpovídající poměrné deformaci 0,0005

Symbol	Jednotka	Popis
$\sigma_{0,0025}$	[Mpa]	napětí odpovídající poměrné deformaci 0,0025
σ_b	[Mpa]	napětí při přetržení
σ_m	[Mpa]	mez pevnosti
σ_x	[Mpa]	napětí při x % prodloužení
σ_y	[Mpa]	napětí na mezi kluzu

Zkratka	Popis
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
B ₂ O ₃	oxid boritý
CaO	oxid vápenatý
GFRP	glass fiber-reinforced polymer
HM	vysokomodulová („high modulus“)
HS	vysokopevnostní („high strenght“)
<i>u</i>	levá hraniční hodnota konfidenčního intervalu na hladině spolehlivosti 95 %
LDPE	nízkohustotní polyetylen („low-density polyetylen“)
LFT	termoplast s dlouhými vlákny („long fiber thermoplastic“)
MgO	oxid hořečnatý
PA11	polyamid 11
PA12	polyamid 12
PA6	polyamid 6
PA610	polyamid 610
PA66	polyamid 66
PA6T/66	polyftalamid typu 6T/66
PA6T/6I/66	polyftalamid typu 6T/6I/66
PA6T/DT	polyftalamid typu 6T/DT
PAN	polyakrilonitril
PBO	p-phenylene-2,6-benzobisoxazole
PC	polykarbonát
PE	polyetylen
PET	polyethylentereftalát
PMMA	polymethylmethaakrylát
POM	polyoxymetylén
PP	polypropylen
PPA	polyftalamid
PS	polystyren
PTFE	polytetrafluorethylen
PVC	polyvinylchlorid
<i>s</i>	směrodatná odchylka
SCF	superkritická kapalina ("supercritical fluid")
SiO ₂	oxid křemičitý
UHMWPE	polyetylen s velmi vysokou molekulovou hmotností (ultra high molecular weight polyethlyne)
UV	ultrafialové („ultraviolet“)
\bar{x}	průměr

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Průběhy kondicionace různých typů zkušebních těles

Příloha 2: Tahové diagramy:

a) zkušební tělesa ST1

b) zkušební tělesa ST2

c) zkušební tělesa ST3

d) zkušební tělesa ST4

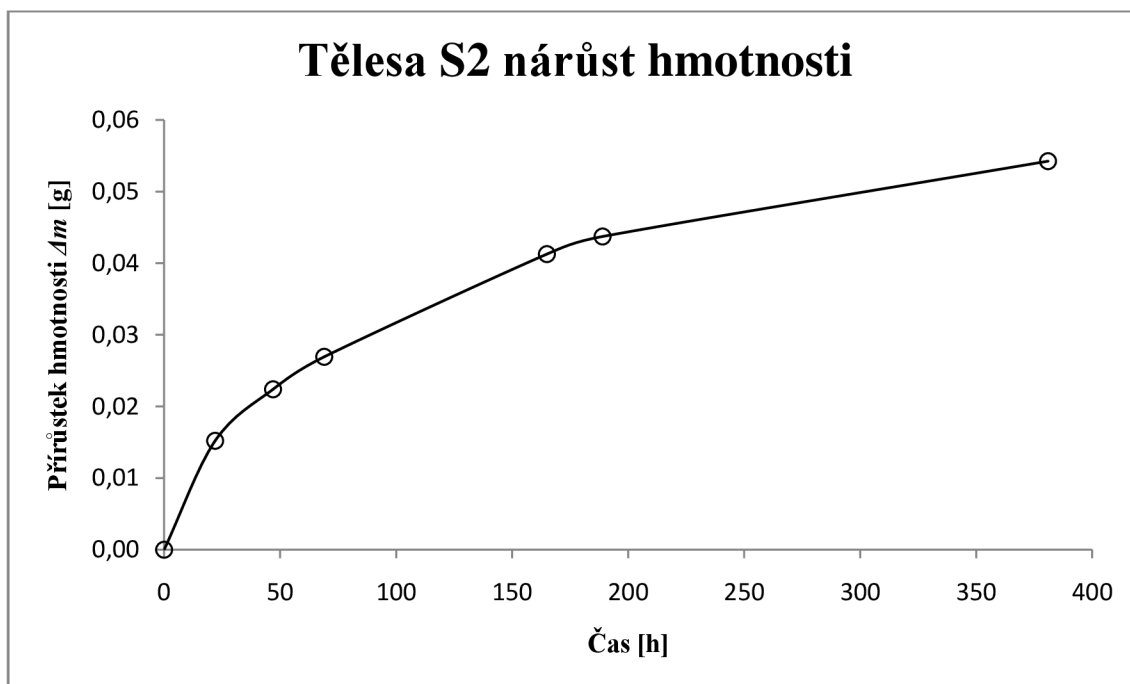
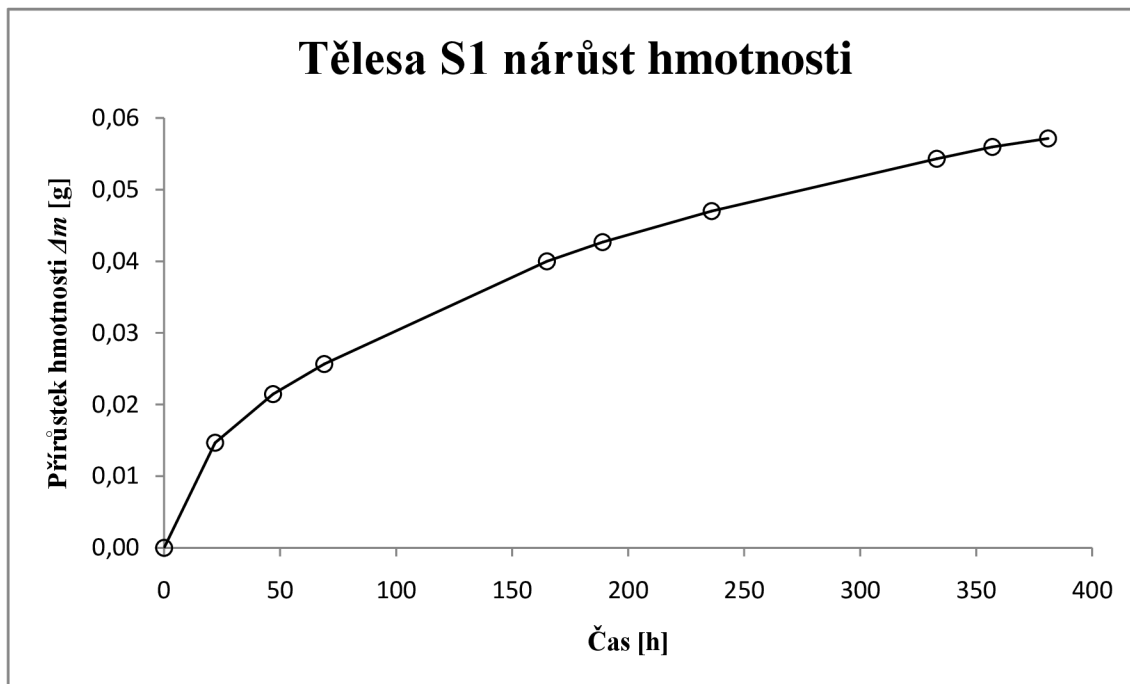
e) zkušební tělesa ST5

f) zkušební tělesa ST1 – ST5

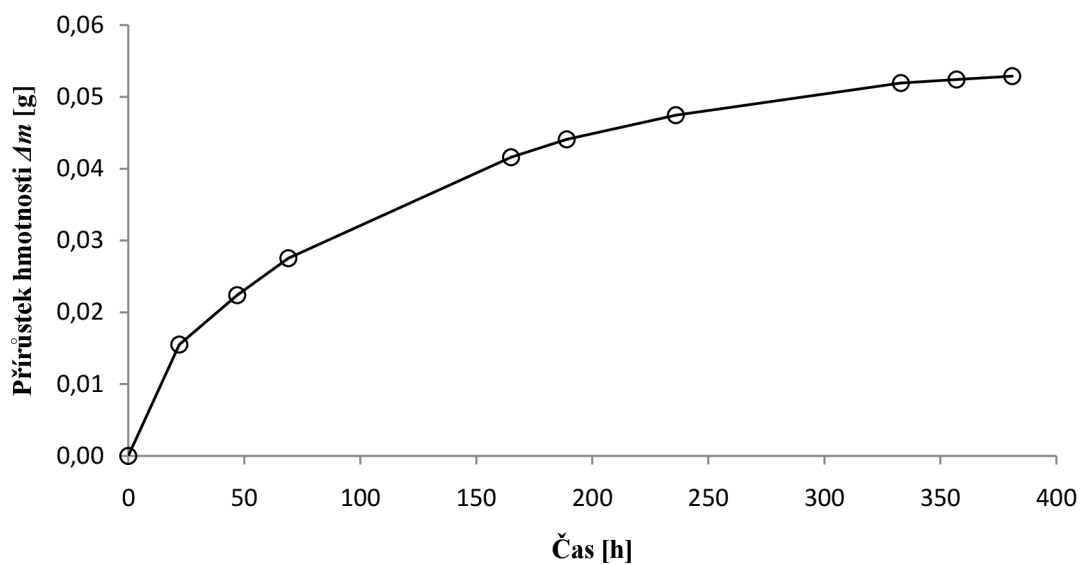
Příloha 3: kompletní výsledky zkoušek rázové houževnatosti

Příloha 4: kompletní výsledky zkoušek vrubové houževnatosti

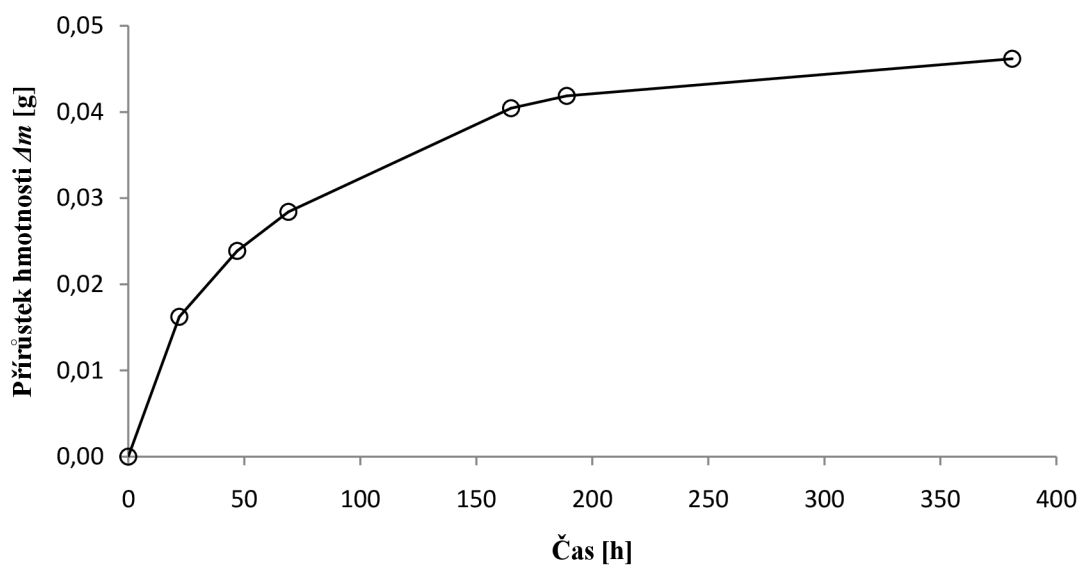
Příloha 1: Průběhy kondicionace různých typů zkušebních těles



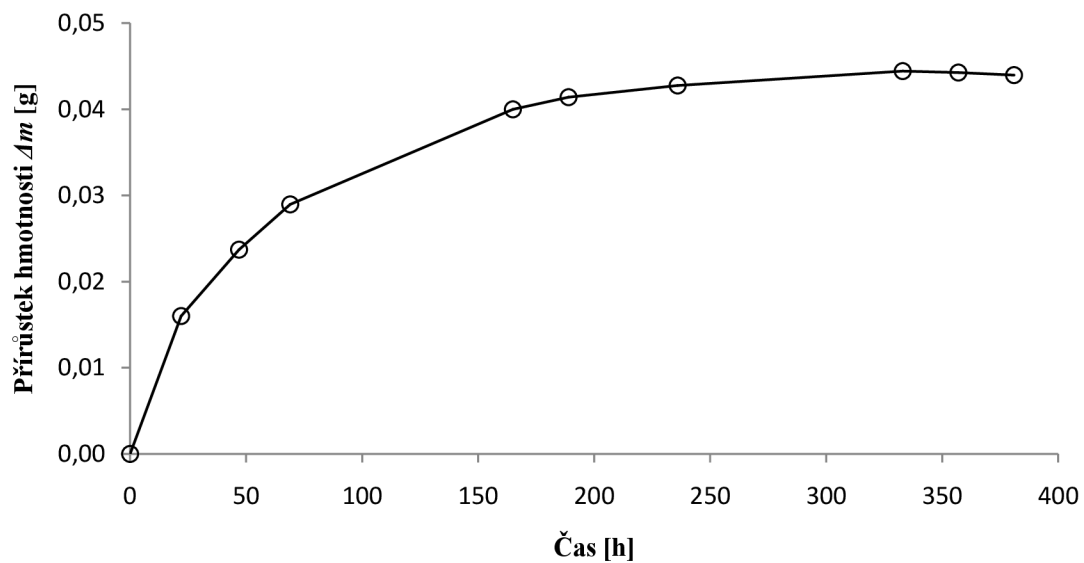
Tělesa S3 nárůst hmotnosti



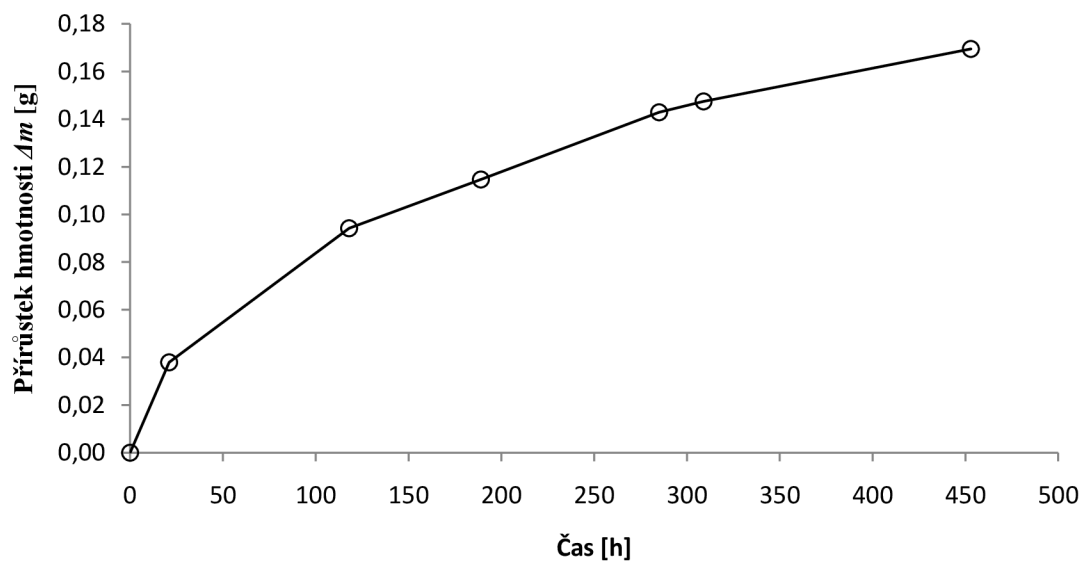
Tělesa S4 nárůst hmotnosti

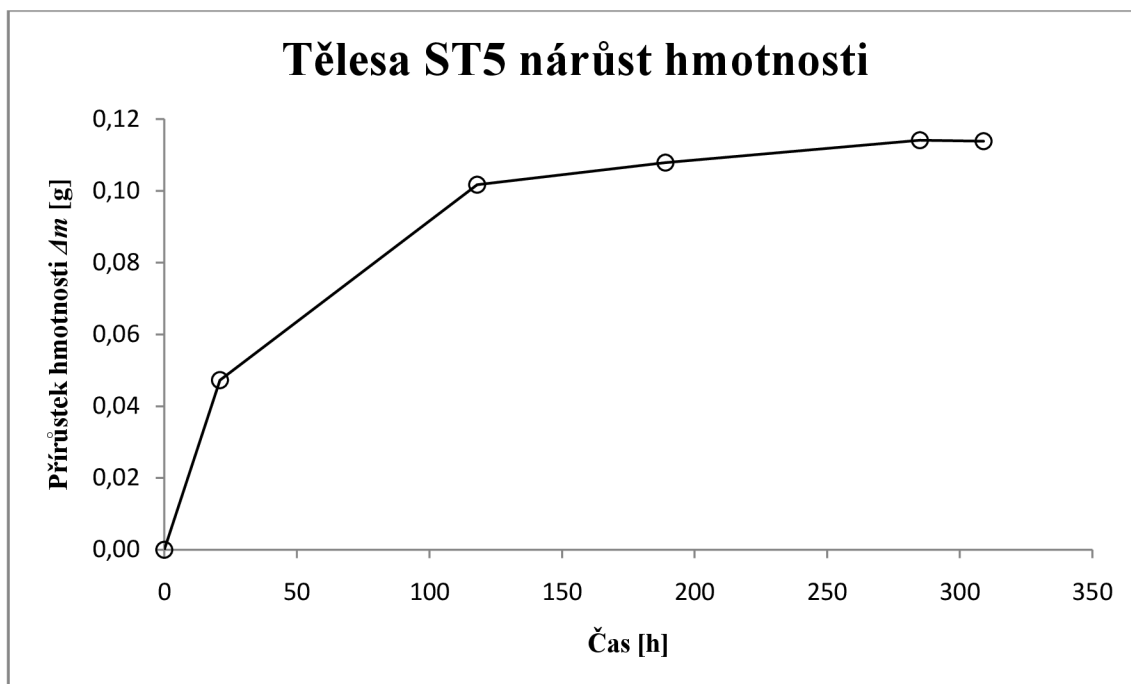


Tělesa S5 nárůst hmotnosti



Tělesa ST1 nárůst hmotnosti





Příloha 2: Tahové diagramy: a) zkušební tělesa ST1

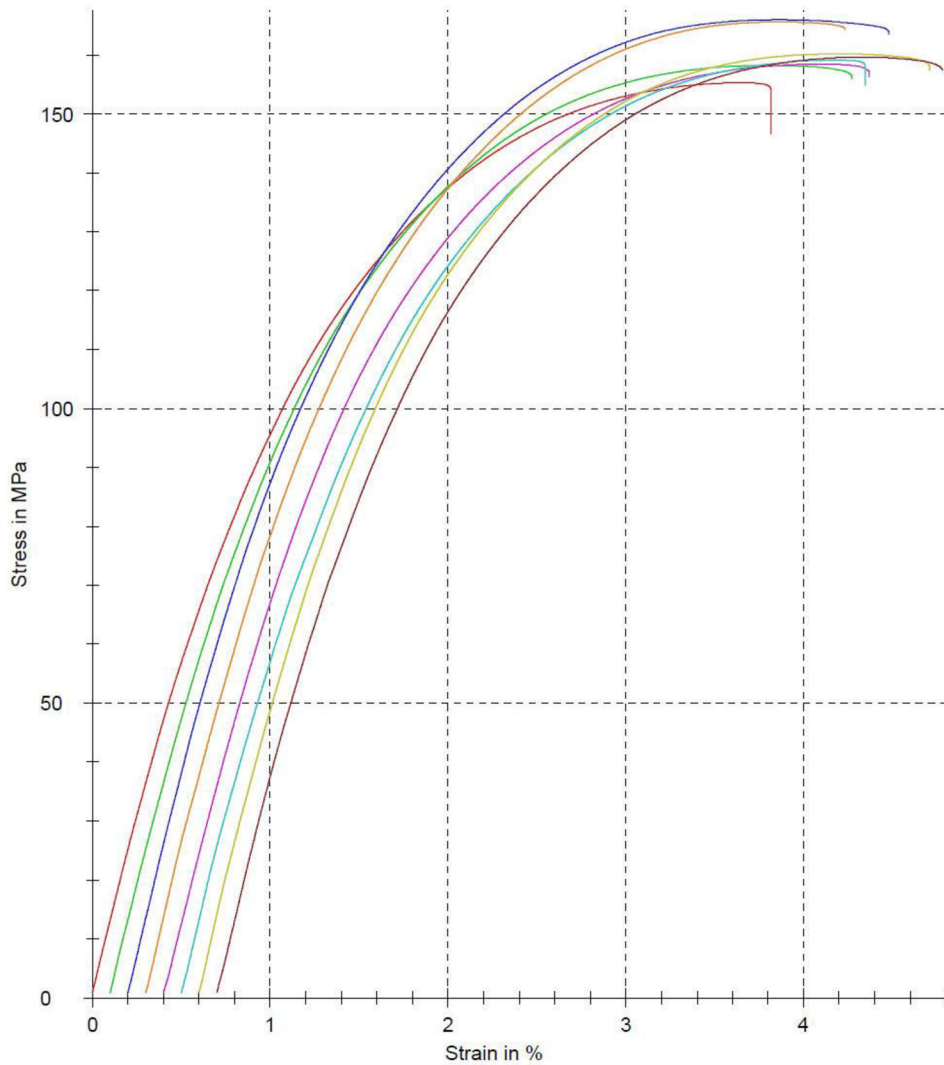


14.02.2018

Test report

Customer	: DP Suchanek	Specimen type	: ČSN EN ISO 527-2, 1B
Test standard	: ČSN EN ISO 527-1	Machine data	: Zwick Z250, 50kN
Pre-load	: 1 MPa	Grip to grip separation at the start position	: 118,09 mm
Speed, tensile modulus	: 1 mm/min	Gage length, standard travel	: 50 mm
Test speed	: 2 mm/min		

Series graph:



b) zkušební tělesa ST2

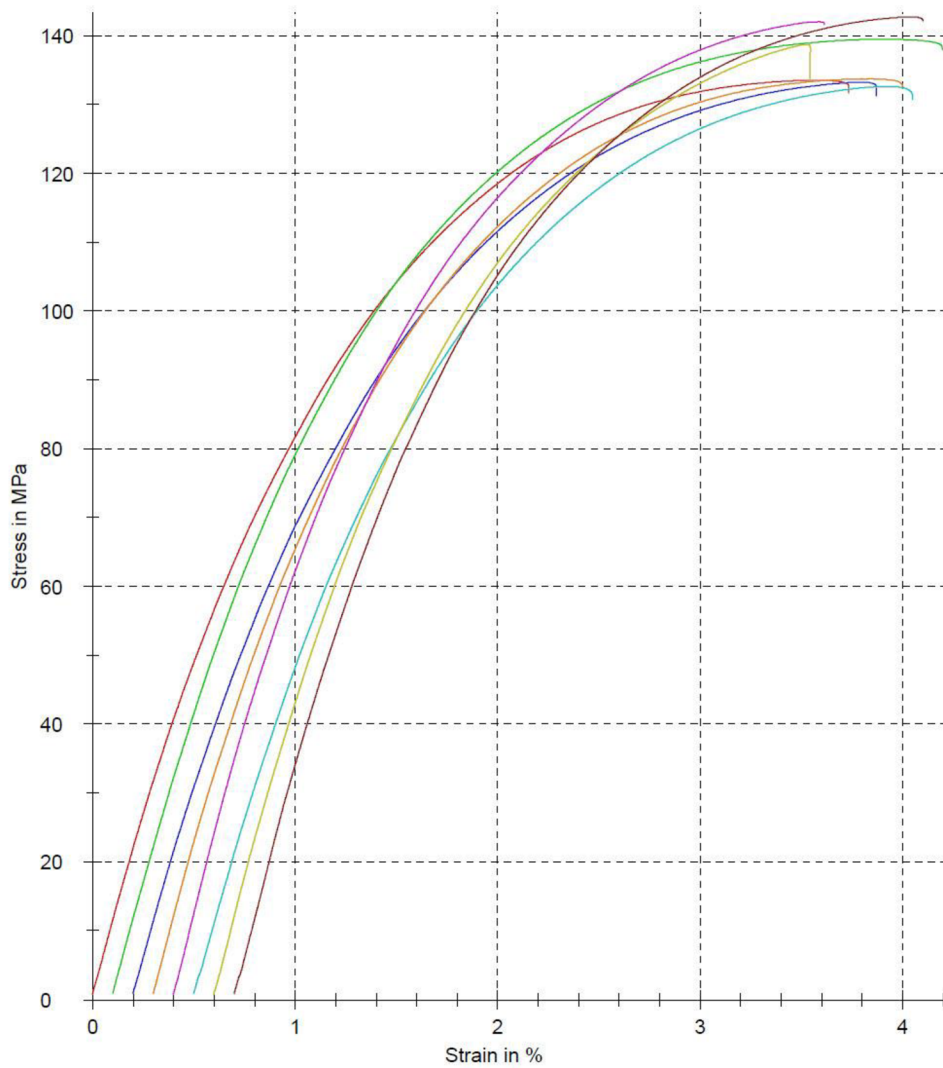


14.02.2018

Test report

Customer	: DP Suchanek	Specimen type	: ČSN EN ISO 527-2, 1B
Test standard	: ČSN EN ISO 527-1	Machine data	: Zwick Z250, 50kN
Pre-load	: 1 MPa	Grip to grip separation at the start position	: 118,09 mm
Speed, tensile modulus	: 1 mm/min	Gage length, standard travel	: 50 mm
Test speed	: 2 mm/min		

Series graph:

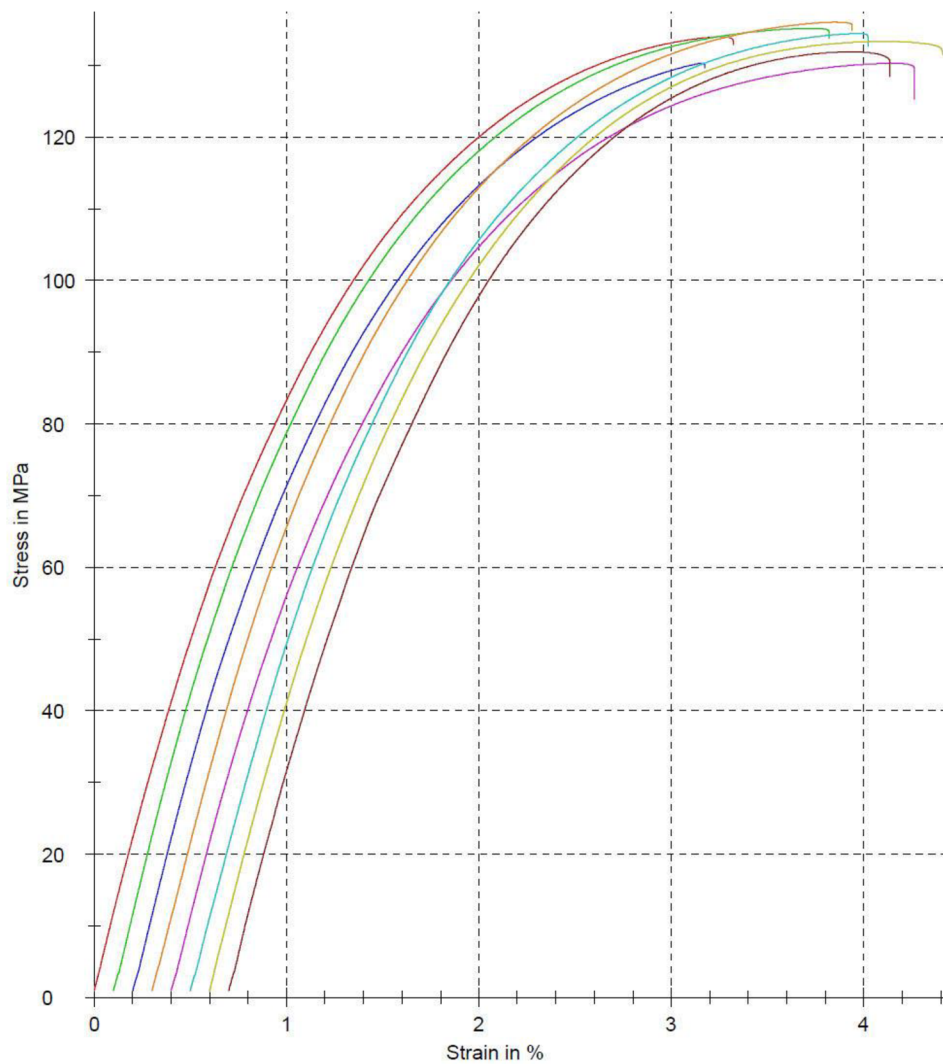


c) zkušební tělesa ST3

Test report

Customer	: DP Suchanek	Specimen type	: ČSN EN ISO 527-2, 1B
Test standard	: ČSN EN ISO 527-1	Machine data	: Zwick Z250, 50kN
Pre-load	: 1 MPa	Grip to grip separation at the start position	: 118,09 mm
Speed, tensile modulus	: 1 mm/min	Gage length, standard travel	: 50 mm
Test speed	: 2 mm/min		

Series graph:



d) zkušební tělesa ST4

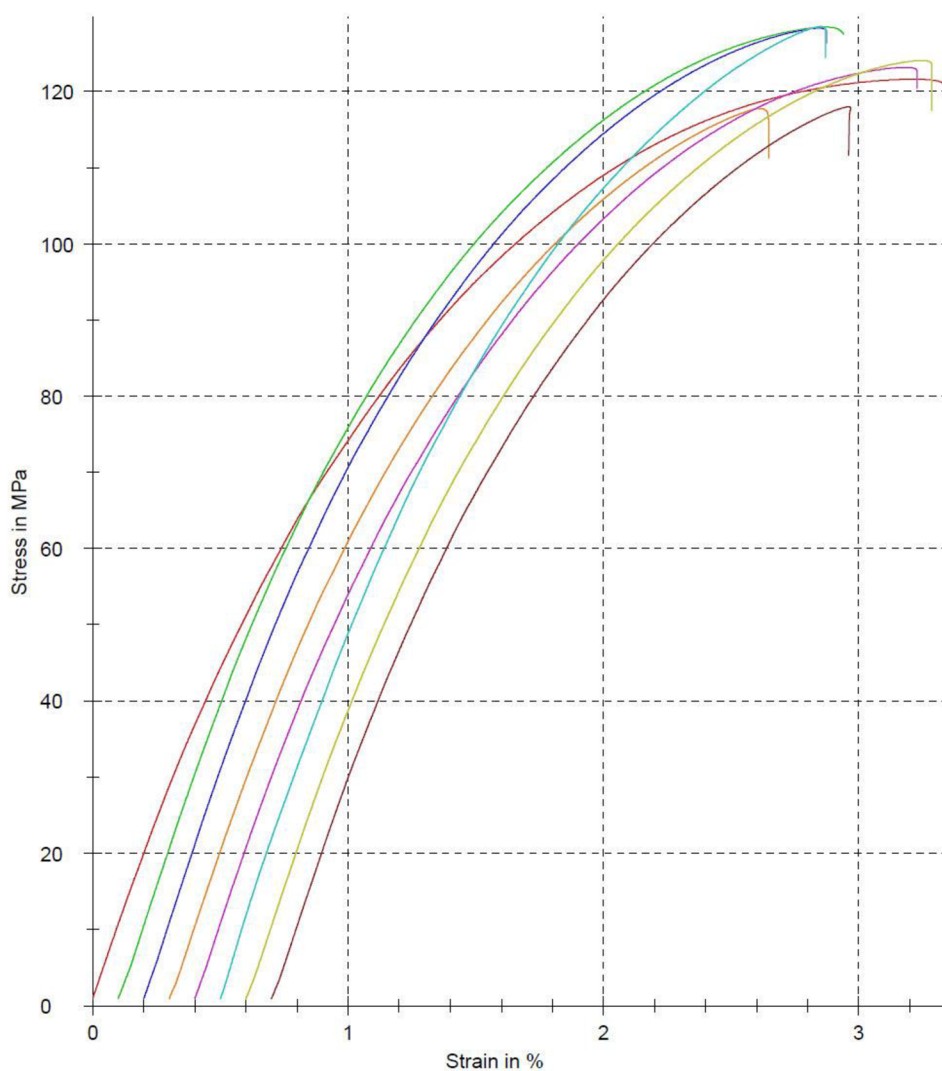


14.02.2018

Test report

Customer	: DP Suchanek	Specimen type	: ČSN EN ISO 527-2, 1B
Test standard	: ČSN EN ISO 527-1	Machine data	: Zwick Z250, 50kN
Pre-load	: 1 MPa	Grip to grip separation at the start position	: 118,09 mm
Speed, tensile modulus	: 1 mm/min	Gage length, standard travel	: 50 mm
Test speed	: 2 mm/min		

Series graph:

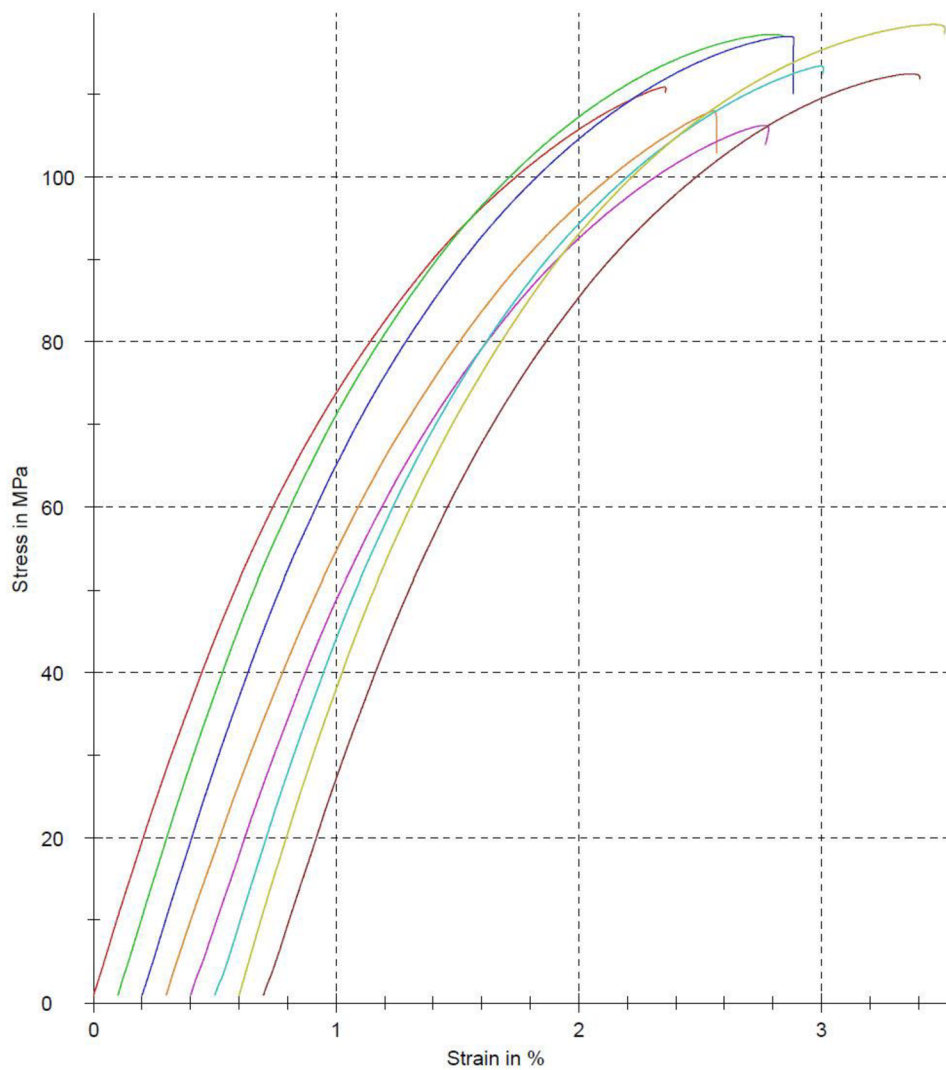


e) zkušební tělesa ST5

Test report

Customer	: DP Suchanek	Specimen type	: ČSN EN ISO 527-2, 1B
Test standard	: ČSN EN ISO 527-1	Machine data	: Zwick Z250, 50kN
Pre-load	: 1 MPa	Grip to grip separation at the start position	: 118,09 mm
Speed, tensile modulus	: 1 mm/min	Gage length, standard travel	: 50 mm
Test speed	: 2 mm/min		

Series graph:



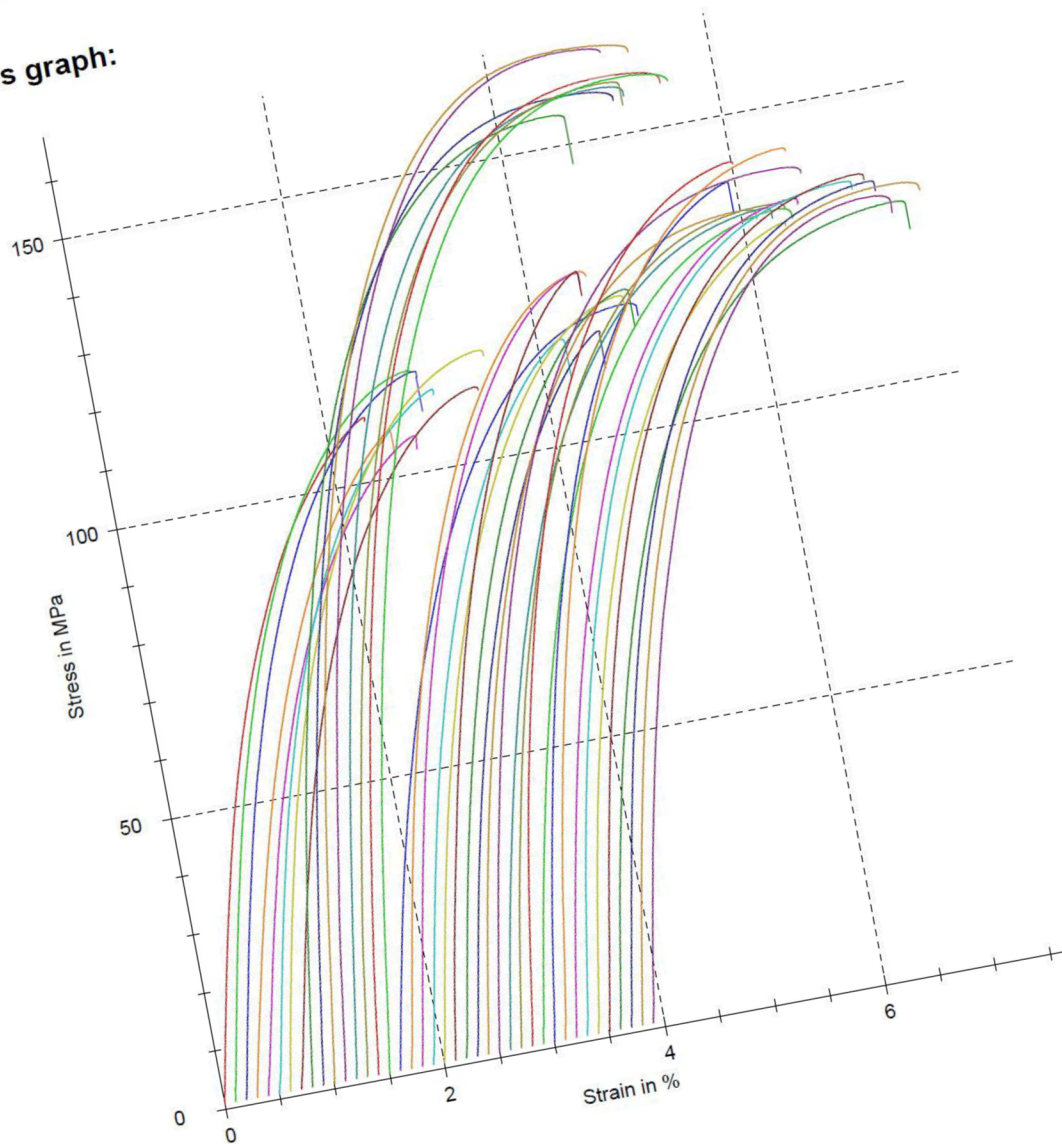


Test report

Customer : DP Suchanek
Test standard : ČSN EN ISO 527-1
Pre-load
Speed, tensile modulus
Test speed

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN
Grip to grip separation at the start position : 118,09 mm
Gage length, standard travel : 50 mm
: 1 MPa
: 1 mm/min
: 2 mm/min

Series graph:



Příloha 3: kompletní výsledky zkoušek rázové houževnatosti

a) teplota +23 °C

	<i>h</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>E_M</i> [J]	<i>E_z</i> [J]	<i>E_c</i> [J]	<i>a_{cU}</i> [kJ/m ²]	<i>m</i> [g]
S1-1	4,224	10,053	2,54	0,03	2,51	59,10907	5,2379
S1-2	4,216	10,25	2,49	0,03	2,46	56,926	5,2193
S1-3	4,193	10,244	2,3	0,03	2,27	52,84835	5,2145
S1-4	4,199	10,266	2,06	0,03	2,03	47,09219	5,2237
S1-5	4,175	10,226	2,45	0,03	2,42	56,68304	5,2127
S1-6	4,197	10,226	2,22	0,03	2,19	51,02692	5,2399
S1-7	4,182	10,231	2,27	0,03	2,24	52,35352	5,1769
S1-8	4,207	10,305	2,3	0,03	2,27	52,36069	5,2247
S1-9	4,208	10,303	2,03	0,03	2	46,13076	5,2366
S1-10	4,186	10,272	2,4	0,03	2,37	55,11808	5,2199
S2-1	4,204	10,271	2,12	0,03	2,09	48,40284	5,0072
S2-2	4,216	10,265	2,2	0,03	2,17	50,14183	4,9956
S2-3	4,212	10,242	2,7	0,03	2,67	61,89251	4,9176
S2-4	4,227	10,283	2,68	0,03	2,65	60,96685	4,7731
S2-5	4,212	10,245	2,11	0,03	2,08	48,20177	4,8165
S2-6	4,212	10,52	2,29	0,03	2,26	51,00401	4,8949
S2-7	4,225	10,297	2,09	0,03	2,06	47,35107	5,0054
S2-8	4,21	10,269	2,71	0,03	2,68	61,99042	5,0021
S2-9	4,233	10,283	2,32	0,03	2,29	52,60989	4,8891
S2-10	4,202	10,281	2,35	0,03	2,32	53,70276	4,997
S3-1	4,209	10,236	2,14	0,03	2,11	48,97487	4,8107
S3-2	4,224	10,271	1,99	0,03	1,96	45,17721	4,8218
S3-3	4,207	10,239	2,12	0,03	2,09	48,51949	4,7943
S3-4	4,219	10,259	2,24	0,03	2,21	51,05964	4,7476
S3-5	4,21	10,237	2,77	0,03	2,74	63,57638	4,735
S3-6	4,21	10,238	2,72	0,03	2,69	62,41013	4,7514
S3-7	4,227	10,264	2,65	0,03	2,62	60,38824	4,8742
S3-8	4,224	10,263	2,33	0,03	2,3	53,0554	4,8093
S3-9	4,216	10,266	2,61	0,03	2,58	59,60982	4,8569
S3-10	4,216	10,248	2,6	0,03	2,57	59,48307	4,7316

	<i>h</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>E_M</i> [J]	<i>E_z</i> [J]	<i>E_c</i> [J]	<i>a_{cU}</i> [kJ/m ²]	<i>m</i> [g]
S4-1	4,23	10,215	1,52	0,03	1,49	34,4832	4,5667
S4-2	4,236	10,242	1,96	0,03	1,93	44,48531	4,6489
S4-3	4,224	10,231	2,59	0,03	2,56	59,23767	4,539
S4-4	4,21	10,223	2,18	0,03	2,15	49,95489	4,4565
S4-5	4,21	10,197	1,9	0,03	1,87	43,55992	4,4829
S4-6	4,231	10,212	2,02	0,03	1,99	46,05738	4,4623
S4-7	4,245	10,209	2,26	0,03	2,23	51,45694	4,4685
S4-8	4,215	10,204	2,21	0,03	2,18	50,68605	4,5429
S4-9	4,235	10,243	2,16	0,03	2,13	49,10198	4,7505
S4-10	4,304	10,245	2,24	0,03	2,21	50,11965	4,5097
S5-1	4,237	10,256	1,38	0,03	1,35	31,06686	4,2768
S5-2	4,228	10,264	1,75	0,03	1,72	39,63481	4,3127
S5-3	4,253	10,28	2,22	0,03	2,19	50,09053	4,3666
S5-4	4,223	10,249	2,1	0,03	2,07	47,82641	4,3815
S5-5	4,223	10,247	2,15	0,03	2,12	48,9912	4,229
S5-6	4,223	10,237	2,1	0,03	2,07	47,88247	4,2204
S5-7	4,207	10,257	2,14	0,03	2,11	48,89783	4,1141
S5-8	4,231	10,28	1,73	0,03	1,7	39,08524	4,1943
S5-9	4,237	10,296	1,82	0,03	1,79	41,03232	4,3204
S5-10	4,238	10,278	2,53	0,03	2,5	57,39452	4,5146

b) teplota –30 °C

	<i>h</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>E_M</i> [J]	<i>E_Z</i> [J]	<i>E_c</i> [J]	<i>a_{cU}</i> [kJ/m ²]	<i>m</i> [g]
N1-1	4,179	10,256	2,1	0,03	2,07	48,29698	5,2216
N1-2	4,196	10,259	1,84	0,03	1,81	42,0473	5,2177
N1-3	4,167	10,224	1,83	0,03	1,8	42,25014	5,238
N1-4	4,172	10,232	1,83	0,03	1,8	42,16651	5,2312
N1-5	4,184	10,249	1,87	0,03	1,84	42,90863	5,2572
N1-6	4,181	10,275	1,87	0,03	1,84	42,83076	5,2481
N1-7	4,168	10,241	2,05	0,03	2,02	47,32398	5,2128
N1-8	4,179	10,259	1,83	0,03	1,8	41,98509	5,2223
N1-9	4,177	10,264	2,15	0,03	2,12	49,44868	5,2289
N1-10	4,172	10,233	2,03	0,03	2	46,8471	5,2474
N2-1	4,201	10,273	1,89	0,03	1,86	43,09858	5,0011
N2-2	4,217	10,274	1,88	0,03	1,85	42,70007	4,9654
N2-3	4,217	10,254	1,52	0,03	1,49	34,45794	4,8662
N2-4	4,212	10,261	1,75	0,03	1,72	39,79701	4,8543
N2-5	4,218	10,258	2,01	0,03	1,98	45,76104	4,9523
N2-6	4,204	10,298	2,17	0,03	2,14	49,43086	5,0345
N2-7	4,201	10,247	2,02	0,03	1,99	46,22785	4,9925
N2-8	4,22	10,26	1,99	0,03	1,96	45,26852	4,8878
N2-9	4,208	10,241	1,76	0,03	1,73	40,14468	4,9268
N2-10	4,217	10,253	1,79	0,03	1,76	40,70597	4,9942
N3-1	4,222	10,254	1,76	0,03	1,73	39,96084	4,7678
N3-2	4,225	10,246	1,67	0,03	1,64	37,88461	4,8369
N3-3	4,21	10,247	1,81	0,03	1,78	41,26114	4,6981
N3-4	4,211	10,231	1,89	0,03	1,86	43,17274	4,6885
N3-5	4,214	10,242	1,72	0,03	1,69	39,15682	4,6663
N3-6	4,222	10,272	2,01	0,03	1,98	45,65538	4,8623
N3-7	4,223	10,266	1,84	0,03	1,81	41,74998	4,7661
N3-8	4,211	10,237	1,7	0,03	1,67	38,7399	4,8463
N3-9	4,219	10,255	1,56	0,03	1,53	35,36277	4,8367
N3-10	4,221	10,262	1,54	0,03	1,51	34,86018	4,7307

	<i>h</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>E_M</i> [J]	<i>E_z</i> [J]	<i>E_c</i> [J]	<i>a_{cU}</i> [kJ/m ²]	<i>m</i> [g]
N4-1	4,238	10,221	1,65	0,03	1,62	37,39906	4,6375
N4-2	4,213	10,194	1,62	0,03	1,59	37,0221	4,4886
N4-3	4,253	10,232	1,64	0,03	1,61	36,99729	4,5951
N4-4	4,216	10,226	1,71	0,03	1,68	38,96753	4,4018
N4-5	4,223	10,256	1,74	0,03	1,71	39,48181	4,6644
N4-6	4,216	10,241	1,35	0,03	1,32	30,5725	4,6411
N4-7	4,231	10,234	1,54	0,03	1,51	34,87294	4,5876
N4-8	4,21	10,219	1,8	0,03	1,77	41,14175	4,4257
N4-9	4,223	10,235	1,23	0,03	1,2	27,76338	4,5773
N4-10	4,231	10,25	1,7	0,03	1,67	38,50788	4,5713
N5-1	4,23	10,259	0,87	0,03	0,84	19,35681	4,3285
N5-2	4,237	10,239	0,72	0,03	0,69	15,90498	4,1818
N5-3	4,228	10,253	1,89	0,03	1,86	42,90689	4,4424
N5-4	4,223	10,218	0,99	0,03	0,96	22,24766	4,2417
N5-5	4,229	10,222	1,26	0,03	1,23	28,45323	4,2757
N5-6	4,222	10,217	1,02	0,03	0,99	22,95058	4,1821
N5-7	4,201	10,225	1,42	0,03	1,39	32,35928	4,1261
N5-8	4,235	10,228	1,13	0,03	1,1	25,39502	4,2968
N5-9	4,211	10,232	0,88	0,03	0,85	19,72755	4,1609
N5-10	4,198	10,203	1,18	0,03	1,15	26,84896	4,0823

Příloha 4: kompletní výsledky zkoušek vrubové houževnatosti
a) teplota +23 °C

	h [mm]	b_N [mm]	E_M [J]	E_z [J]	E_c [J]	a_{cN} [kJ/m ²]	m [g]
SV1-1	4,196	8,08	0,35	0,03	0,32	9,438503	5,1951
SV1-2	4,197	8,105	0,39	0,03	0,36	10,58304	5,2214
SV1-3	4,187	8,133	0,37	0,03	0,34	9,984474	5,2058
SV1-4	4,195	8,126	0,33	0,03	0,3	8,800604	5,1888
SV1-5	4,192	8,112	0,37	0,03	0,34	9,998381	5,1877
SV1-6	4,204	8,071	0,37	0,03	0,34	10,02049	5,2107
SV1-7	4,205	8,071	0,39	0,03	0,36	10,60741	5,1888
SV1-8	4,195	8,065	0,36	0,03	0,33	9,753884	5,1967
SV1-9	4,183	8,07	0,38	0,03	0,35	10,36828	5,2068
SV1-10	4,199	8,077	0,39	0,03	0,36	10,61467	5,2059
SV2-1	4,195	8,16	0,4	0,03	0,37	10,80885	4,9753
SV2-2	4,218	8,147	0,35	0,03	0,32	9,312058	4,8033
SV2-3	4,204	8,152	0,36	0,03	0,33	9,62913	4,9687
SV2-4	4,206	8,156	0,36	0,03	0,33	9,619831	4,9005
SV2-5	4,206	8,19	0,36	0,03	0,33	9,579895	4,8955
SV2-6	4,22	8,136	0,36	0,03	0,33	9,611486	4,8517
SV2-7	4,194	8,198	0,37	0,03	0,34	9,888777	4,9852
SV2-8	4,2	8,163	0,36	0,03	0,33	9,625313	4,9673
SV2-9	4,22	8,205	0,41	0,03	0,38	10,9747	4,9222
SV2-10	4,208	8,178	0,38	0,03	0,35	10,17057	4,9208
SV3-1	4,208	8,179	0,31	0,03	0,28	8,13546	4,7036
SV3-2	4,207	8,135	0,34	0,03	0,31	9,057986	4,7669
SV3-3	4,215	8,132	0,37	0,03	0,34	9,919367	4,8199
SV3-4	4,217	8,137	0,37	0,03	0,34	9,90857	4,8199
SV3-5	4,218	8,129	0,36	0,03	0,33	9,624324	4,8571
SV3-6	4,206	8,139	0,33	0,03	0,3	8,763568	4,8129
SV3-7	4,206	8,135	0,35	0,03	0,32	9,352402	4,8409
SV3-8	4,22	8,142	0,37	0,03	0,34	9,895446	4,8202
SV3-9	4,215	8,124	0,36	0,03	0,33	9,637102	4,871
SV3-10	4,209	8,148	0,36	0,03	0,33	9,622413	4,7693

	<i>h</i> [mm]	<i>b_N</i> [mm]	<i>E_M</i> [J]	<i>E_z</i> [J]	<i>E_c</i> [J]	<i>a_{cN}</i> [kJ/m ²]	<i>m</i> [g]
SV4-1	4,215	8,193	0,33	0,03	0,3	8,687218	4,4523
SV4-2	4,22	8,152	0,35	0,03	0,32	9,301936	4,5765
SV4-3	4,22	8,168	0,34	0,03	0,31	8,993599	4,5529
SV4-4	4,24	8,172	0,35	0,03	0,32	9,235401	4,4301
SV4-5	4,267	8,173	0,33	0,03	0,3	8,60235	4,4161
SV4-6	4,235	8,186	0,31	0,03	0,28	8,07668	4,4549
SV4-7	4,212	8,16	0,36	0,03	0,33	9,601419	4,5468
SV4-8	4,22	8,204	0,37	0,03	0,34	9,820663	4,5936
SV4-9	4,212	8,172	0,33	0,03	0,3	8,715745	4,4216
SV4-10	4,247	8,181	0,35	0,03	0,32	9,210036	4,5656
SV5-1	4,243	8,201	0,33	0,03	0,3	8,621472	4,1625
SV5-2	4,23	8,181	0,34	0,03	0,31	8,95808	4,2858
SV5-3	4,238	8,204	0,32	0,03	0,29	8,340871	4,4261
SV5-4	4,238	8,159	0,33	0,03	0,3	8,676076	4,4513
SV5-5	4,223	8,165	0,35	0,03	0,32	9,280528	4,5529
SV5-6	4,204	8,155	0,31	0,03	0,28	8,167166	4,1805
SV5-7	4,226	8,205	0,34	0,03	0,31	8,940331	4,3912
SV5-8	4,215	8,184	0,31	0,03	0,28	8,116987	4,1864
SV5-9	4,224	8,194	0,32	0,03	0,29	8,378729	4,2825
SV5-10	4,217	8,195	0,34	0,03	0,31	8,970345	4,4494

b) teplota -30 °C

	<i>h</i> [mm]	<i>b_N</i> [mm]	<i>E_M</i> [J]	<i>E_Z</i> [J]	<i>E_c</i> [J]	<i>a_{cN}</i> [kJ/m ²]	<i>m</i> [g]
NV1-1	4,209	8,065	0,31	0,04	0,27	7,953906	5,235
NV1-2	4,204	8,093	0,29	0,04	0,25	7,347977	5,2141
NV1-3	4,208	8,07	0,33	0,04	0,29	8,53982	5,2064
NV1-4	4,2	8,106	0,32	0,04	0,28	8,224361	5,1992
NV1-5	4,21	8,116	0,31	0,04	0,27	7,902047	5,2155
NV1-6	4,216	8,06	0,3	0,04	0,26	7,651344	5,2113
NV1-7	4,208	8,076	0,32	0,04	0,28	8,239218	5,2123
NV1-8	4,218	8,082	0,33	0,04	0,29	8,506924	5,2072
NV1-9	4,208	8,103	0,31	0,04	0,27	7,918487	5,2178
NV1-10	4,213	8,059	0,32	0,04	0,28	8,246799	5,2199
NV2-1	4,221	8,152	0,33	0,04	0,29	8,427883	4,963
NV2-2	4,204	8,145	0,32	0,04	0,28	8,177193	4,8857
NV2-3	4,225	8,182	0,34	0,04	0,3	8,678308	4,8
NV2-4	4,21	8,166	0,33	0,04	0,29	8,435416	4,8766
NV2-5	4,221	8,218	0,33	0,04	0,29	8,360197	4,8914
NV2-6	4,195	8,175	0,36	0,04	0,32	9,331044	4,9998
NV2-7	4,206	8,18	0,33	0,04	0,29	8,428988	4,9728
NV2-8	4,223	8,197	0,33	0,04	0,29	8,377646	4,8122
NV2-9	4,212	8,219	0,3	0,04	0,26	7,510451	4,9949
NV2-10	4,202	8,162	0,34	0,04	0,3	8,747191	4,981
NV3-1	4,219	8,144	0,32	0,04	0,28	8,149121	4,8201
NV3-2	4,22	8,193	0,35	0,04	0,31	8,966156	4,7358
NV3-3	4,208	8,194	0,36	0,04	0,32	9,280648	4,7926
NV3-4	4,226	8,211	0,34	0,04	0,3	8,645611	4,6885
NV3-5	4,212	8,176	0,34	0,04	0,3	8,711481	4,8235
NV3-6	4,223	8,133	0,32	0,04	0,28	8,152413	4,8349
NV3-7	4,221	8,177	-	0,04	-		4,8064
NV3-8	4,219	8,134	0,3	0,04	0,26	7,576343	4,7884
NV3-9	4,219	8,151	-	0,04	-		4,8337
NV3-10	4,209	8,161	0,33	0,04	0,29	8,44259	4,7638

	h [mm]	b_N [mm]	E_M [J]	E_z [J]	E_c [J]	a_{cN} [kJ/m ²]	m [g]
NV4-1	4,223	8,147	0,31	0,04	0,27	7,847747	4,4309
NV4-2	4,223	8,17	0,31	0,04	0,27	7,825654	4,5895
NV4-3	4,225	8,162	0,29	0,04	0,25	7,249644	4,4015
NV4-4	4,231	8,179	0,35	0,04	0,31	8,958153	4,6378
NV4-5	4,222	8,174	0,34	0,04	0,3	8,692974	4,6699
NV4-6	4,235	8,193	0,36	0,04	0,32	9,222605	4,5013
NV4-7	4,242	8,16	0,32	0,04	0,28	8,089044	4,4978
NV4-8	4,222	8,15	0,3	0,04	0,26	7,556097	4,5249
NV4-9	4,22	8,195	0,33	0,04	0,29	8,385647	4,5346
NV4-10	4,237	8,213	0,29	0,04	0,25	7,184222	4,5312
NV5-1	4,229	8,163	0,31	0,04	0,27	7,821252	4,358
NV5-2	4,232	8,192	0,28	0,04	0,24	6,922702	4,3004
NV5-3	4,228	8,189	0,32	0,04	0,28	8,087088	4,2619
NV5-4	4,223	8,163	0,31	0,04	0,27	7,832364	4,2172
NV5-5	4,233	8,186	0,3	0,04	0,26	7,503318	4,2664
NV5-6	4,235	8,194	0,3	0,04	0,26	7,492452	4,2973
NV5-7	4,211	8,186	0,33	0,04	0,29	8,412809	4,226
NV5-8	4,204	8,16	0,28	0,04	0,24	6,996138	4,0956
NV5-9	4,22	8,197	0,31	0,04	0,27	7,805422	4,2191
NV5-10	4,236	8,181	0,32	0,04	0,28	8,079708	4,315