



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

MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ VYROBENÝCH 3D TISKEM

MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMERS PRODUCED BY 3D PRINTING TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Král

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Libor Válka, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Bc. Filip Král**
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:

Mechanické vlastnosti polymerů vyrobených 3D tiskem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba funkčních součástí z polymerních materiálů technologií FDM (Fused Deposition Modeling) je progresivní technologií, v současné době využívané nejen v oblasti "rapid prototyping", ale i při produkci funkčních, pevnostně namáhaných dílů. Vlastnosti zmíněnou technologií připravených funkčních součástí jsou závislé jak na mechanických vlastnostech základních materiálů, použitých při tisku, tak na parametrech vlastního tisku a technologii stavby (strukturu) finálního materiálu.

Cíle diplomové práce:

V teoretické části práce budou popsány dostupné technologie a materiály pro 3D tisk polymerů se zaměřením na FDM (Fused Deposition Modeling) včetně popisu vlivu parametrů výroby na optimální výkon dílu. Dostupné technologie budou analyzovány z pohledu anizotropie fyzikálních a mechanických vlastností finálních produktů.

V praktické části práce budou fyzikální a mechanické vlastnosti několika konkrétních polymerních materiálů hodnoceny na základě:

- statických zkoušek (zkoušek tahem včetně měření modulu pružnosti) v závislosti na velikosti vrstvení a směru vrstvení;
- dynamických zkoušek (rázových zkoušek) v závislosti na velikosti vrstvení a směru vrstvení;
- dynamických (rázových) zkoušek v závislosti na způsobu výroby vrubu ve zkušebním tělese (tisknutý vs. obráběný vrub).

Seznam doporučené literatury:

WANG, Xin, Man JIANG, Zuowan ZHOU, Jihua GOU and David HUI. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. Composites Part B [online]. Elsevier, 2017, 110, 442-458. ISSN 1359-8368.

CHRIST, Susanne, Martin SCHNABEL, Elke VORNDRAN, Jürgen GROLL and Uwe GBURECK. Fiber reinforcement during 3D printing. Materials Letters [online]. Elsevier B.V, 2015, 139, 165-168. ISSN 0167-577X.

TIAN, Xiaoyong, Tengfei LIU, Chuncheng YANG, Qingrui WANG and Dichen LI. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. Composites Part A [online]. Elsevier, 1609, 88, 198-205. ISSN 1359-835X.

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.

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

Práce se zabývá hodnocením závislosti materiálových charakteristik na anizotropii polymerů Nylon 12 a Ultem 9085 vyrobených 3D tiskovou technologií Fused Deposition Modeling. Hodnocení materiálových charakteristik bylo provedeno na základě zkoušek tahem a neinstrumentovaných rázových zkoušek. Bylo dokázáno, že materiálové charakteristiky jsou silně závislé na anizotropii, tj. na velikosti a směru nanášeného vrstvení obou typů polymerů.

Abstract

The thesis deals with the dependence of mechanical characteristics on the anisotropy of polymers Nylon 12 and Ultem 9085 made by a 3D printing technology Fused Deposition Modeling (FDM). The evaluation of the material characteristics was performed on the basis of tensile and non-instrumental impact tests. It was proven that the material characteristics are strongly dependent on anisotropy, i.e. on layer thickness and raster angle for both types of polymers.

Klíčová slova

polymer, Fused Deposition Modeling, Nylon 12, Ultem 9085, zkouška tahem, rázová houževnatost, velikost vrstvení, směr vrstvení

Keywords

polymer, Fused Deposition Modeling, Nylon 12, Ultem 9085, tensile test, Charpy impact test, layer thickness, raster angle

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRÁL, F. *Mechanické vlastnosti polymerů vyrobených 3D tiskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Válka, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího diplomové práce s využitím odborné literatury, která je v práci citována a uvedena v seznamu použitých zdrojů.

V Brně 25. 5. 2018

.....
Filip Král

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří panu Ing. Liboru Válkovi, CSc. za odborné vedení práce, ochotu, čas a cenné rady, které mi umožnily vypracovat tuto práci. Dále bych rád poděkoval celé mé rodině za podporu během studia.

1	Úvod	1
2	Technologie aditivní výroby	4
2.1	Přehled používaných aditivních technologií.....	4
2.2	Fused Deposition Modeling	6
2.3	Využití aditivní technologie FDM v průmyslu.....	8
2.4	Materiály používané pro FDM technologii aditivní výroby	8
3	Vliv parametrů výroby na vlastnosti produktu	11
4	Experimentální část.....	19
4.1	Experimentální materiál.....	19
4.2	Kondicionování.....	25
4.3	Výsledky experimentů.....	25
4.4	Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy	34
5	Diskuze.....	42
6	Závěr.....	49
	Literatura.....	50
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	54
	Seznam obrázků.....	56
	Seznam tabulek	59
	Seznam příloh	60

1 Úvod

Technologie aditivní výroby, známá také pod pojmem 3D tisk se začala intenzivně rozvíjet přibližně od osmdesátých let minulého století. Za první metodu 3D tisku lze označit stereolitografii patentovanou Charlesem Hullem v roce 1986. Tato technologie je založena na principu vytvrzování fotopolymerní pryskyřice ultrafialovým zářením. Od té doby se sortiment používaných 3D tiskových technologií následným vývojem významně rozšířil. Díky vývoji lze tisknout modely, sloužící nejen jako funkční prototypy, ale také jako konečné produkty. Paleta používaných materiálů pro vytištěné modely se neustále rozšiřuje, čímž lze optimalizovat poměr užitečných, resp. funkčních vlastností modelu a jeho ceny. [1]

Do popředí používaných technologií se v současnosti dostává technologie Fused Deposition Modeling (FDM), která patří k nejpoužívanějším technologiím aditivní výroby díky vysoké kvalitě tištěných modelů a díky široké paletě používaných polymerních materiálů. Produkty FDM nacházejí své uplatnění v širokém rozsahu, např. jako nástroje, testovací součásti i do náročných prostředí nebo funkční prototypy plastových částí s mechanickými vlastnostmi blízkými se produktům vyrobených konvenčními technologiemi. [1,2]

Mezi velmi často používané polymery používané touto technologií v oblasti FDM patří polyamid (PA) a polyetherimid (PEI) známé pod obchodními názvy jako Nylon a Ultem. Tyto polymery existují v několika variantách. Patří mezi ně např. Nylon 12 a Ultem 9085. Produkty z Nylonu 12 vynikají vysokou pevností a tuhostí. Ultem 9085 je kvůli svým mechanickým vlastnostem velmi často využíván v automobilním, kosmickém či leteckém průmyslu. K tomu navíc přispívá fakt, že působí jako retardant hoření. [2,3]

Cílem této práce je posouzení vlivu anizotropie na materiálové charakteristiky polymerů Nylon 12 a Ultem 9085 zhotovených technologií FDM. Anizotropií materiálů se rozumí rozdílná velikost a směr nanášeného vrstvení. Vliv anizotropie na vlastnosti výše uvedených polymerních materiálů jednotlivých variant polymerů jsou hodnoceny na základě výsledků zkoušek tahem a neinstrumentovaných rázových zkoušek.

1 Teoretická část

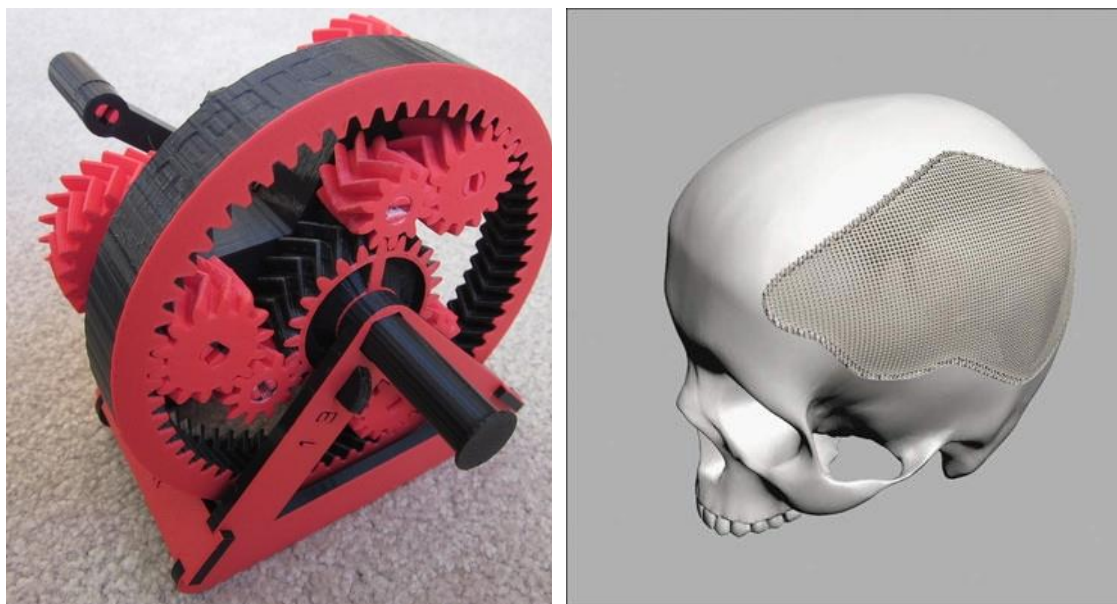
Historie technologie aditivní výroby

Technologie aditivní výroby (3D tisk) se na první pohled jeví jako nový způsob výroby, avšak její pravý počátek sahá do druhé poloviny minulého století. Již v šedesátých letech dvacátého století se uvažovalo o způsobech, jak využít výstup vzniklých dat v počítači jinak než na papír ve formě textu. Následovala řada let výzkumu a vývoje zařízení, které by dokázalo vytvořit produkt na základě návrhu uvedeného v počítači. Za nejvýznamnějšího průkopníka v oblasti aditivní výroby je považován Chuck Hull (některé zdroje uvádějí jméno Charles Hull), který je často přezdíván jako otec 3D tisku. V roce 1984 si nechal patentovat aditivní technologii nazývanou Stereolitografie (SLA) a v roce 1986 založil společnost 3D Systems, jejímž prvním produktem bylo zařízení SLA-1, které umožňovalo výrobu trojrozměrného modelu na základě datového souboru z počítačů. Tato metoda byla založena na vytvrzování roztavené fotonopolymerní pryskyřice pomocí ultrafialového záření. Po vytvrzení materiálu vznikl pevný plastový model. Vyrobené modely byly nepřesné a nedisponovaly tak vynikajícími mechanickými vlastnostmi, kterými disponují modely v současné době. Nicméně tento stroj dokázal za velice krátkou dobu vyrobit vysoce komplexní modely. Postupem času byly na základě zapůjčené licence založeny nové společnosti, díky nimž se urychlil vývoj aditivní technologie. [1,2]



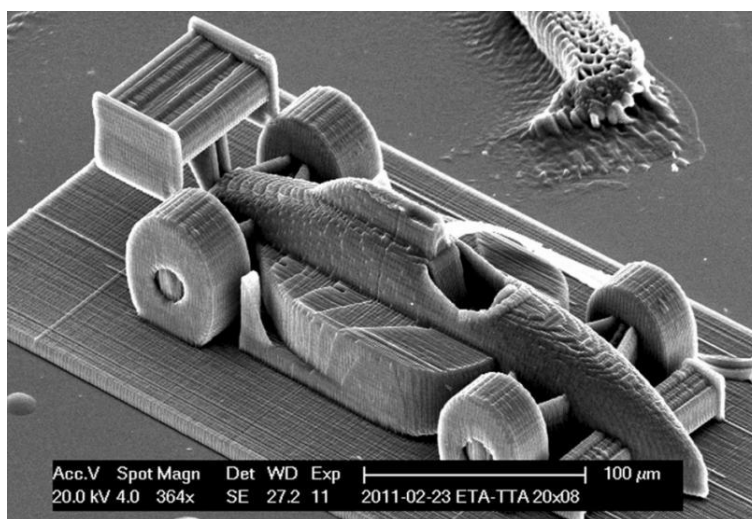
Obr. 1 První komerčně dostupná 3D tiskárna SLA-1 [4]

V současnosti je technologie aditivní výroby hojně rozšířená a díky svému vývoji nachází mnohem větší uplatnění. Zároveň se zvětšila i marketingová síť společností zabývajících se touto technologií. Technologií aditivní výroby lze v dnešní době vyrobit téměř jakýkoliv tvar modelu pro různé aplikace. Nadějně se jeví výzkum zaměřený do medicínské oblasti. 3D tiskové produkty nacházejí uplatnění jako např. náhrady kloubních chrupavek nebo kostní implantáty. [5]



a) b)
Obr. 1 Příklady použití 3D tiskových technologií, a) planetová převodovka b) tělní implantáty [2,6]

Technologie aditivní výroby se rozšířila i do oblastí nanotechnologií, kde je známá jako nano-printing. Možnosti nanoprintingu lze demonstrovat kupříkladu modely v nanometrovém měřítku, viz nanoformule o délce 285 μm na obr. 3, vytisknutá pomocí dvoufotonové litografie. [7]



Obr. 3 Nanomodel formule tisknutý pomocí dvoufotonové litografie [7]

Díky postupnému vývoji a zkvalitňování vyrobených (vytisknutých) produktů je možné, že v budoucnosti 3D-tisk nahradí velkou škálu konvenčních materiálů a technologií. Mnohem více se začíná uplatňovat uživatelský 3D-tisk jako důsledek jednoduchosti a cenové dostupnosti 3D tiskáren. Potenciálním konečným uživatelem mohou být v budoucnosti např. nemocnice, pro které by byl okamžitý tisk funkčních tělních implantátů či náhrad tělních orgánů velkým přínosem. Uživatelský 3D tisk může také v budoucnosti zjednodušit poštovní službu či nákladný a složitý transport produktů. Lze také předpokládat výraznější rozvoj 3D tisku v potravinářském průmyslu, ve kterém již teď nachází uplatnění např. tisknutím produktů z čokolády. [4]

2 Technologie aditivní výroby

Technologie aditivní výroby (3D tisk) je neustále vyvíjející se výrobní technologií, která slibuje zredukování výrobních nákladů a zkrácení doby výroby produktů v porovnání s tradičními technologiemi. Dalšími výhodami technologie je minimalizace odpadu, možnost výroby modelů složitých tvarů a zpracování modelů bez potřeby neustálého dozoru. [8]

Klíčovým principem technologie aditivní výroby je postupné nanášení vrstev, kdy každá vrstva představuje průřez trojrozměrným modelem, vytvořeným v počítačovém softwaru (3D CAD – Computer-Aided Design). Výsledným produktem je pak pevný trojrozměrný model. [9]

3D tisk je pro sériovou výrobu standardních dílů nevhodný z důvodu vysokých nákladů na samotný tisk modelů. Tato produkční sféra je v současné době pokryta konvenčními technologiemi, jakými jsou např. vstřikování či vyfukování polymerů. 3D tisk je naopak vhodný pro produkci speciálních dílů v prototypovém nebo malosériovém režimu. Proto termín aditivní technologie zahrnuje mnoho podmnožin, kupříkladu Rapid Prototyping (RP), Direct Digital Manufacturing (DDM) apod. [8,10,11]

2.1 Přehled používaných aditivních technologií

Volba nejvhodnější technologie aditivní výroby pro konkrétní aplikaci může být obtížná. Velmi rozsáhlá nabídka dostupných 3D tiskových technologií nabízí širokou škálu výsledných vlastností produktů. Rozdíly v těchto technologiích se mohou lišit např. v rozměrové přesnosti, v povrchové struktuře produktu, omezené škále použitelných materiálů či v postprocessingu. [1,9]

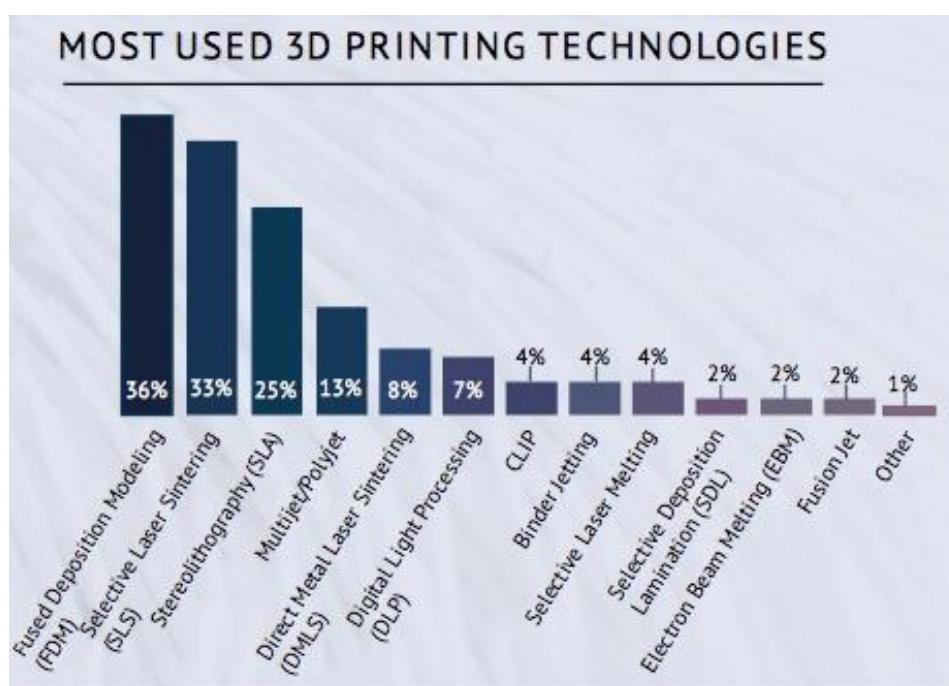
Oblíbeným způsobem klasifikace 3D tiskových technologií je třídění podle toho, zda proces výroby využívá technologii extruze, laser, či tiskovou technologii. Dalším způsobem klasifikace 3D tiskových technologií je klasifikace podle typu vstupního materiálu. [9]

Následující tabulka klasifikuje nejpoužívanější 3D tiskové technologie dle procesu výroby.

Tab. 1 Rozdělení 3D tiskových technologií [9,10]

Způsob procesu výroby	Typ technologie
Extruze materiálu	FDM
Fotopolymerizační proces	SLA
Spékání prášků	SLS
Vstřikování materiálu	MultiJet/PolyJet
Spojování vyříznutých vrstev	LOM
Vstřikování kapalného pojiva	Binder Jetting
Spojování listů materiálu	Sheet Lamination
Tavení materiálu termální energií	Direct Energy Deposition

Nejvíce používanou technologií 3D tisku je technologie FDM (Fused Deposition Modeling), viz obr. 4. Zastoupení technologie FDM činilo v roce 2017 36 % všech 3D tiskových technologií na trhu. [12]



Obr. 4 Přehled nejpoužívanějších technologií aditivní výroby [12]

Na rozdíl od tiskáren SLS nebo MultiJet modelling jsou tiskárny FDM dostatečně malé na to, aby mohly být postaveny na stůl stejně jako 2D tiskárny. Proces výroby je jednoduchý a vyžaduje nižší náklady než např. technologie Selective laser sintering (SLS) či Electron Beam Melting (EBM). Protože technologie FDM není omezena pouze na materiály, které musí být vytvrzovány ultrafialovým zářením, disponuje vysokým potenciálem využití materiálů. [1,10]

Stereolitografie (Stereolithography-SLA) je nejstarší technologií aditivní výroby. Využívá fotopolymerní pryskyřici jako materiál pro výsledný produkt. Vrstvy pryskyřice jsou po nanesení na tiskovou podložku vytvrzeny ultrafialovým světlem. Stereolitografie je třetí nejpoužívanější technologií díky přesnosti a rychlosti tiskového procesu. Je vhodná pro výrobu malých, hladkých dílů s vysokou přesností. [10]

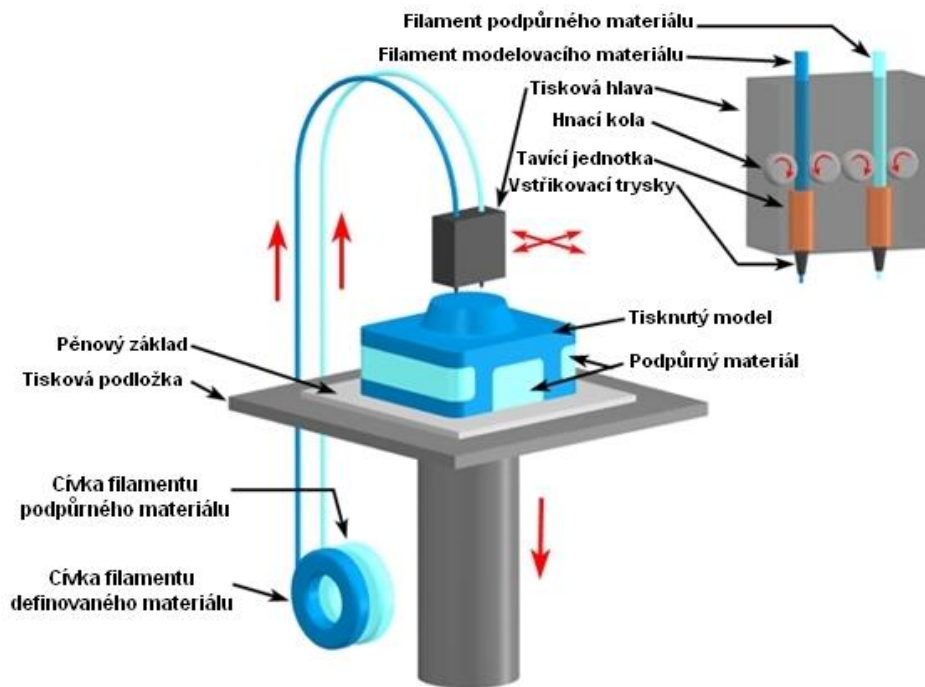
Technologií spékání laserem (Selective laser sintering – SLS) je možné vyrábět prototypové modely v designové části vývoje výrobku nebo geometricky složité modely. Technologie využívá práškový materiál, který je po natavení na teplotu blízkou teplotě tání spékán (sintrován) laserem na pracovní podložce. Používanými materiály bývají nejčastěji termoplasty polyamid (PA) nebo polyetherketon (PEEK). [1,10]

Technologie vstřikování materiálu (Multi-Jet modeling, známá také jako Poly-Jet modeling) je pro průmysl významná zejména kvůli rychlé výrobě složitých, avšak kvalitních modelů. Tiskový proces je podobný tiskovému procesu 2D tiskáren. Tisková hlava nanáší po jednotlivých vrstvách fotopolymerní pryskyřici v tekutém stavu na tiskovou podložku. Ta je okamžitě vytvrzena ultrafialovým zářením pomocí UV lampy zabudované v tiskové hlavě. Často používanými materiály jsou termoplasty akrylonitril-butadien styren (ABS) či PA. [6,10]

2.2 Fused Deposition Modeling

Technologie Fused Deposition Modeling (FDM) byla původně vyvinuta v roce 1989 pro zjednodušení procesu výroby prototypů. Nejznámějšími obchodními zástupci této technologie jsou firma Stratasys, Sabic, 3D Systems. Technologie FDM produkuje pevné, odolné a velmi přesné modely. [1,8]

Základem procesu FDM je jako u každé jiné aditivní technologie CAD model, který je exportován do stereolitografického (.STL) souboru ve formě příkazů pro tiskárnu. Na základě jednotlivých příkazů, tiskárna z cívky, prostřednictvím systému kladek, umístí do tiskové hlavy určité množství polymerního filamentu. Polymerními filamenti mohou být termoplasty, elastomery či vosky. V tiskové hlavě dochází k natavení filamentu, který vlivem vysoké teploty přejde do polotekutého (semi-liquid) stavu. Dle příkazů ze softwaru je nanášena vrstva polotekutého materiálu. Tisková podložka pak klesne ve směru osy Z a na vzniklou vrstvu je nanášena další vrstva materiálu. Celý proces se opakuje do vytvoření finálního tvaru modelu. [4,9]



Obr. 5 Princip technologie FDM [13]

Materiály pro tisk technologií FDM lze rozdělit na modelovací a podpůrné. Podpůrné materiály slouží jako podpora pro výrobu příslušných tvarů (převisů, dutin, vybrání). Podpůrný materiál také zabraňuje deformaci modelu při tisku. V mnoha případech se jedná o materiály rozpustné ve vodě nebo v alkalických roztocích, takže je lze po dokončení tisku snadno odstranit. Materiály ve vodě nerozpustné se z modelu odstraňují mechanickou cestou (odlamováním, odbrušováním apod.). [14]

Proces FDM je časově závislý na přesnosti výroby produktu. Čím přesnější tvar je požadován, tím je proces výroby delší. [15] Hlavní přednosti a nedostatky technologie FDM jsou stručně shrnuty v tabulce 2.

Tab. 2 Výhody a nevýhody technologie FDM [8,10,14]

Výhody	Nevýhody
Vysoká přesnost při použití tenkých nanášecích vrstev	Méně kvalitní modely než u ostatních technologií
Dobrá pevnost modelů	Požadován podpůrný materiál u složitějších tvarů
Minimum odpadu	Drsnější povrch modelu po odstranění podpůrného materiálu
Odolnost materiálů a rozměrová stálost při vysokých teplotách	Zanášení trysek roztaveným filamentem
Adheze k tiskové podložce není problém	Materiály s vyšší tloušťkou vrstev vyžadují vyšší náklady na výrobu a delší čas výroby
Do jednotlivých trysek může být navíjen jiný materiál – možnost tisku kompozitů	Vytlačovací trysky mají kruhový průřez a není tak možné vytisknout přesně ostrou hranu

2.3 Využití aditivní technologie FDM v průmyslu

Technologie FDM se převážně používá pro rychlé prototypování – Rapid Prototyping nebo pro rychlou výrobu konečných dílů – Rapid Manufacturing. Prostřednictvím tištěných prototypů se testuje především pevnost a tuhost, vyrobiteľnost, schopnost montáže sestav a funkčnost dílů před spuštěním sériové produkce. Tisk prototypů také může odhalit chyby ve výkresové dokumentaci nebo chyby v koncepci produktu. Vytisknutý prototyp může také sloužit pro designérské posouzení produktu.

Synonymem pro Rapid Manufacturing (RP) je Direct Digital Manufacturing (DDM). Konečnými díly se rozumí funkčně namáhané součásti nebo trvanlivé výrobní nástroje. Proces DDM je často považován pouze za rozšíření procesu Rapid Prototyping. Na rozdíl od RP vyžaduje DDM mnohem větší důraz na kvalitu dodávaného materiálu a na kvalitu tisku. Jelikož se aditivní výroba stává nedílnou součástí inženýrských procesů a její vývoj jde neustále kupředu, mnoho vytisknutých modelů se používá spíše jako konečné produkty než prototypy. DDM nachází uplatnění v automobilovém, leteckém, spotřebním či vojenském průmyslu a dokonce i v lékařství. Je pravděpodobné, že DDM bude považováno za významnou alternativu ke konvenčním technologiím výroby. Prozatím je však omezeno vlastnostmi tisknutých materiálů. [1,4,9,10]

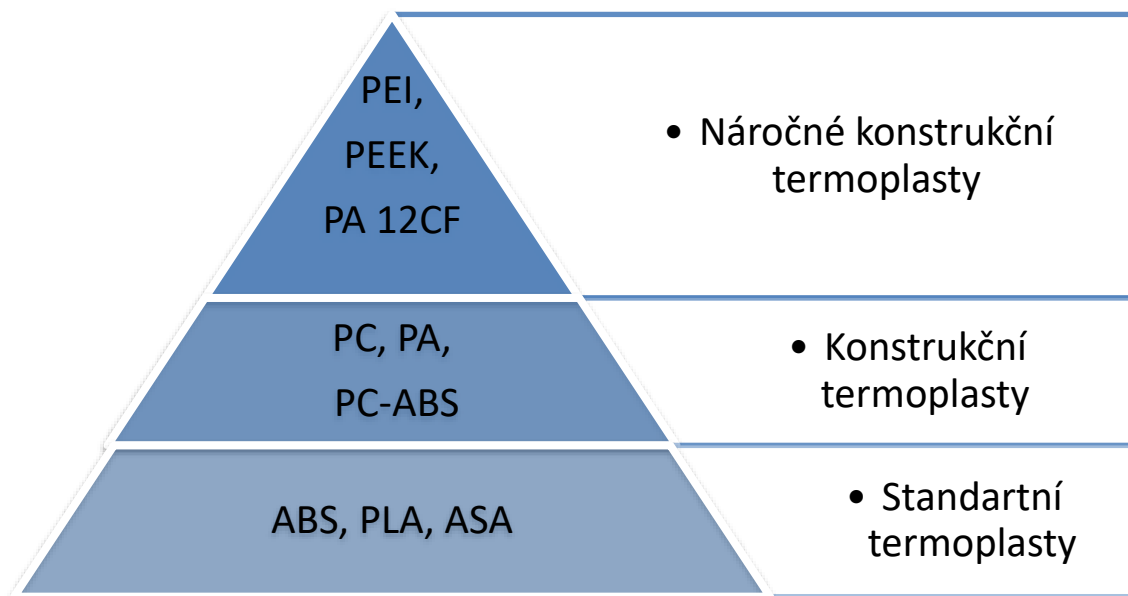
FDM vykazuje vyšší potenciál pro tisknutí konečných výrobků se schopností konkurovat běžným technikám zpracování polymerů. V současnosti je paleta materiálů pro FDM velice rozšířená a velice využívána. [11]

2.4 Materiály používané pro FDM technologii aditivní výroby

Před několika lety byly nejpoužívanějšími materiály pro technologii FDM polymery ABS a polyactid acid (PLA). V dnešní době je sortiment používaných materiálů mnohem širší. Novými materiály jsou např. polykarbonát (PC), PA, polyetherimid (PEI), akrylonitril-butadien styren – biokompatibilní (ABSi) apod. Rozšiřující se sortiment tisknutých polymerů může optimalizovat poměr kvality a ceny tisku. Technologií FDM lze tisknout i keramické materiály. Všechny materiály pro FDM jsou dodávány ve formě termoplastického filamentu, který vzniká přetvořením směsí termoplastických granulí. [1,2,6,14]

Výběr použitelných termoplastických filamentů je omezen schopností viskózního stavu při jejich roztavení. Kvalitu tisknutého modelu ovlivňuje použitý materiál, hodnoty jeho mechanických vlastností a přesnost tisku jednotlivých vrstev. Výběr správného typu polymeru je také závislý na druhu jeho aplikace (rapid prototyping, direct digital manufacturing, apod). [9,14]

Dle oblastí použití lze používané termoplasty rozdělit do tří skupin, viz obr. 6.



Obr. 6 Rozdělení používaných termoplastů dle oblastí použití, upravené dle citace [16,17]

První skupina (standardní termoplasty) zahrnuje, např. termoplasty PLA, ABS ASA (Akrylonitril-styrén-akrylát) apod. Vytisknuté modely jsou vystaveny nízkému mechanickému namáhání a nižším provozním teplotám. [16,17]

PLA je biologicky rozložitelný a zdravotně nezávadný polymer, a proto je možné jej používat i v lékařství či ve spotřebním a potravinářském průmyslu. Jeho předními vlastnostmi jsou vysoká pevnost, tuhost a odolnost proti deformacím. PLA je extrudován při nízkých teplotách, z důvodu nízké teploty skelného přechodu, viz tab. 3. [2,18]

ABS je amorfním termoplastem disponujícím vysokou pevností, odolností proti chemickému prostředí a vyšší teplotou skelného přechodu, viz tab. 3, čímž je zaručena rozměrová stálost při vyšších teplotách na rozdíl od PLA. Vytisknuté modely slouží jako koncepční nebo finální produkty. Spolu s polymery PLA a PC je tento polymer nejpoužívanější z důvodu nízké teploty tání. [2,15,18]

Druhá skupina používaných termoplastů je často užívána pro konstrukční účely. Do této skupiny patří např. PC, PC-ABS (polykarbonát/akrylonitril-butadién-styrén), PA apod. Tyto termoplasty musí zaručovat vyšší hodnoty mechanických vlastností, vyšší odolnost proti chemikáliím a vyšší tepelnou odolnost. [16,17]

PA je univerzálním materiálem technologie FDM, často označovaný jako Nylon. PA (Nylon) je široce využíván zejména kvůli vysoké odolnosti vůči chemickému prostředí, vysoké pevnosti a vysoké tepelné odolnosti. Vysoká pevnost a pružnost zajišťuje vysokou odolnost proti únavě. Materiál je také vysoce plastický, může vykazovat (2 – 225) % deformace. Vlákna Nylonu se vyznačují vysokou schopností přijímat vodu,

a to buď z přímého kontaktu s ní, nebo z atmosféry. Tato schopnost představuje zároveň výhodu i nevýhodu, neboť se vzrůstajícím obsahem vody roste houževnatost a tažnost, ale klesá tvrdost a tuhost. Modely obsahující tenké vrstvy materiálu zaručují vyšší flexibilitu, zatímco modely obsahující tlustší vrstvy materiálu zaručují vyšší tuhost a pevnost. Tento materiál se využívá nejčastěji v leteckém a automobilovém průmyslu. Z Nylonu se vyrábí výrobní nástroje, přípravky, komponenty odolné proti vibracím a funkční prototypy. [1,2,13,18,36]

Tab. 3 Přehled teplot při tisku modelů z vybraných materiálů [2,6,13,20,21]

Materiál	Teplota skelného přechodu [°C]	Teplota tisku [°C]	Teplota tiskové podložky [°C]
ABS	100	240	60 nebo nevyhřívána vůbec
PLA	63	210	115
PA 6	45	245	115
PEI (Ultem 9085)	217	375-420	155-160

Termoplasty pro náročné konstrukční účely disponují vysokou tepelnou odolností, vysokými hodnotami mechanických vlastností a vysokou odolností proti chemikáliím. Významnými termoplasty pro tyto aplikace jsou PEI, PEEK (Polyetherketon) nebo Polyamid vyztužený uhlíkovými vlákny (PA 12CF). [20]

Ultem je obchodní název polyethermidu. Ultem je významným konstrukčním materiálem pro náročné aplikace, zejména díky jeho vysoké měrné pevnosti (tj. poměr pevnosti a hmotnosti) a vysokému hodnocení FST (z anglického slova Fire, Smoke, Toxicity). Materiál zaručuje nehořlavost (v materiálových listech je uváděn jako retardant hoření), neuvolňuje škodlivý kouř a není toxický. Díky těmto vlastnostem je využíván nejen pro rapid prototyping, ale i pro výrobu velmi kvalitních koncových komponent v transportním průmyslu, zejména v automobilovém a leteckém. Podpurný materiál u tohoto polymeru může být odstraněn obsluhou pouze mechanicky za pomoci speciálních nástrojů. Podpurný materiál lze nejlépe odstranit po vytištění modelu, který ještě nestačil vychladnout, tj. při teplotách modelu cca 170 °C. [3,13,22]

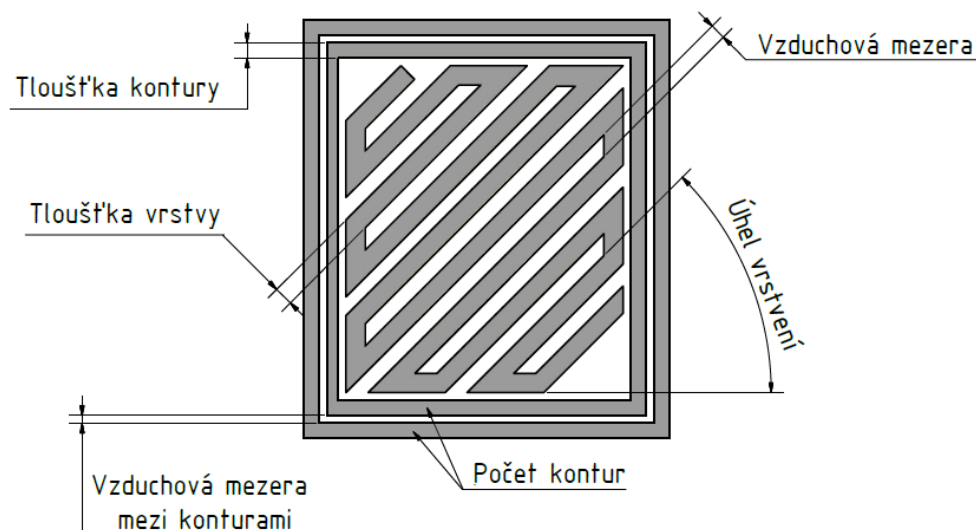
Pro experimentální část diplomové práce byly použity polymery Nylon 12 a Ultem 9085.

3 Vliv parametrů výroby na vlastnosti produktu

Mechanické vlastnosti 3D tiskových modelů jsou důležitými indiciemi pro vyhodnocování kvality tisku. Tyto vlastnosti lze výrazně ovlivňovat kombinací parametrů výroby. Optimálně zvolenými parametry výroby lze dosáhnout vysoké kvality tisknutého dílu. Proto je důležité se na tyto parametry zaměřit. [11,23]

Mezi parametry výroby 3D tiskem patří zejména tloušťka vrstvy, tloušťka kontur, počet kontur, šířka nanášených vrstev, úhel vrstvení, orientace vzorku při výrobě, vzor výplně, vzduchová dutina mezi jednotlivými vrstvami, vzduchová dutina mezi konturami, vzduchová dutina mezi konturou a vrstvou a teplota tisku. [23]

Dle dostupných studií má nejvýznamnější vliv na dobu výroby a kvalitu vyrobených produktů tloušťka vrstev, vzduchová dutina mezi jednotlivými vrstvami, počet kontur a směr orientace modelu při výrobě. Tloušťkou vrstvy se rozumí výška extrudované vrstvy, která je závislá na použitém modelovacím materiálu a průměru trysky v tiskové hlavě. Konturou se rozumí obvodová vrstva tvořící tzv. obálku modelu, zajišťující vazbu jednotlivých vrstev. [24]



Obr. 7 Popis některých parametrů výroby, upravené dle citace [25]

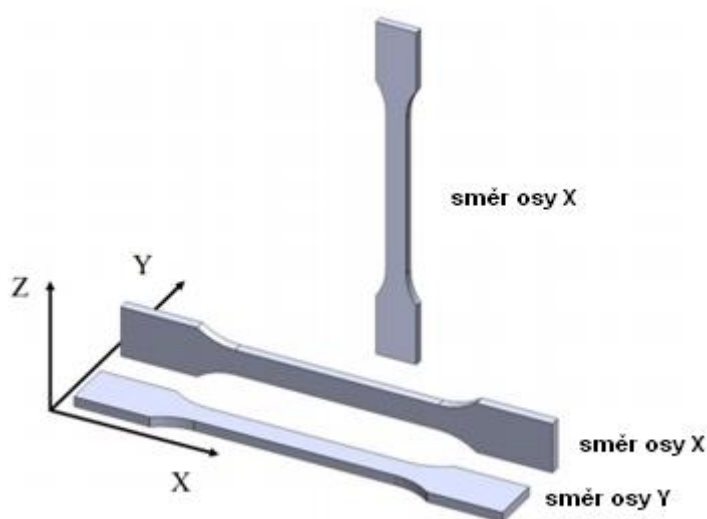
3D tiskové modely jsou testovány statickými i dynamickými zkouškami. Mezi statické zkoušky patří např. zkouška tahem či tlakem. Mezi dynamické pak patří např. zkouška rázové houževnatosti. Každý materiál z palety materiálů pro FDM technologii vyžaduje díky své struktuře a vlastnostem jinou kombinaci parametrů výroby. Kvalitu výsledného modelu ovlivňuje také jeho orientace při tisku. Výrazný vliv na mechanické vlastnosti má prostředí, ve kterém se vytisknutý materiál nachází, viz kapitola 4. [26]

Vliv orientace modelu při tisku

Tištěné modely mají různou strukturu v závislosti na orientaci modelu při výrobě. Jejich struktura je spíše podobná struktuře kompozitů než struktuře plastů vyrobených tradičními technologiemi, např. injekčním vstřikováním. [8,26]

3D model může být tisknut v různých orientacích, viz obr. 8.:

- tisk ve směru X – na hraně modelu (on its edge),
- tisk ve směru Y – na ploché straně modelu (flat lying)
- tisk ve směru Z – ve svislé poloze modelu (upright)

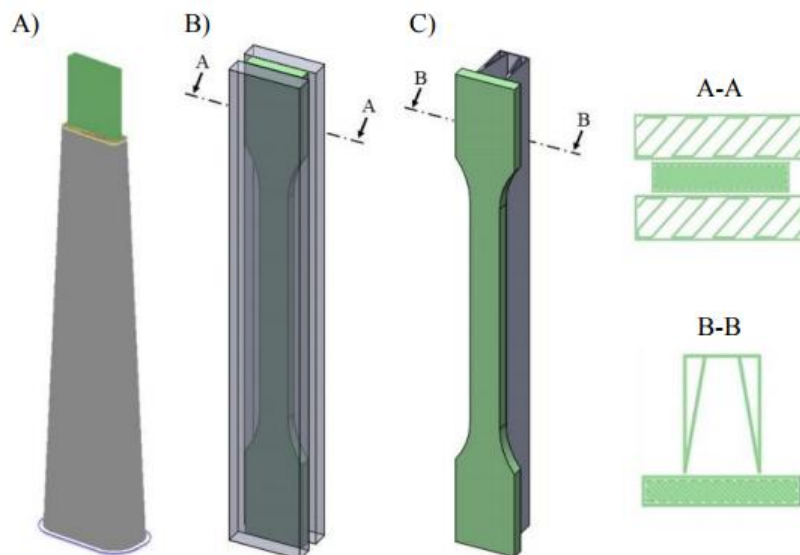


Obr. 8 Orientace tisknutého modelu při jeho výrobě [26]

Tisknutý materiál může být i v takové poloze, která svírá s rovinou XY, viz obr. 8 úhel 45°. Výsledné vlastnosti materiálu vytištěného tímto způsobem jsou však v porovnání s výše uvedenými orientacemi vzorku nejhorší. [27]

Pro tisk ve směru osy Z je potřeba použít podpurnou konstrukci tisknutého modelu. Tato podpurná konstrukce udržuje tisknutý model ve svislé poloze a zabráňuje jeho vychýlení. Cílem je zvýšit kvalitu tisku. Na obr. 9 jsou uvedeny tři často používané typy podpor [26]:

- a) standardní podpora nazývaná "surround" upevněná za prodloužený konec tahové tyče, který se potom ručně odřeže,
- b) tahová tyč je obklopena dvěma podporami z obou stran, toto upevnění je nazýváno "boxed",
- c) podpora nazývaná "stabilized", při které je tisknutý model připevněn ke stabilizační stěně ve dvou bodech.



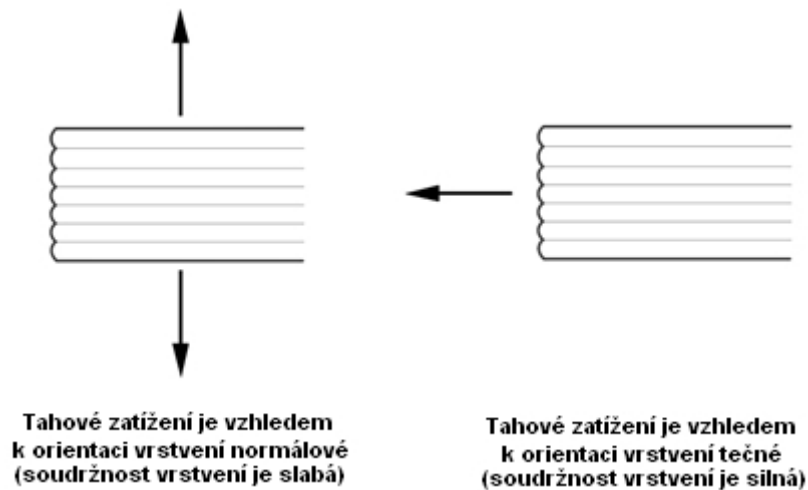
Obr. 9 Příklady ustavení a upevnění tisknutého modelu pomocí podpůrné konstrukce [26]

Volba vhodné orientace modelu ovlivňuje také dobu a složitost tisku. Válec, viz obr. 10, může být vyroben ve směru Z (vertikální poloha) nebo XY (horizontální poloha). Při tisknutí válce v horizontální poloze, bude počet nanášených vrstev výrazně snížen, což u velkorozměrných výrobků vede k úspoře času. [24]



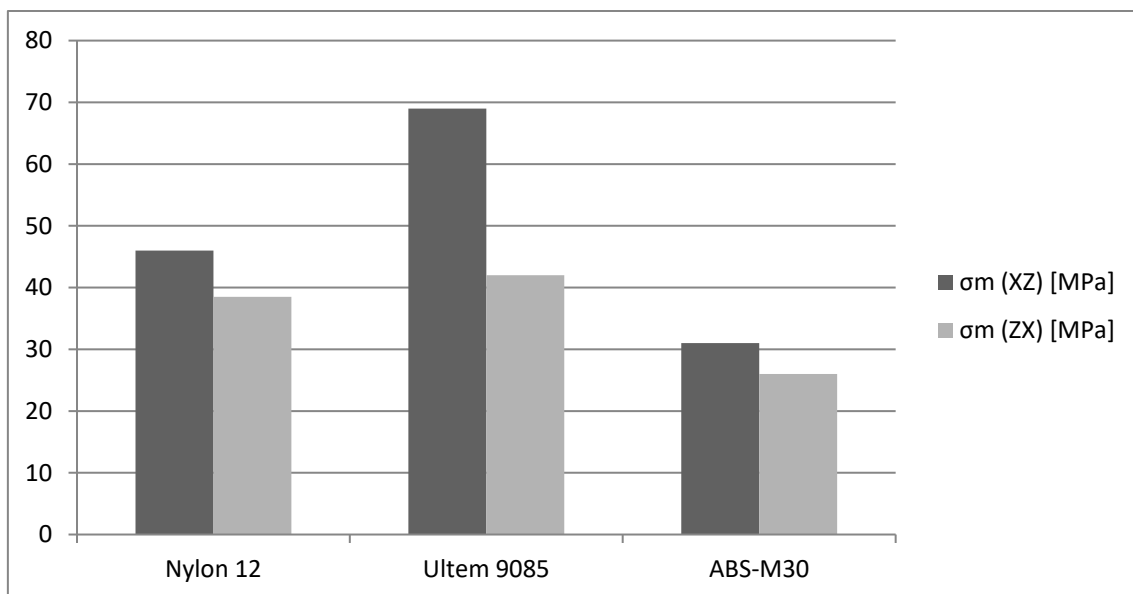
Obr. 10 Válec vytisknutý ve směru Z a Y [28]

U modelů používaných jako funkční prototypy nebo konečné produkty je potřeba také zvážit směr a velikost zatížení. Vrstvy nanášené technologií FDM kolmo na směr tahového zatížení mají vyšší tendenci k delaminaci a vzniku trhliny než vrstvy nanášené ve směru tahového zatížení, viz obr. 11. [24]



Obr. 11 Vliv směru zatížení vzhledem ke směru naneseného vrstvení na jeho soudržnost [24]

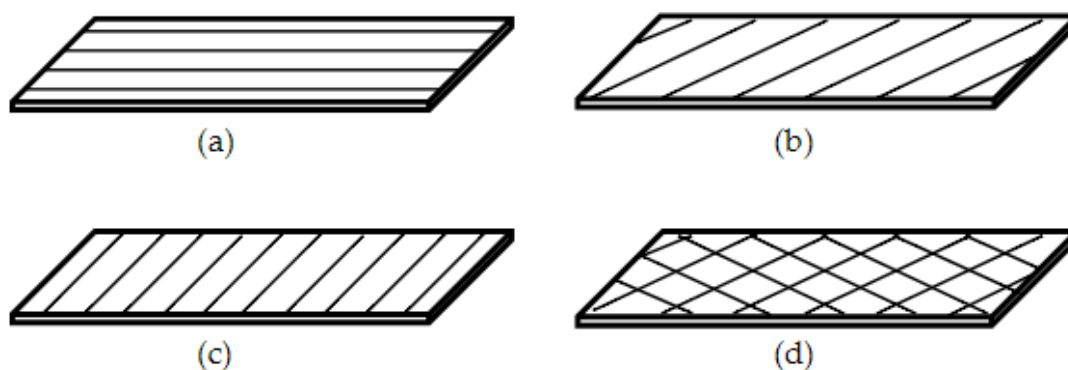
Modely, u kterých je směr zatížení paralelní se směrem vrstvení disponují vyšší mezí pevností v tahu a vyšší tažností. Změna tuhosti (modulu pružnosti v tahu) v závislosti na orientaci modelu při tisknutí je však minimální. Rázová houževnatost modelů vytisknutých tímto způsobem dosahuje vyšších hodnot, neboť směr vrstvení je kolmý na působící zatížení. [29]



Obr. 12 Závislost meze pevnosti na orientaci modelu při 3D tisku [29]

Vliv úhlu nanášení vrstev

Nanášené vrstvy tvoří strukturu tištěného modelu a současně i jeho výplň. Výplň modeluje funkci jeho objemu, tj. s rostoucí schopností vrstev vyplnit model, roste i jeho objem. Vrstvy mohou být na sebe nanášeny buď v jednom definovaném směru nebo ve více směrech. Úhel nanášení vrstev se pohybuje od 0° do 90° . Je definován jako úhel, který svírají vlákna s delší hranou vzorku. Nejčastějšími směry orientace vrstev jsou směry s úhlem 0° , 45° , 90° nebo kombinace $+45^\circ/-45^\circ$ a $0^\circ/90^\circ$. [11,30]



Obr. 13 Příklad orientace vrstvení vzorků a) 0° b) 45° c) 90° d) $+45^\circ/-45^\circ$ [15]

Úhel nanášení vrstev ovlivňuje schopnost modelu odolávat mechanickému zatížení. Volbou správného úhlu nanášení vrstev lze zlepšit hodnoty mechanických vlastností materiálu. Vrstvy nanášené pod nižším úhlem vrstvení zaujímají větší část objemu modelu a nevzniká tak tolik nevyplněného prostoru. Tím se vytváří silnější mezivrstevová vazba a minimalizují se problémy se vzájemnou přilnavostí vrstev. U modelů s nanášenými vrstvami pod vyšším úhlem vzniká naopak více nevyplněného prostoru a mezivrstevové vazby jsou slabší. Model také vyžaduje nanesení více vrstev, což zhoršuje mechanické vlastnosti. Modely kombinující úhly vrstvení $0^\circ/90^\circ$ a $+45^\circ/-45^\circ$ disponují vysokou hustotou vláken. Jednotlivé vrstvy se protínají ve dvou směrech a zaplňují tak prázdná místa. [23,31]

Pro polymer polypropylen (PP) je nejlepší volbou pro dosažení vysoké meze pevnosti v tahu a vysokého modulu pružnosti v tahu úhel vrstvení 0° . Naopak nejméně efektivní volbou je úhel vrstvení 45° a kombinace úhlů vrstvení $45^\circ/-45^\circ$. Polypropylenové modely s orientací vrstev 90° se vyznačují menší soudržností vláken při tahové zkoušce, avšak jejich soudržnost a tuhost lze zvýšit kombinací vrstev 0° a 90° . [11]

Podobné vlastnosti vykazuje i vytisknutý polymer PEEK, jehož mez pevnosti v tahu je nejvyšší při vrstvení $0^\circ/90^\circ$ a nejnižší při vrstvení $45^\circ/-45^\circ$ a $30^\circ/-60^\circ$. Modely s úhlem vrstvení $30^\circ/-60^\circ$ a $45^\circ/-45^\circ$, jsou vystaveny tahovému i smykovému napětí. Tím dochází k degradaci mechanických charakteristik. [23]

Polymer Ultem 9085 naopak vykazuje lepší hodnoty mechanických vlastností u vzorků se směrem vrstvení 45° než u vzorků se směrem vrstvení 90° ; nejlepších hodnot mechanických vlastností při zkoušce tahem je ale dosaženo u vzorků se směrem

vrstvení 0°. To dokazuje, že optimální parametry pro výrobu se liší v závislosti na zvoleném materiálu pro tisk. [30]

Vliv tloušťky nanášených vrstev

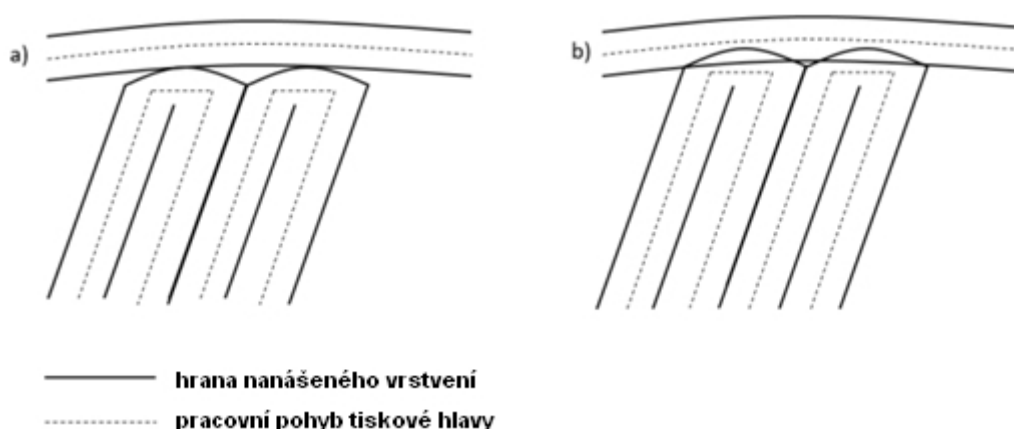
FDM tiskárny obvykle nanášejí vrstvy v tloušťkách od 0,076 mm – 0,330 mm. Tlustší vrstvy se používají spíše pro modely s požadavky na vyšší pevnost. Volba tenčí vrstvy znamená přesnější výrobu s hladším povrchem součástí, dosahované hodnoty pevnosti těchto modelů jsou však nižší. [28,31]

Od tloušťky nanášených vrstev se odvíjí mez pevnosti v tahu. Polymer PEEK vytisknutý v orientaci on flat dosahuje nejvyšší mez pevnosti v tahu při tloušťce 300 μm . S rostoucí tloušťkou, však jeho mez pevnosti v tahu klesá. [23] Opačným případem je polymer PP. Rozdíl hodnot materiálových charakteristik v tahu při změně tloušťky nanášených vrstev je u něj minimální. Výraznější rozdíl hodnot pevnostních charakteristik nastává až při použití větší tloušťky nanášených vrstev. [30]

Vliv velikosti vzduchových dutin mezi vrstvením

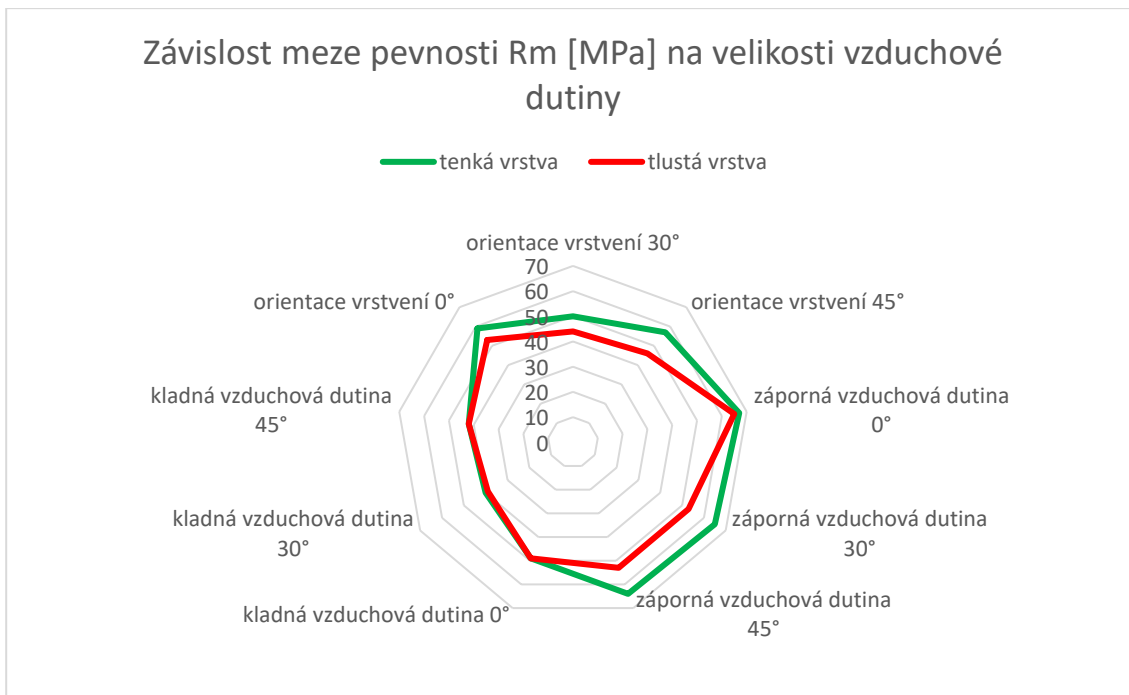
Výchozí hodnota vzduchové dutiny mezi vlákny tvořícími vrstvu je nulová. V praxi však může nabývat kladných či záporných hodnot. Kladná hodnota znamená, že mezi jednotlivými vlákny vrstev je nezaplňný prostor. V opačném případě může dojít ke kolizi nanášených vrstev. Přesah jedné vrstvy do sousední je mírou záporné hodnoty. Její hodnota může být kontrolována a optimalizována dle požadavků na výsledný produkt. [32]

U modelů s požadavkem na rozměrovou přesnost a vzhled jsou dutiny vyžadovány. Modely obsahující minimální množství dutin se vyznačují vyšší hustotou a používají se v případě požadavků na vyšší pevnost. [10]



Obr. 14 a) vzniklá dutina mezi vlákny a konturou materiálu b) materiál bez dutiny [10]

Volba hodnoty vzduchové dutiny je velmi důležitá a může výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti materiálu, viz obr. 15 (polymer Ultem 9085).



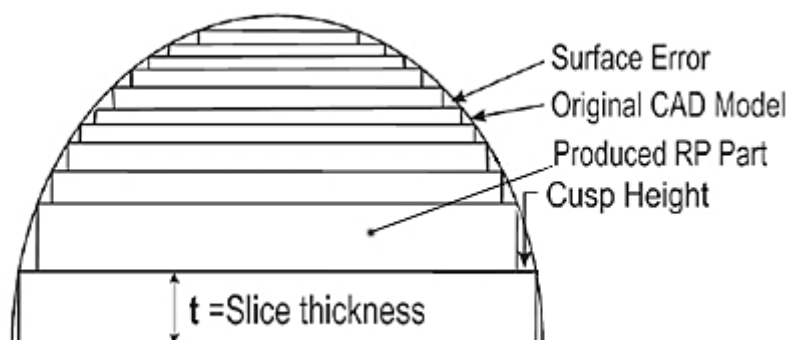
Obr. 15 Závislost meze pevnosti polymeru Ultem 9085 na parametrech výroby [33]

Z obrázku je patrné, že použitím tenké vrstvy se zápornou hodnotou vzduchové dutiny lze výrazně zvýšit mez pevnosti v tahu při všech uvedených úhlech vrstvení. [33]

Vliv defektů při nanášení vrstev

Stejně jako u všech procesů výroby může špatné nastavení 3D tiskárny a další podmínky vést k procesním vadám, které se projeví jako defekty v tisknutém materiálu. Existují i vady plynoucí z geometrických omezení procesu FDM, které mohou ovlivnit výsledné vlastnosti vytisknutých modelů, zejména z hlediska iniciace a šíření trhlin. Defekty tohoto typu lze rozdělit na povrchové a vnitřní. [34]

Povrchové defekty mohou vznikat jako důsledek chybné aproximace křivky tvořící obálku modelu v počítačovém softwaru. Důsledkem je nerovnoměrná výška a šířka vrstev. Tento defekt se nazývá schodový, viz obr. 16.



Obr. 16 Schodová chyba tisknutého materiálu [35]

Za *vnitřní defekty* jsou považovány dutiny mezi jednotlivými vlákny nebo mezi vlákny a obvodem kontury. Dutiny jsou současně považovány za jeden z parametrů výroby, viz výše. [35]

4 Experimentální část

Důležitým aspektem pro správnou volbu 3D tiskového polymerního materiálu pro konkrétní aplikaci je znalost jeho mechanických vlastností. V materiálových listech výrobců polymerních materiálů lze nejčastěji nalézt pouze základní mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, pružnost apod.) těchto materiálů v základním stavu, tj. po extruzi.

Diplomová práce se zabývá hodnocením vlastností polymerních materiálů Nylon 12 a Ultem 9085 získaných na základě výsledků zkoušek tahem a neinstrumentovaných rázových zkoušek Charpy po aplikaci několika variant 3D tisku technologií FDM, tj. v závislosti na velikosti a směru vrstvení.

4.1 Experimentální materiál

Zkušební tělesa pro experimentální část práce byla vyrobena několika variantami 3D tisku polymerů Nylon 12 a Ultem 9085, vzájemně se lišících se velikostí a směrem nanášení jednotlivých vrstev. Přehled jednotlivých variant použitého experimentálního materiálu je uveden v Tab. 4.

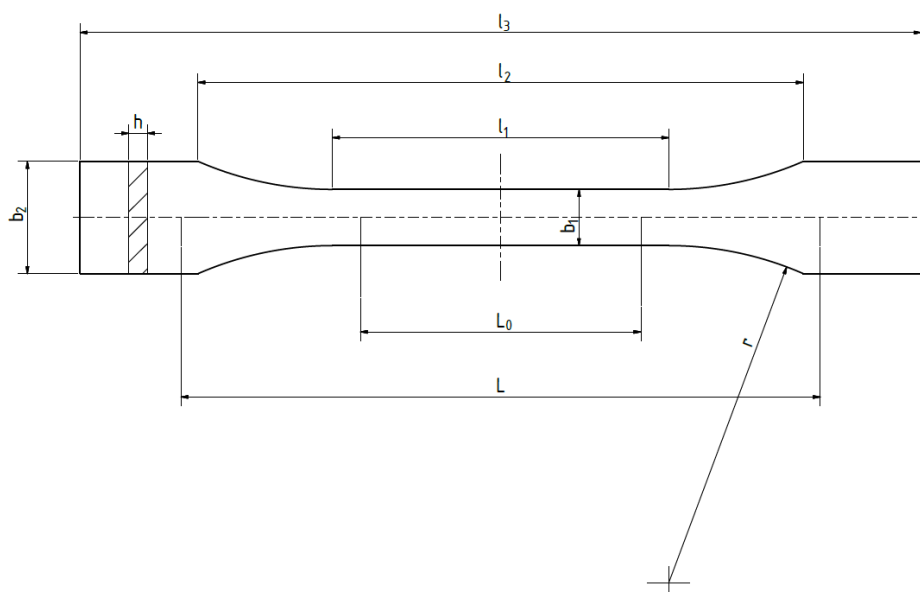
Tab. 4 Rozdělení experimentálního materiálu Nylon 12 a Ultem 9085 dle velikosti a směru vrstvení

Nylon12	
Velikost nanášeného vrstvení	178 μm
	254 μm
	330 μm
Směr vrstvení	330 μm 0°
	330 μm 0°/90°
	330 μm 0°/45°/90°
Ultem 9085	
Velikost nanášeného vrstvení	254 μm
	330 μm
Směr vrstvení	330 μm 0°
	330 μm 0°/90°
	330 μm 0°/45°/90°

Pro zkušební tělesa pouze s uvedenou velikostí vrstvení, není znám směr vrstvení.

Zkušební tělesa byla vyrobena technologií FDM na tiskárně Fortus 400mc (tisk ve směru osy Y, viz kapitola 3). Podpůrný materiál zkušebních těles Nylon 12 byl odstraněn jejich praním v alkalickém roztoku, podpůrný materiál zkušebních těles Ultem 9085 byl odstraněn mechanicky.

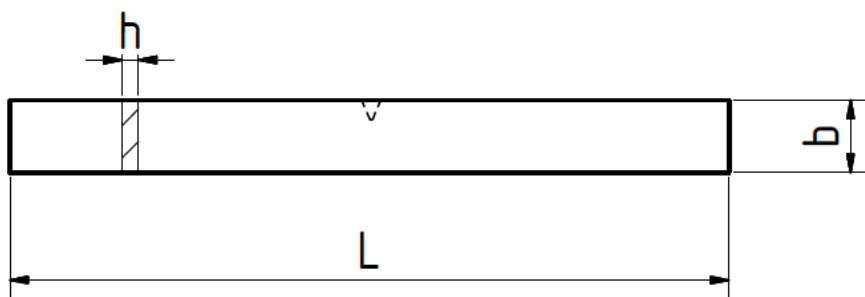
Pro zkoušku tahem byla použita zkušební tělesa typu 1B tvarem vyhovujícím dle ČSN EN ISO 527-1 (obr. 17). [37]



Obr. 17 Zkušební tělesa typu 1B [37]

Neinstrumentovaná rázová zkouška byla provedena na (i) zkušebních tělesech bez vrubu, (ii) s obrobeným vrubem dle ISO 2818 [38] a (iii) s vytisknutým vrubem splňujících podmínky standartu ČSN EN ISO 179-1 [38]. V případech (ii) a (iii) byla tělesa opatřena vrubem typu A, tj. V-vrubem s rozevřením vrubu $\alpha = 45^\circ \pm 1^\circ$ a s poloměrem kořene vrubu $r_N = 0,25 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

Nominální rozměry zkušebních těles pro zkoušku tahem a zkoušky rázové houževnatosti uvádí tab 5.

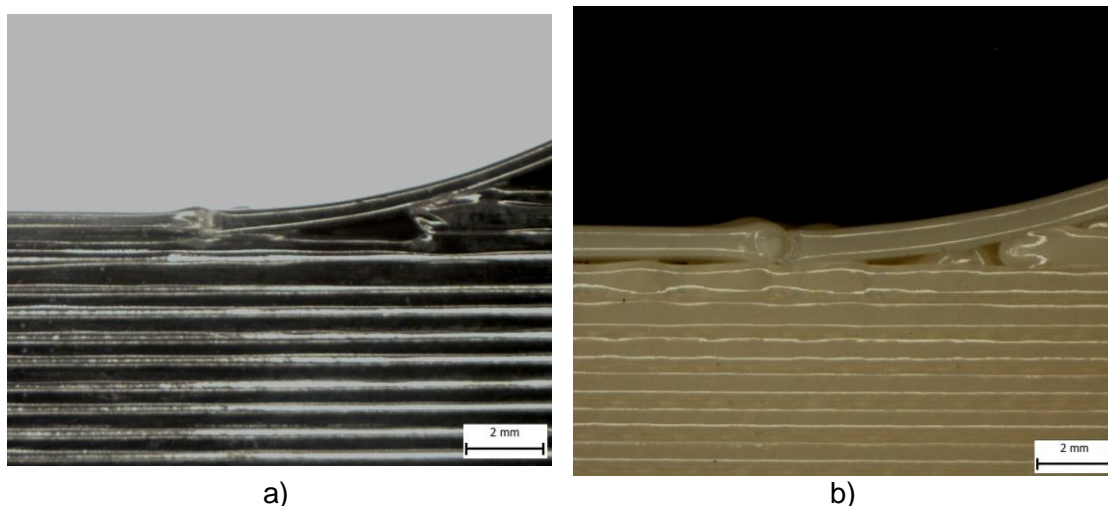


Obr. 18 Zkušební těleso pro stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy [38]

Tab. 5 Nominální rozměry zkušebních těles [37,38]

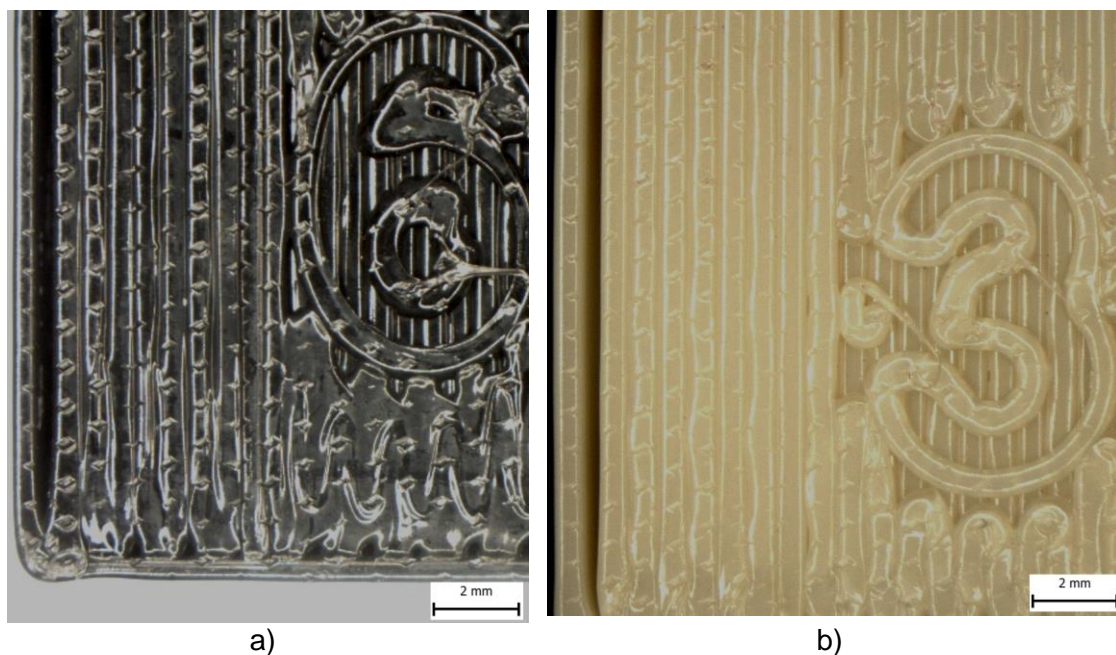
Typ tělesa	Šířka	Tloušťka	Celková délka	Počáteční měřená délka
	b (b ₂) [mm]	h [mm]	L [mm]	L ₀ [mm]
ISO 527-2/1B-5	10	4	150	50
ISO 179-1/ 1 n	10	4	100	-
ISO 179-1/ e A	10	4	100	-

Povrchové plochy dodaných zkušebních těles byly vyhodnoceny pomocí stereomikroskopu SZ61 – TR se softwarem Olympus QuickPHOTO Industrial 2.3. Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku u obou polymerů obsahovala nerovnost povrchu v místě rádiusu (na obr. 17 označen jako r), viz obr. 19a, b. Tato nerovnost pravděpodobně vznikla spečením konců obvodové kontury, tvořící obálku těles.



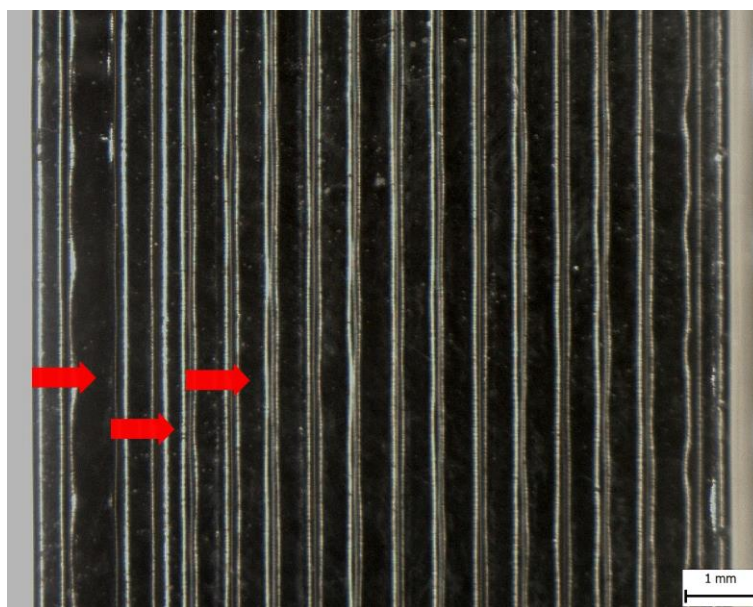
Obr. 19 Nerovnosti na povrchu zkušebních těles pro tahovou zkoušku a) Nylon 12
b) Ultem 9085

Zkušební tělesa vyrobená obou typů polymerů s velikostí vrstvení 330 μm orientací vrstvení 0° obsahovala na obou koncích těles dutiny mezi vrstvami a obvodovými konturami, viz obr. 20a, b. Protože je směr tahového zatížení shodný se směrem vrstvení zkušebních těles, lze předpokládat, že tyto necelistvosti neměly na chování zkušebních těles při zatěžování tahem výrazný vliv.



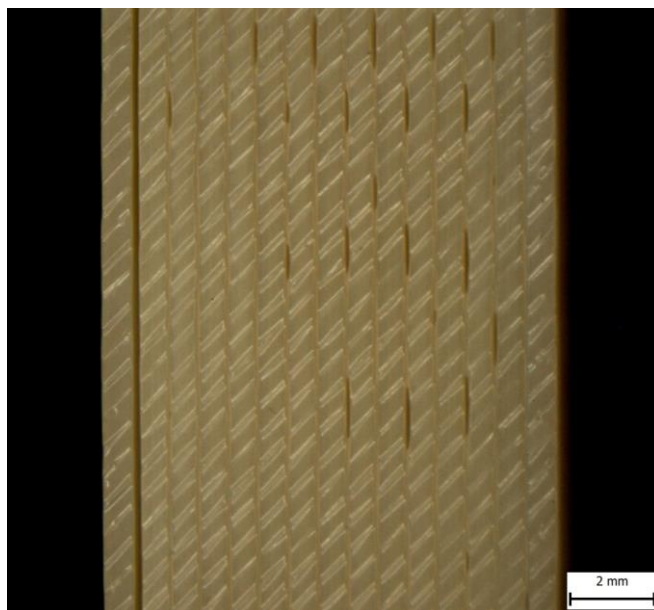
a) b)
 Obr. 20 Vzduchová dutina mezi vrstvami a konturou na konci zkušebního tělesa a) Nylon 12 b) Ultem 9085

Z povrchu některých zkušebních těles pro rázové zkoušky z polymeru Nylon 12 zřetelně vystupovala tenká vlákna, která nebyla odstraněna po jejich vytisknutí. Byly také zjištěny výrazné rozdíly tloušťek nanesených vrstev, viz obr. 21, ve kterém jsou červenými šipkami vyznačeny vrstvy s výrazně rozdílnou tloušťkou.



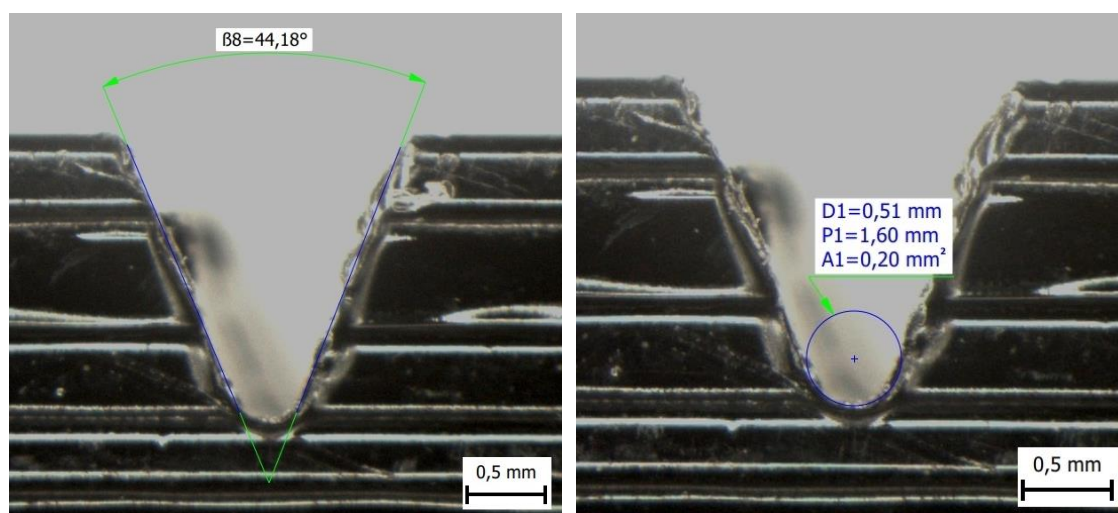
Obr. 21 Rozdílné tloušťky vrstvení ve zkušebním tělese polymeru Nylon 12 (směr vrstvení 0°)

Zkušební tělesa z Ultemu 9085, zejména tělesa s orientací vrstev 0° obsahovala mnoho vzduchových dutin mezi jednotlivými vrstvami, viz obr. 22. U některých těles byla patrná i delaminace kontury od zbytku vrstvení. Tato částečná delaminace mohla ovlivnit chování zkušebních těles při rázové zkoušce. Její vliv bude diskutován v kapitole 5.

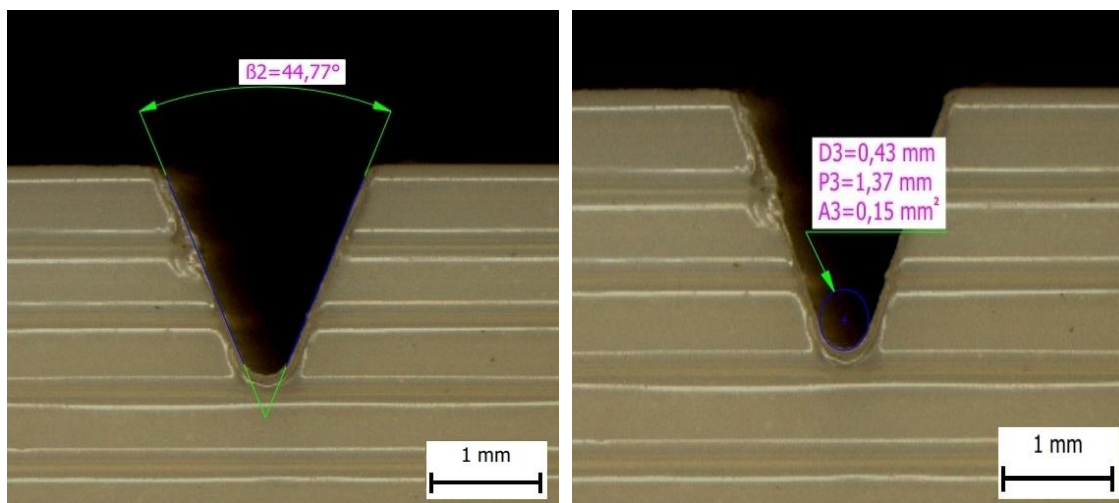


Obr. 22 Vzduchové dutiny mezi vrstvením zkušebního vzorku Ultem 9085 s orientací 0°

V případě vrubovaných zkušebních těles byly rozměry vrubů ověřeny pomocí softwaru Olympus QuickPHOTO Industrial 2.3. Obráběné vruby polymeru Nylon 12 i Ultem 9085 svým tvarem odpovídaly normě ČSN EN ISO 179-1, viz obr. 23 a obr 24.

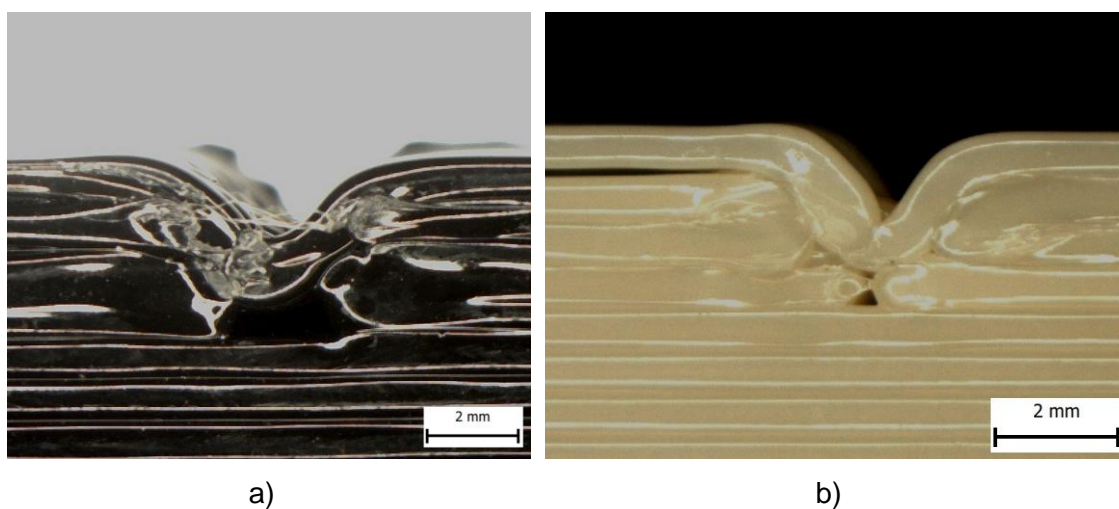


Obr. 23 Provedení vrubu na zkušebním tělese materiálu Nylon 12 obráběním



Obr. 24 Provedení vrubu na zkušebním tělese materiálu Nylon 12 obráběním

Vruby obou typů polymerů zhotovené 3D tiskem byly provedeny velmi nedokonale, viz obr. 25a, b. Tvar vrubů u obou materiálů neodpovídal normě ČSN EN ISO 179-1 díky deformacím v okolí vrubu. Deformace byla pravděpodobně způsobena teplotou nanášeného materiálu při tisku. V případě polymeru Ultem 9085 s orientací 0° byly na několika zkušebních tělesech nalezeny vzduchové dutiny v místě kořene vrubu a mezi vrstvením a obvodovou konturou, viz obr. 25b.



Obr. 25 Provedení vrubu 3D tiskem a) Nylon 12 b) Ultem 9085

4.2 Kondicionování

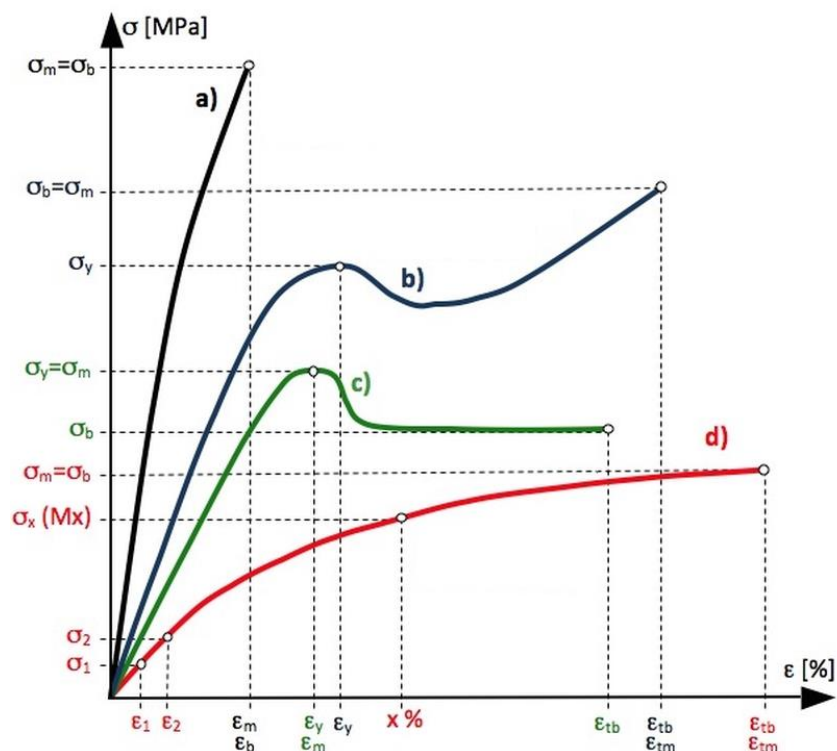
Některé vlastnosti polymerů závisí na obsahu vlhkosti ve struktuře. Zvýšením vlhkosti polymeru může docházet k degradaci vlastností, např. mechanických. Kondicionováním polymerů na definovanou úroveň obsahu vody ve struktuře lze získat reprodukovatelné hodnoty mechanických charakteristik (pevnostních i deformačních). Schopnost absorbovat vlhkost závisí na typu polymeru a na způsobu jeho výroby. Rychlost absorpce vlhkosti a tedy i rychlost kondicionování je funkcí teploty. Protože je tato rychlost při pokojové teplotě velmi nízká, mohou některé polymery, např. PA66 o tloušťce 4 mm dosáhnout rovnovážné vlhkosti ve standardní atmosféře (23°C/50%) za déle než jeden rok. Podle normy ČSN EN ISO 1110, zaměřené na tzv. zrychlené kondicionování, lze kondicionování výrazně urychlit a dosáhnout rovnovážného stavu shodného se stavem při kondicionování ve standardní atmosféře tehdy, je-li polymer umístěn do prostředí o teplotě 70 °C a relativní vlhkosti 63 %. [39] Pro kondicionaci byla použita klimatizační komora CTS 70/350. Doba kondicionování těles je závislá na schopnosti absorpce vlhkosti daným polymerem, přičemž zvýšení obsahu vlhkosti se projeví zvýšením hmotnosti polymeru. Změna hmotnosti zkušebních těles byla provedena pomocí analytických vah s přesností měření $1 \cdot 10^{-4}$ g. Kondicionace byla považována za ukončenou, pokud byl rozdíl hmotnosti ze tří po sobě následujících měření menší než 0,1 %. Průměrná doba kondicionování činila cca tři dny pro polymer Ultem 9085 a přibližně pět dní pro polymer Nylon 12, přičemž polymer Nylon 12 dosahoval vyššího rozdílu mezi počáteční a konečnou hmotností než polymer Ultem 9085. Nylon 12 tedy vykazuje vyšší schopnost nasákavosti než Ultem 9085. Pro tento typ polymeru (Nylon 12) je vysoká nasákavost charakteristická, neboť obsahuje velké množství atomů elektronegativních prvků (kyslík – O, dusík – N) v řetězci makromolekuly. Elektronegativita se projevuje schopností přitahovat vazebné elektrony, dokud polymer nedosáhne rovnovážného stavu. [20]

4.3 Výsledky experimentů

Stanovení tahových vlastností

Zkoušky tahem byly provedeny při pokojové teplotě na univerzálním zkušebním stroji Zwick Z250 Allround-Line, tCII. Pro každou variantu obou typů materiálů bylo testováno šest zkušebních těles dle ČSN EN ISO 527-2. [37] Zkoušky tahem byly provedeny dle normy ČSN EN ISO 527-1. [40] Rychlost zatěžování zkušebních těles byla v celém rozsahu deformací $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. [40]

Tahové křivky napětí - poměrná deformace zkušebních těles polymerů Nylon 12 i Ultem 9085 (viz Příloha A, B) odpovídaly typickým křivkám napětí - poměrná deformace pro polymerní materiály dle ČSN EN ISO 527-1, uvedeným na obr. 26. [40] V některých případech zkušební tělesa vykazovala minimální deformaci při vysokém napětí (křehké polymery), křivka a), v jiných případech vlastnosti odpovídaly vlastnostem termoplastů s dobrou možností orientace (křivka c), případně tělesa vykazovala vysokou schopnost deformace při nižším napětí (houževnaté polymery, křivka d). [20]



Obr. 26 Typické křivky napětí/poměrná deformace [20]

Z jednotlivých tahových křivek byly vyhodnoceny základní materiálové charakteristiky, tj. mez pevnosti v tahu σ_m [MPa], mez kluzu v tahu σ_y [MPa] a deformace při porušení ϵ_b [%]. Ve všech případech byl také vyhodnocován modul pružnosti v tahu E_t [MPa]. [40] Pro každou měřenou veličinu byla pro jednotlivé série vypočítána střední hodnota a směrodatná odchylka.

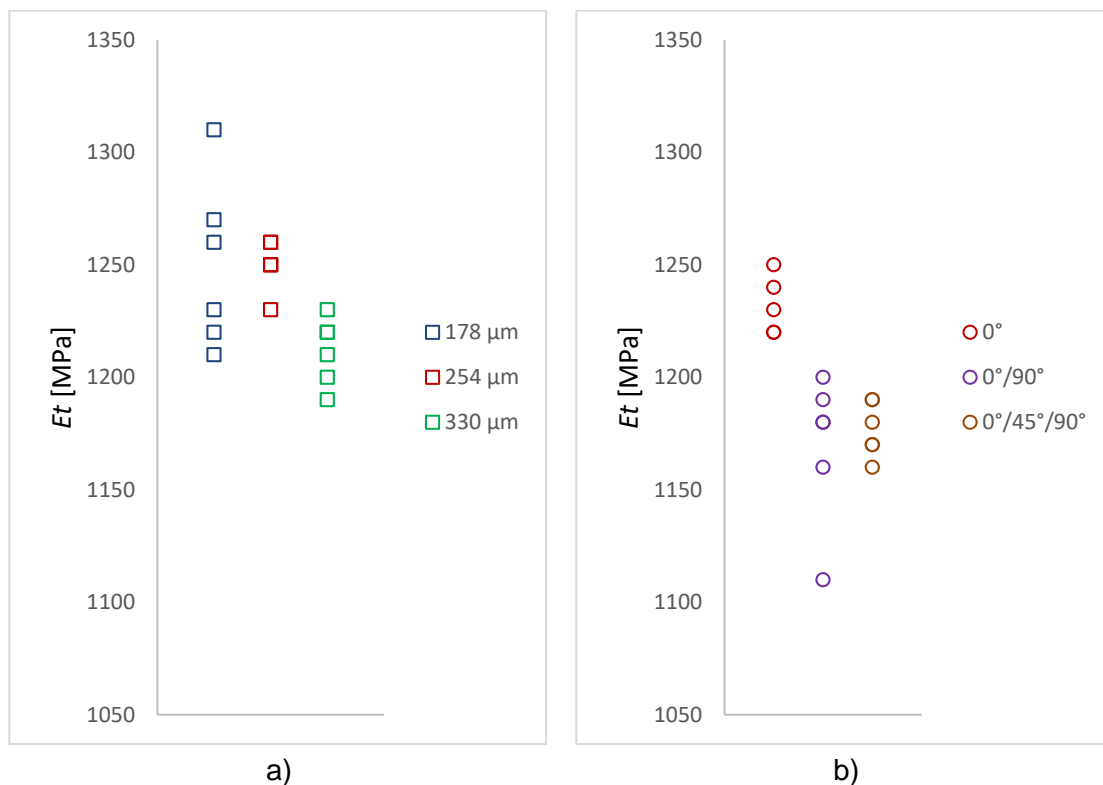
A) Nylon 12

Tabulka 6 obsahuje střední hodnoty a směrodatné odchylky modulu pružnosti v tahu E_t , meze pevnosti v tahu σ_m , meze kluzu v tahu σ_y a deformace při porušení ϵ_b . Kompletní výsledkové tabulky jsou uvedeny v příloze C.

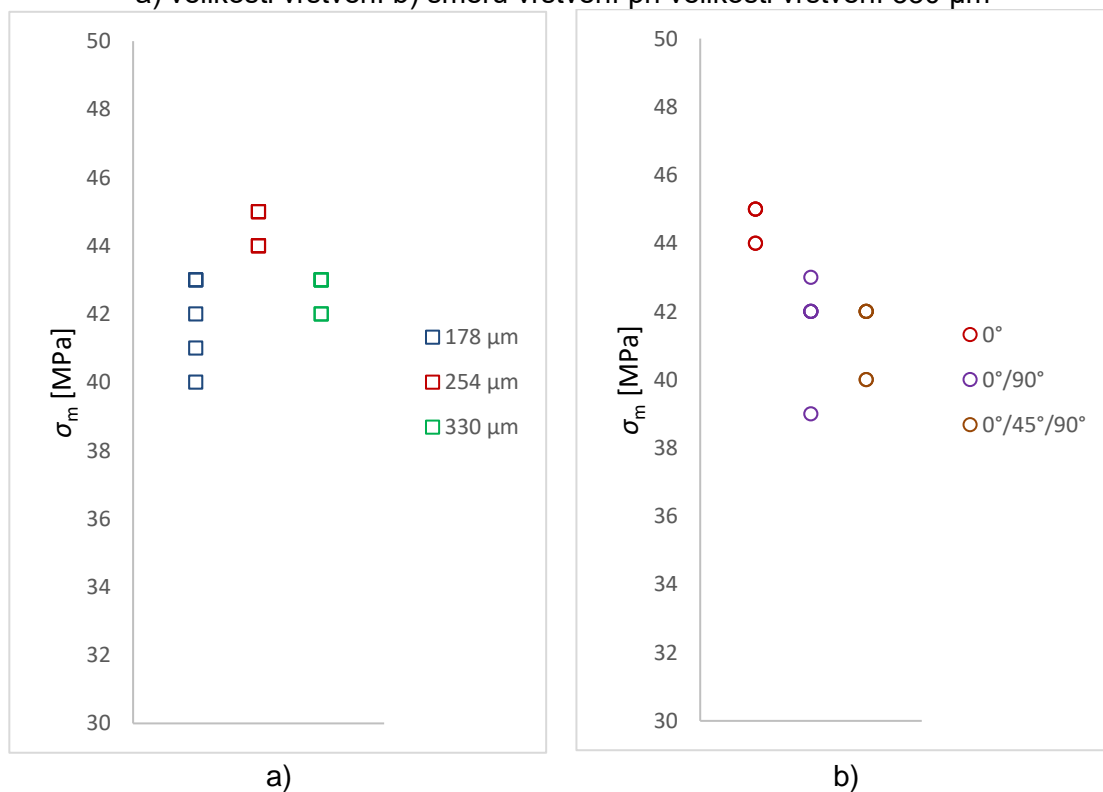
Tab. 6 Základní materiálové charakteristiky, Nylon 12

Velikost a směr vrstvení	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
178 μm	$1250 \pm 34,16$	$42,0 \pm 1,15$	$25,8 \pm 1,57$	$14,8 \pm 1,21$
254 μm	$1250 \pm 10,00$	$44,5 \pm 0,50$	$26,8 \pm 0,75$	$13,3 \pm 2,49$
330 μm	$1212 \pm 13,44$	$42,7 \pm 0,47$	$25,5 \pm 0,50$	$11,5 \pm 2,75$
330 μm 0°	$1232 \pm 10,65$	$44,6 \pm 0,49$	$25,8 \pm 0,75$	$53,2 \pm 53,73$
330 μm $0^\circ/90^\circ$	$1170 \pm 29,44$	$41,7 \pm 1,25$	$24,2 \pm 0,69$	$11,5 \pm 1,50$
330 μm $0^\circ/45^\circ/90^\circ$	$1177 \pm 11,06$	$41,3 \pm 0,94$	$24,3 \pm 0,75$	$9,5 \pm 1,38$

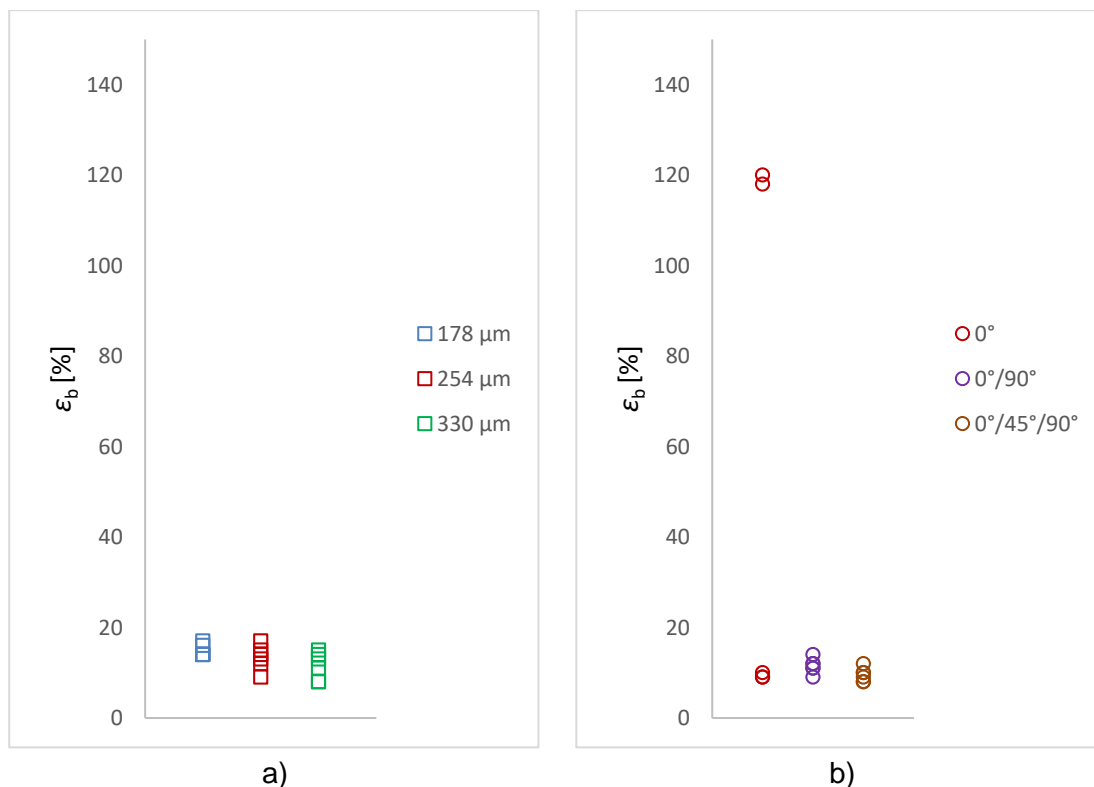
Porovnání hodnot modulu pružnosti v tahu E_t , meze pevnosti v tahu σ_m a deformace při přetržení ε_b polymeru Nylon 12 je uvedeno v grafech na obr. 27 - 29.



Obr. 27 Závislost modulu pružnosti v tahu E_t polymeru Nylon 12 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm



Obr. 28 Závislost meze pevnosti v tahu σ_m polymeru Nylon 12 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm

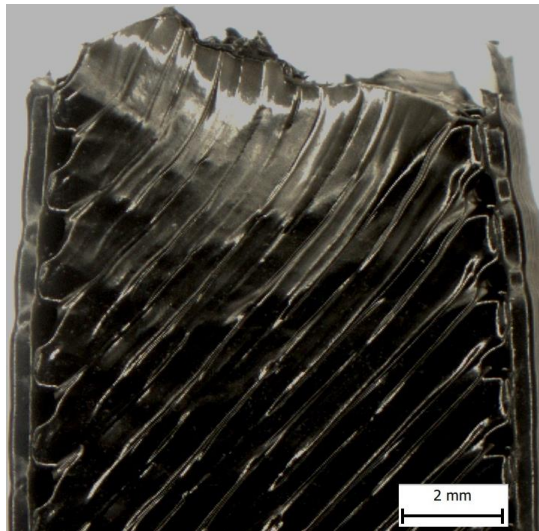


Obr. 29 Závislost deformace při přetržení ϵ_b polymeru Nylon 12 na
a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm

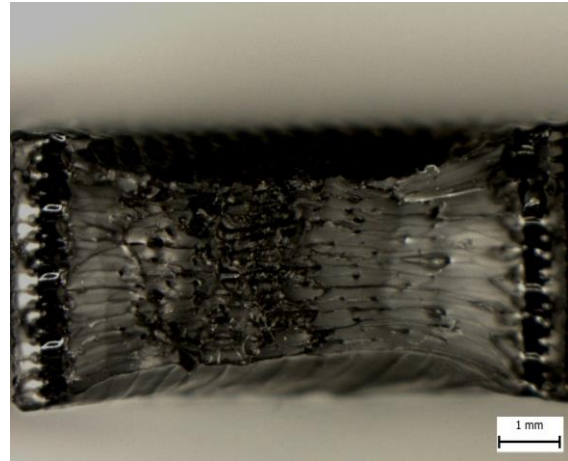
Tab. 7 Pozorované typy porušení zkušebních těles materiálu Nylon 12

Typ zkušebního tělesa	Počet zkušebních těles	Místo lomu	Charakter tahové křivky dle obr. 26
178 μm	6	V měřené délce u všech těles	c)
254 μm	6	V měřené délce u pěti těles	c)
330 μm	6	V měřené délce u tří těles	c)
330 μm 0°	6	Mimo měřenou délku u dvou těles	d)
330 μm 0°/90°	6	V měřené délce u všech těles	c)
330 μm 0°/45°/90°	6	V měřené délce u tří těles	c)

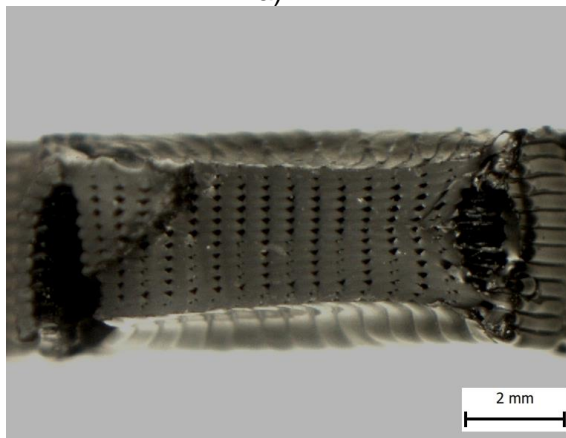
Místa lomu a charaktery tahových křivek pro jednotlivé varianty polymeru Nylon 12 jsou uvedeny v Tab. 7. Charakteru lomu odpovídala úroveň houževnatosti, tj. houževnatější zkušební tělesa vykazovala výraznější plastickou deformací, která se projevovala zejména patrnějším zúžením průřezu samotného tělesa a změnou barvy v místě lomu, viz obr. 30a, b. U zkušebních těles závislých na velikosti vrstvení lze pozorovat výraznější deformaci vrstvení, než v případě zkušebních těles závislých na směru vrstvení. Typickým příkladem jsou zkušební tělesa s velikostí vrstvení 254 μm a s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°, viz obr. 30b, c. Příklady porušených zkušebních těles všech variant uvádí obr. 31.



a)



b)



c)

Obr. 30 Plastická deformace v oblasti lomu a lomová plocha zkušebního tělesa a), b) s velikostí vrstvení 254 μm c) s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°

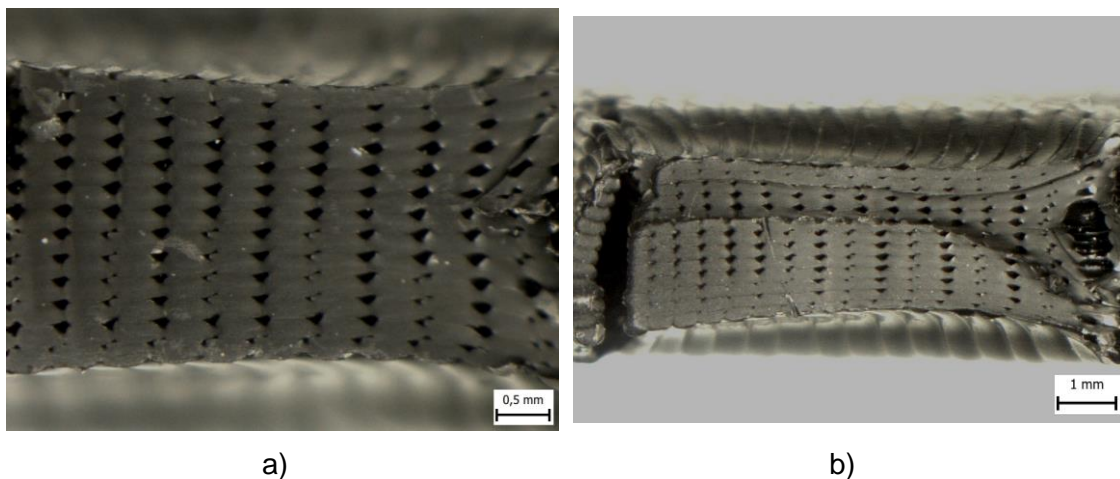


Obr. 31 Příklady porušených zkušební těles pro zkoušku tahem, Nylon 12

Výrazný rozdíl hodnot deformace při porušení byl zjištěn u dvou zkušebních těles s velikostí a směrem vrstvení $330 \mu\text{m } 0^\circ$. Tato tělesa vykazovala až 120 % deformace při přetržení, což se projevilo výrazným zúžením průřezu těles, viz obr. 32. Po dosažení meze pevnosti σ_m došlo k výraznému poklesu napětí, po kterém následoval vysoký nárůst deformace při nepatrném zvýšení napětí. Pro toto chování nebyly na tělesech nalezeny zjevné důvody. Dle dostupných literárních pramenů může tento polymer vykazovat deformaci při porušení (2 – 225) % [36,41], a proto byla tato skutečnost považována za přirozené chování polymeru Nylon 12 při zkoušce tahem.



Obr. 32 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení $330 \mu\text{m } 0^\circ$ po zkoušce tahem



Obr. 33 Srovnání lomových ploch těles s velikostí a směrem vrstvení $330 \mu\text{m } 0^\circ$ s deformací při přetržení a) 10 % b) 118 %

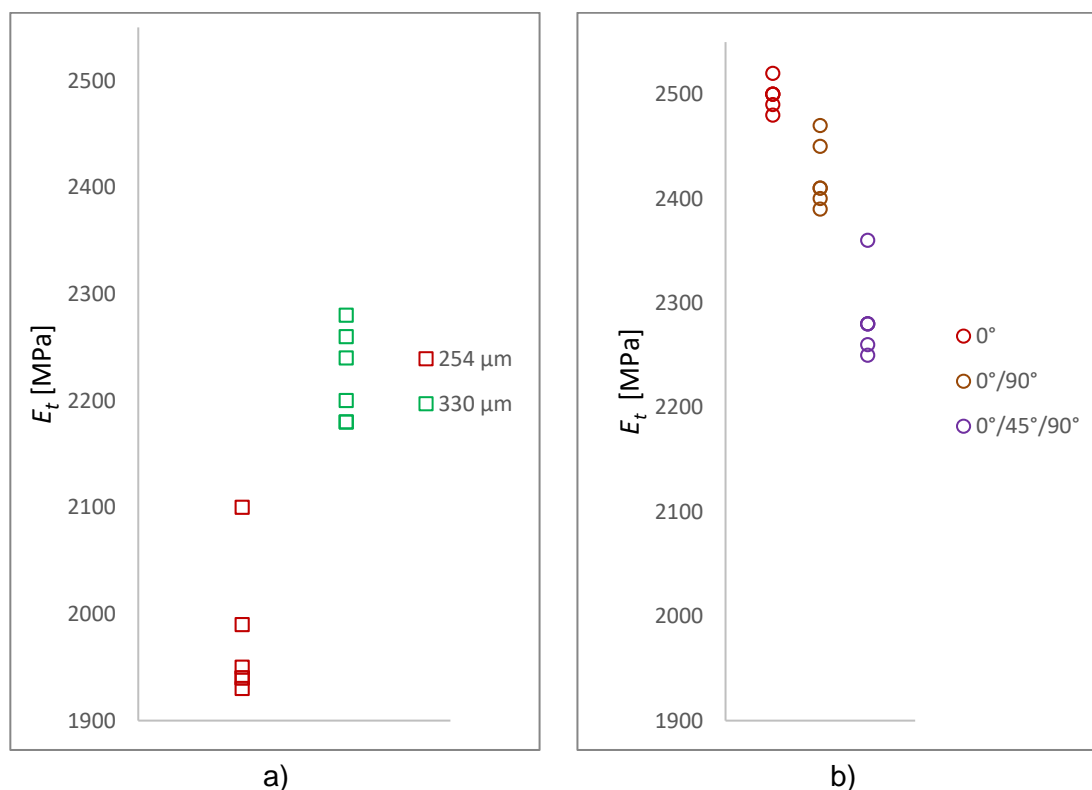
A) Ultem 9085

Také v případě polymeru Ultem 9085 jsou střední hodnoty a směrodatné odchylky modulu pružnosti v tahu E_t , meze pevnosti v tahu σ_m , meze kluzu v tahu σ_y a deformace při porušení ϵ_b uvedeny v příslušné tabulce (Tab. 8). Kompletní výsledkové tabulky jsou uvedeny v příloze D.

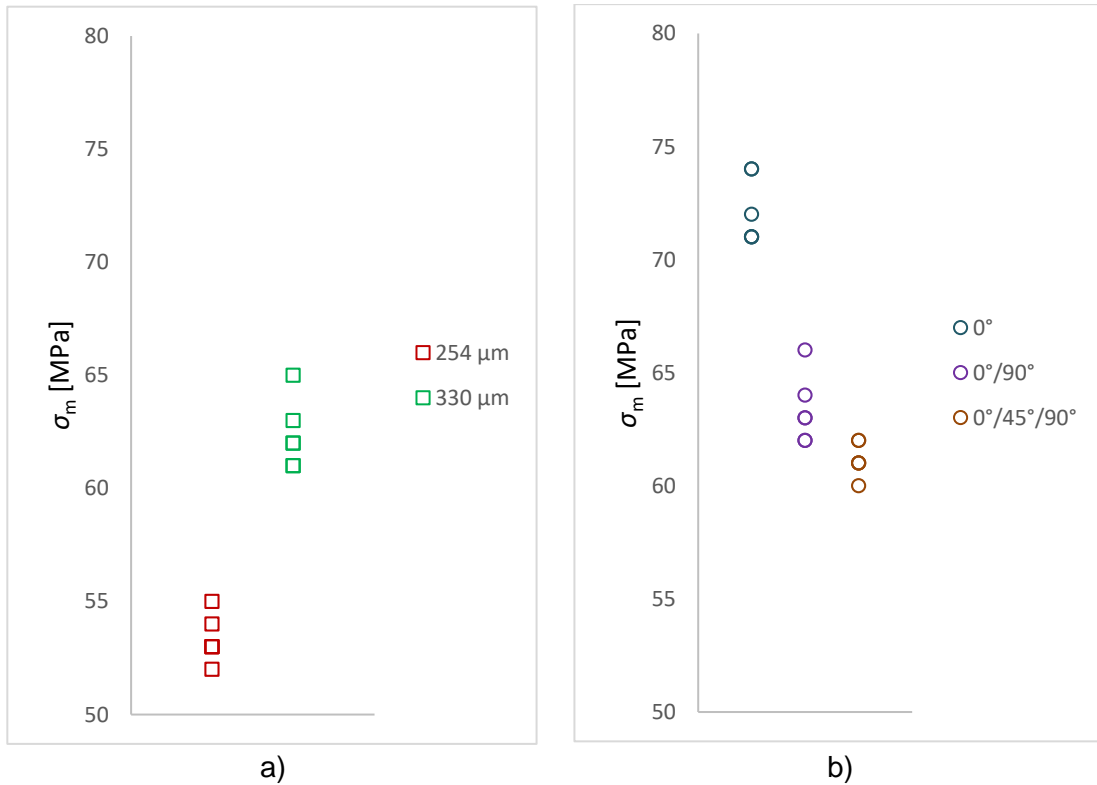
Tab. 8 Základní materiálové charakteristiky, Ultem 9085

	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
254 μm	$1975 \pm 59,09$	$53,3 \pm 0,94$	$30,7 \pm 2,43$	$6,7 \pm 0,47$
330 μm	$2223 \pm 39,02$	$62,3 \pm 1,37$	$38,8 \pm 1,67$	$6,0 \pm 0,00$
330 μm 0°	$2498 \pm 12,13$	$72,2 \pm 1,34$	$41,7 \pm 0,47$	$4,3 \pm 0,47$
330 μm 0°/90°	$2422 \pm 28,53$	$63,3 \pm 1,37$	$37,6 \pm 0,75$	$4,2 \pm 0,37$
330 μm 0°/45°/90°	$2285 \pm 35,47$	$61,2 \pm 0,69$	$37,4 \pm 1,21$	$5,3 \pm 0,47$

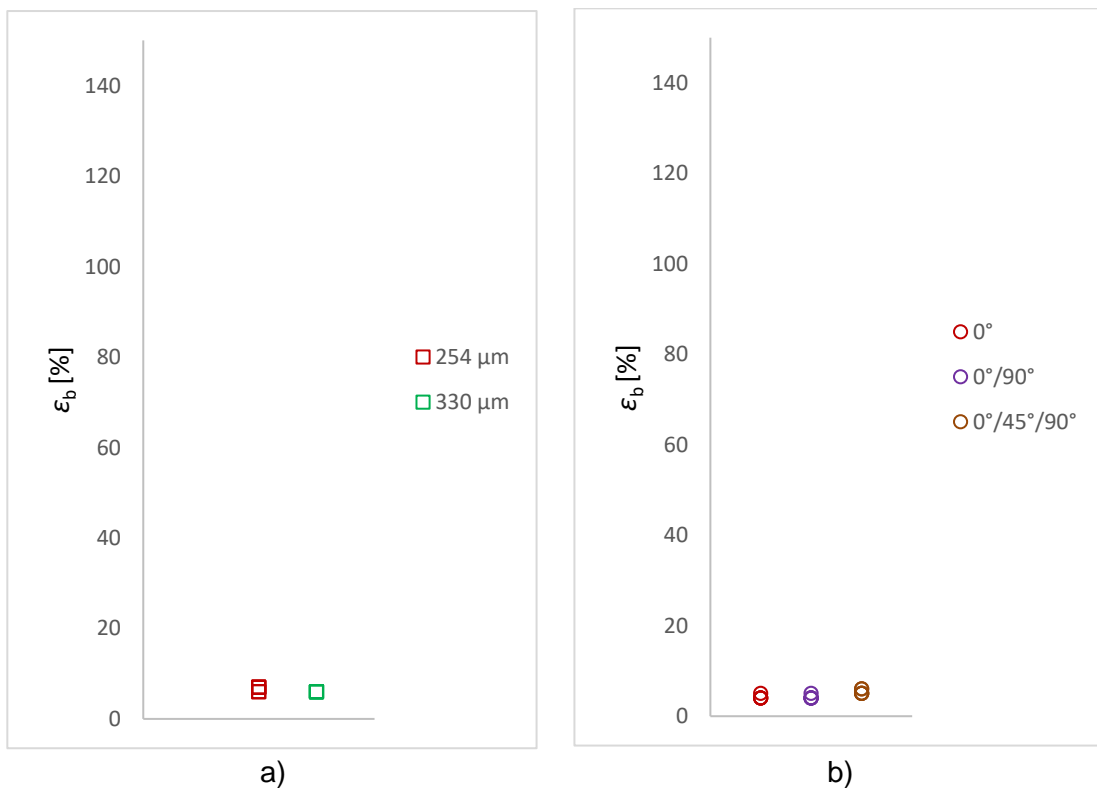
Porovnání hodnot modulu pružnosti v tahu E_t , meze pevnosti v tahu σ_m a deformace při přetržení ϵ_b polymeru Ultem 9085 je uvedeno v grafech na obr. 34 - 36.



Obr. 34 Závislost modulu pružnosti v tahu E_t polymeru Ultem 9085 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm

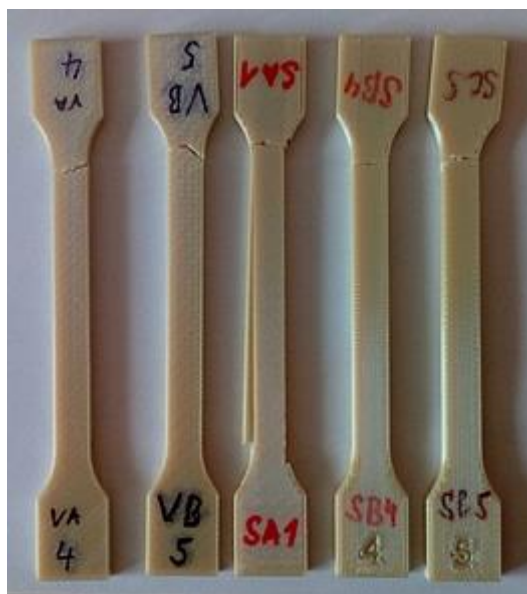


Obr. 35 Závislost meze pevnosti v tahu σ_m polymeru Ultem 9085 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm



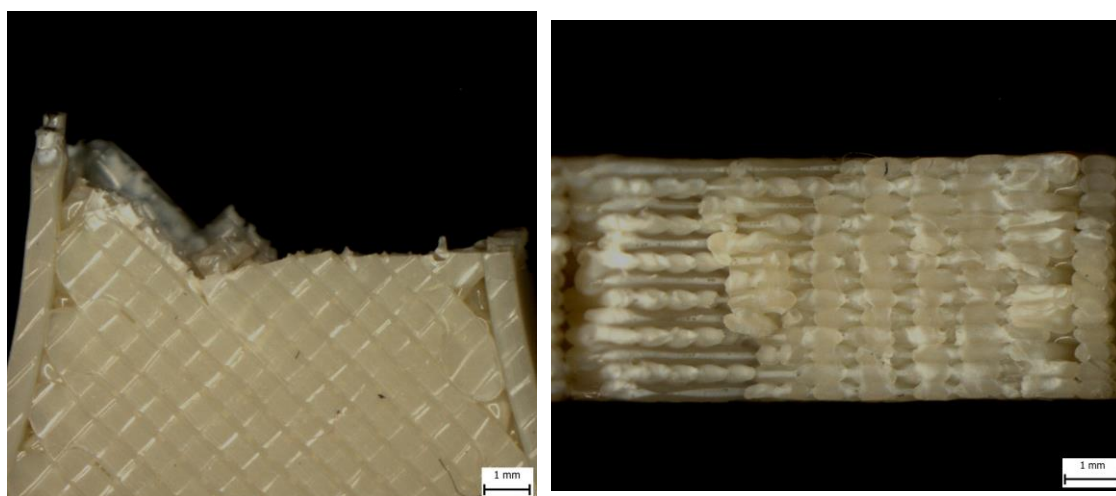
Obr. 36 Závislost deformace při přetržení ϵ_b polymeru Ultem 9085 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm

Průběhu tahových křivek napětí – poměrná deformace zkušebních těles z polymeru Ultem 9085 nejlépe odpovídá tahová křivka a) křehké polymery dle normy ČSN EN ISO 527-1, viz obr. 26. [20, 40] Po nepatrné plastické deformaci zkušebních těles následovalo porušení v místě mimo měřenou délku (obr. 35). K porušení v místě měřené délky L_0 došlo pouze u jednoho zkušebního tělesa. Nerovnost na obvodové kontuře zkušebních těles se ukázala jako bezvýznamná pro lomové chování polymer při zatěžování jednoosým tahem, nicméně soudržnost samotné obvodové kontury s vrstvením byla v případě zkušebních těles se směrem vrstvení 0° nedostatečná, viz obr. 37. Tato nerovnost mohla být po vytištění zkušebních těles odstraněna mechanicky (např. jemným smirkovým papírem).



Obr. 37 Příklady porušených zkušebních těles pro zkoušku tahem polymeru Ultem 9085

Na obr. 38a, b je uveden příklad vzhledu lomové plochy zkušebního tělesa materiálu Ultem 9085 s velikostí vrstvení 330 μm . Z obr. 38b je patrné, že se pravděpodobně jedná o směr vrstvení $-45^\circ/+45^\circ$.



a) b)
Obr. 38 Oblast lomové plochy s min. plastickou deformací tělesa s velikostí vrstvení 330 μm

4.4 Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy

Neinstrumentované rázové zkoušky byly provedeny dle normy ČSN EN ISO 179-1 [38] na rázovém kladivu Heckert PSD 50/15 při pokojové teplotě a nominální energii kyvadla 15 J. Pro každou variantu obou typů materiálů bylo testováno deset zkušebních těles. [38] Pro hodnocení rázové houževnatosti byla použita zkušební tělesa bez vrubu (ČSN EN ISO 179-1/1eA) a tělesa s vrubem (ČSN EN ISO 179-1/1n). Směr rázu při vlastní zkoušce byl ve všech případech veden na užší podélnou plochu zkušebního tělesa (směr rázu označován jako „edgewise“). [38].

Měřenou veličinou neinstrumentovaných rázových zkoušek byla energie E_M [J], resp. její korigovaná varianta E_c [J] s odečtenou ztrátovou energií zkušebního zařízení. U obou typů polymerů bylo možné pozorovat tři typy porušení (přeražení) zkušebních těles, v tab. 9 a následujících označených následovně: C (úplné přeražení), P (částečné přeražení) a N (nepřeraženo).

Na základě hodnot korigované energie E_c byla vypočtena rázová houževnatost Charpy zkušebních těles bez vrubu a_{CU} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] a rázová houževnatost Charpy zkušebních těles s vrubem a_{CN} podle rovnic

$$a_{CU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \text{ [kJ}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (1)$$

$$a_{CN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \cdot 10^3 \text{ [kJ}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (2)$$

kde h je tloušťka zkušebního tělesa, b (b_N) je šířka zkušebního tělesa. [38]

A) Nylon 12

Tabulka 9 obsahuje střední hodnoty a směrodatné odchytky rázové houževnatosti a_{CU} souborů zkušebních těles bez vrubu, lišících se velikostí a směrem vrstvení. Střední hodnoty vč. směrodatných odchytek rázové houževnatosti a a_{CN} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] pro tělesa s vrubem jsou uvedeny v tab. 10 (tištěné vruby) a tab. 11 (obráběné vruby). Kompletní výsledkové tabulky jsou uvedeny v příloze E.

Tab. 9 Rázová houževnatost a_{CU} zkušebních těles bez vrubu, Nylon 12

Velikost a směr vrstvení	a_{CU} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	Typ porušení
178 μm	$36,46 \pm 5,44$	C
254 μm	$85,56 \pm 3,06$	P
330 μm	$52,15 \pm 5,66$	C
330 μm 0°	$119,43 \pm 6,33$	N
330 μm $0^\circ/90^\circ$	$55,80 \pm 4,69$	C
330 μm $0^\circ/45^\circ/90^\circ$	$41,42 \pm 4,54$	C

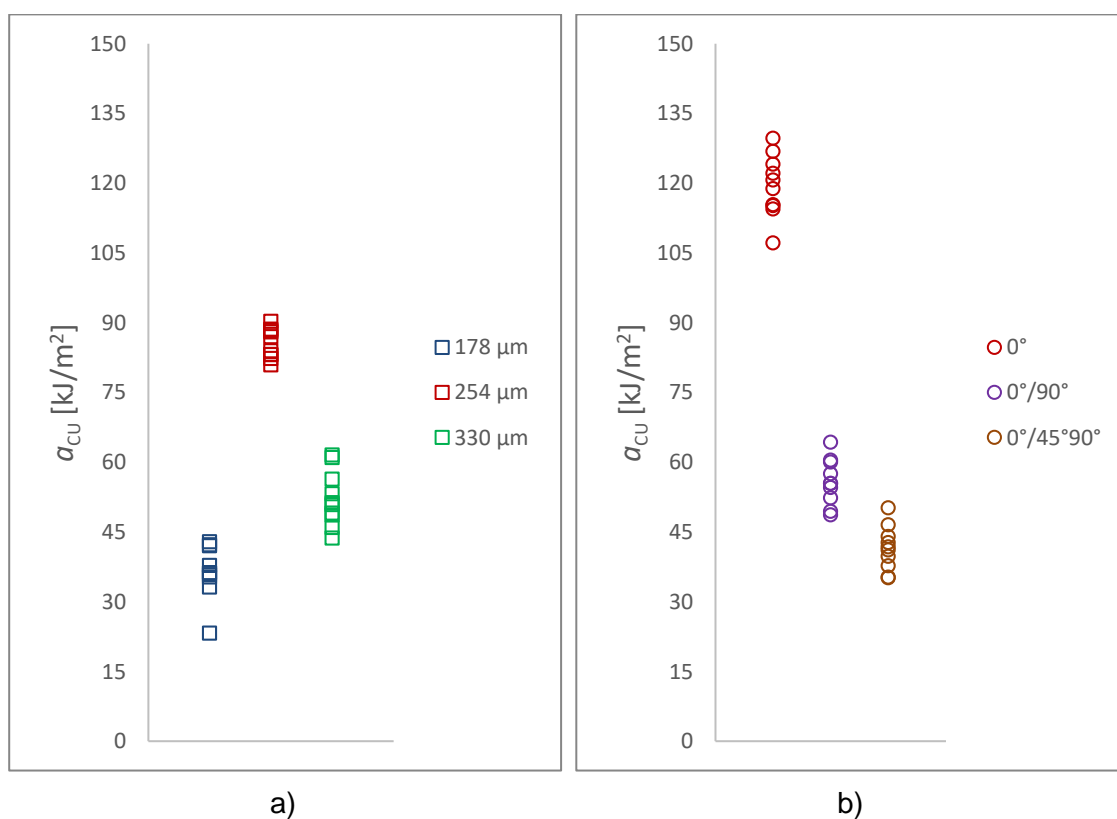
Tab. 10 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles s vytisknutým vrubem, Nylon 12

Velikost a směr vrstvení	a_{CN} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	Typ přeražení
178 μm 0°	$1,36 \pm 0,41$	C
254 μm 0°	$25,75 \pm 18,68$	C
330 μm 0°	$20,76 \pm 10,05$	C

Tab. 11 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles s obrobeným vrubem, Nylon 12

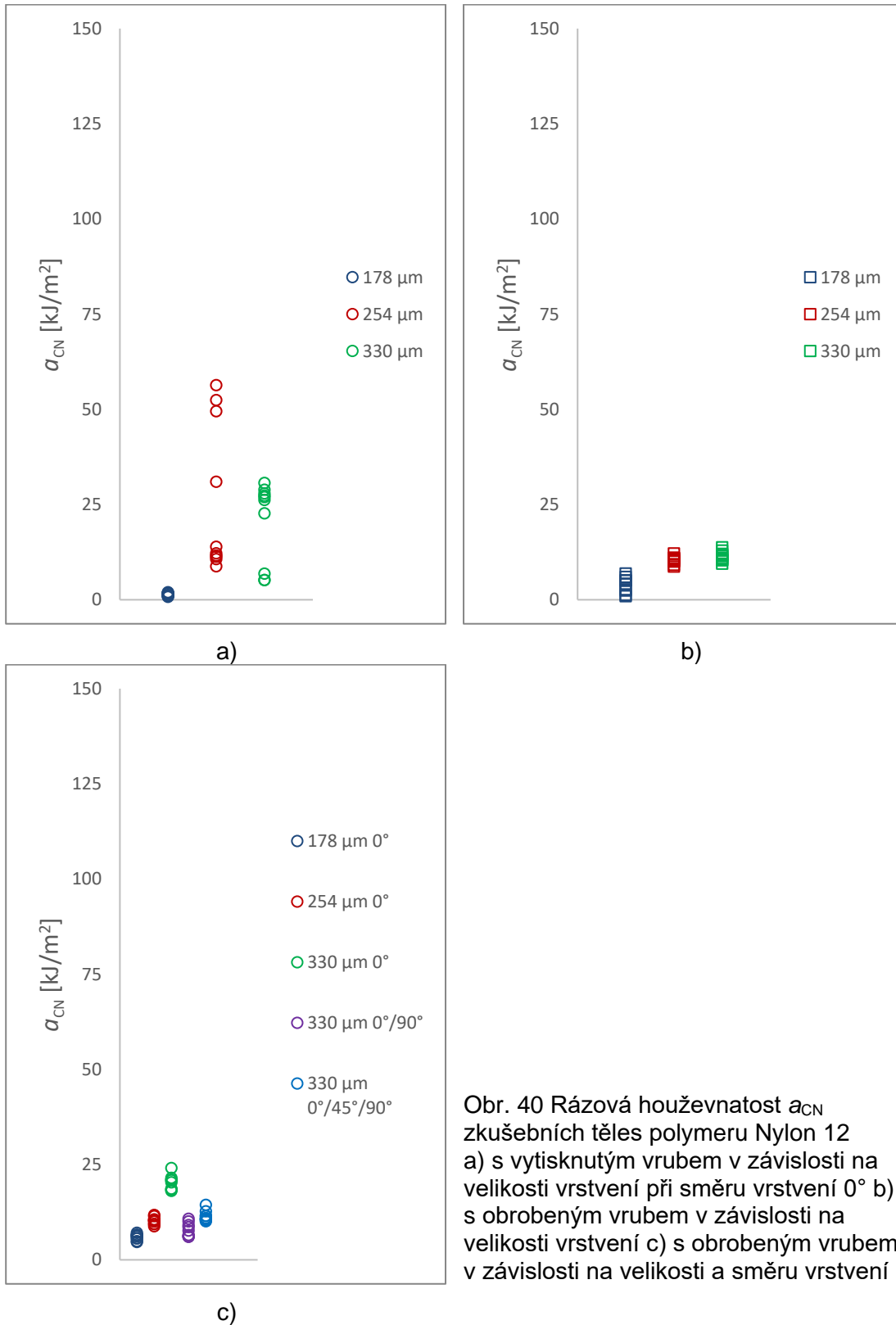
Velikost a směr vrstvení	a_{CN} [kJ·m ⁻²]	Typ porušení
178 μm	3,93 ± 1,93	C
254 μm	10,37 ± 0,93	C
330 μm	11,34 ± 1,22	C
178 μm 0°	5,95 ± 0,72	C
254 μm 0°	10,24 ± 0,88	C
330 μm 0°	20,21 ± 1,78	C
330 μm 0°/90°	7,71 ± 1,70	C
330 μm 0°/45°/90°	11,35 ± 1,24	C

Porovnání hodnot rázové houževnatosti a_{CU} zkušebních těles bez vrubu polymeru Nylon 12 je uvedeno v grafech na obr. 39a, b.



Obr. 39 Rázová houževnatost a_{CU} zkušebních těles bez vrubu (Nylon 12) v závislosti na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm

Porovnání hodnot rázové houževnatosti a_{CN} zkušebních těles s vytisknutým a s obrobeným vrubem polymeru Nylon 12 je uvedeno v grafech na obr. 40.



Obr. 40 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles polymeru Nylon 12 a) s vytisknutým vrubem v závislosti na velikosti vrstvení při směru vrstvení 0° b) s obrobeným vrubem v závislosti na velikosti vrstvení c) s obrobeným vrubem v závislosti na velikosti a směru vrstvení

B) Ultem 9085

V tabulce 12 jsou uvedeny střední hodnoty a směrodatné odchytky rázové houževnatosti a_{CU} souborů zkušebních těles bez vrubu, lišících se velikostí a směrem vrstvení pro polymer Ultem 9085. Střední hodnoty vč. směrodatných odchylek rázové houževnatosti a a_{CN} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] pro tělesa s vrubem jsou uvedeny v tab. 13 (tištěné vruby) a tab. 14 (obráběné vruby). Kompletní výsledkové tabulky jsou uvedeny v příloze F.

Tab. 12 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles bez vrubu, Ultem 9085

Velikost a směr vrstvení	a_{CN} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	Typ přeražení
254 μm	$50,12 \pm 3,49$	C
330 μm	$24,90 \pm 1,78$	C
330 μm 0°	$215,41 \pm 15,33$	N
30 μm 0°/90°	$39,72 \pm 23$	C
330 μm 0°/45°/90°	$29,23 \pm 2,26$	C

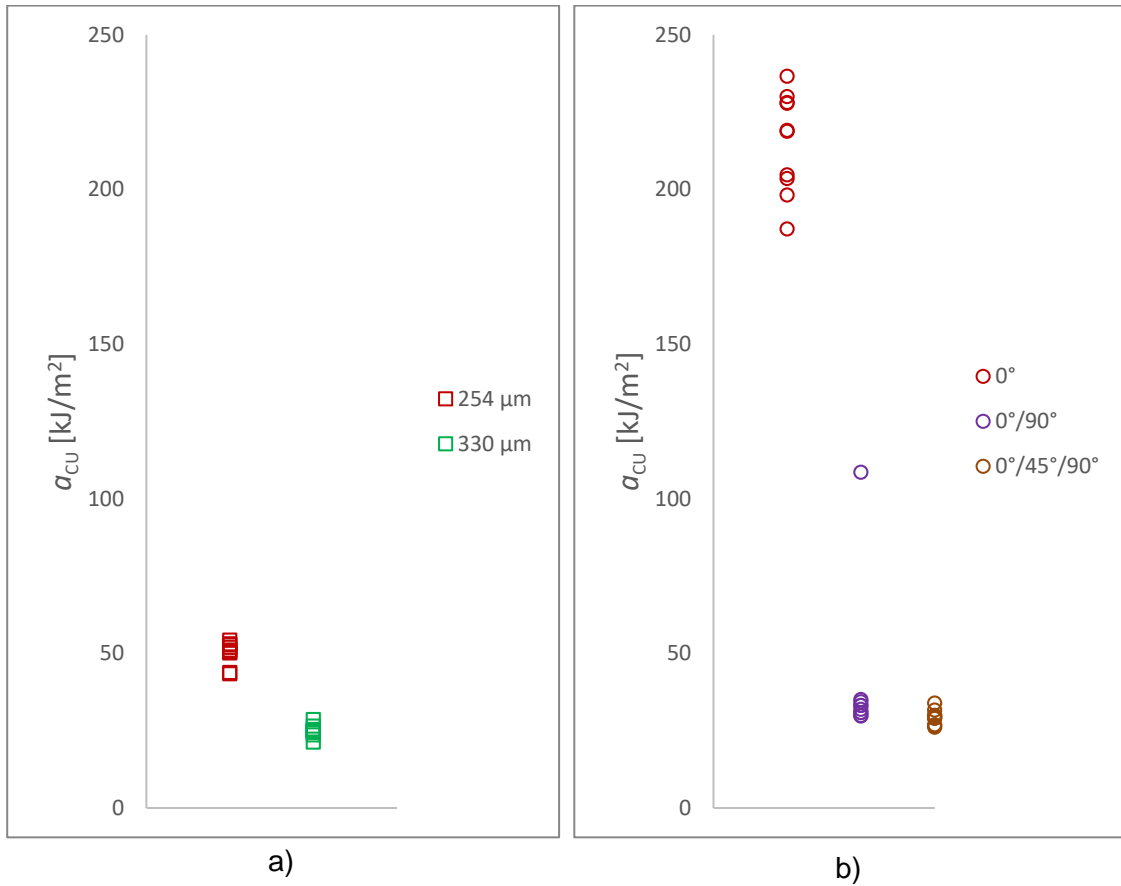
Tab. 13 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles s vytisknutým vrubem, Ultem 9085

Velikost a směr vrstvení	a_{CN} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	Typ přeražení
254 μm 0°	$3,03 \pm 0,59$	P
330 μm 0°	$47,05 \pm 7,59$	C

Tab. 14 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles s obrobeným vrubem, Ultem 9085

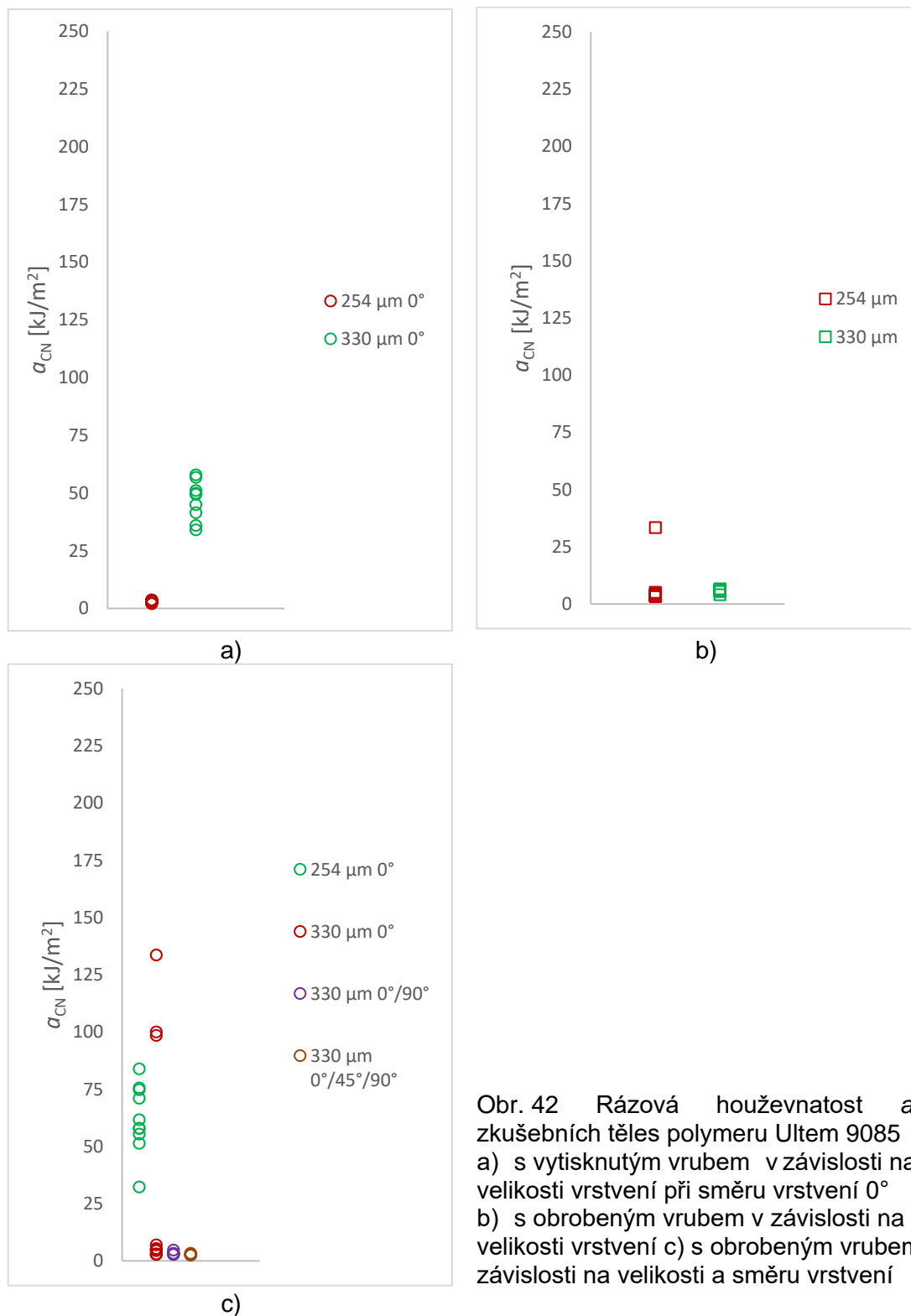
Velikost a směr vrstvení	a_{CN} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	Typ přeražení
254 μm	$6,77 \pm 8,88$	C
330 μm	$5,84 \pm 0,69$	C
254 μm 0°	$62,14 \pm 14,08$	P
330 μm 0°	$36,24 \pm 49,55$	C
330 μm 0°/90°	$3,18 \pm 0,52$	C
330 μm 0°/45°/90°	$2,83 \pm 0,22$	C

Porovnání hodnot rázové houževnatosti a_{Cu} zkušebních těles bez vrubu polymeru Ultem 9085 je uvedeno v grafech na obr. 41a, b.



Obr. 41 Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu polymeru Ultem 9085 v závislosti na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm

Porovnání hodnot rázové houževnatosti a_{CN} zkušebních těles s vytisknutým vrubem polymeru Ultem 9085 je uvedeno v grafech na obr. 42.



Obr. 42 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles polymeru Ultem 9085 a) s vytisknutým vrubem v závislosti na velikosti vrstvení při směru vrstvení 0° b) s obrobeným vrubem v závislosti na velikosti vrstvení c) s obrobeným vrubem v závislosti na velikosti a směru vrstvení

Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení $254\ \mu\text{m}\ 0^\circ$ opatřených vytisknutým vrubem vykazovala po zkoušce viditelnou delaminaci vrstvení po celé délce, zejména v místě poblíž obvodové kontury, viz obr. 43a. Stejná varianta zkušebních těles (s velikostí a směrem vrstvení $254\ \mu\text{m}\ 0^\circ$), opatřená obrobeným vrubem vykazovala podstatně výraznější delaminaci vrstvení, viz obr. 43b. Vliv vrubu a delaminace na rázovou houževnatost těles s vrubem bude diskutován v kapitole 5.

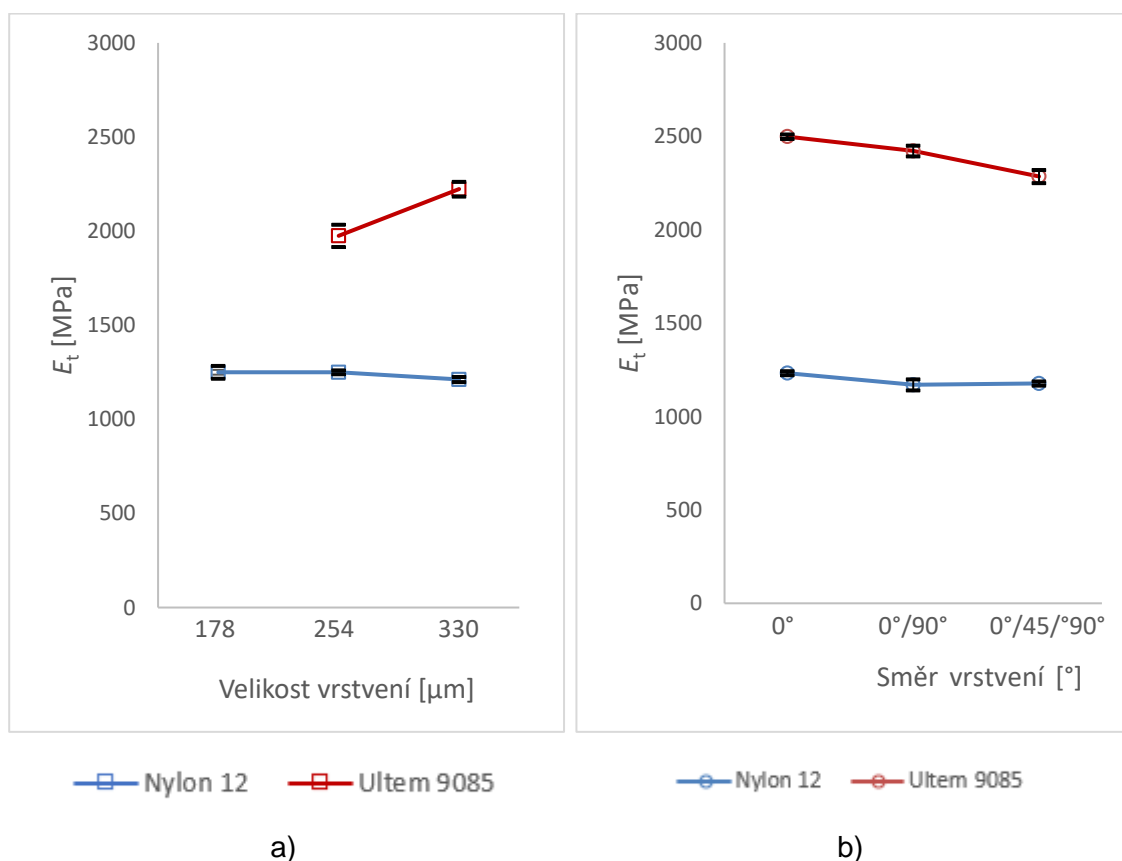


Obr. 43 Delaminace zkušebních těles a) s velikostí a směrem vrstvení $254\ \mu\text{m}\ 0^\circ$, opatřených tištěným vrubem, b) s velikostí a směrem vrstvení $254\ \mu\text{m}\ 0^\circ$ opatřená obrobeným vrubem

5 Diskuze

Vliv anizotropie, tj. vliv velikosti a směru vrstvení na mechanické vlastnosti obou typů polymerů byl posuzován na základě materiálových charakteristik modulu pružnosti v tahu E_t , meze pevnosti v tahu σ_m , deformace při porušení ϵ_b , rázové houževnatosti nevrubovaných, resp. vrubovaných zkušebních těles a_{CU} , resp. a_{CN} . Uvedené materiálové charakteristiky byly získány z výsledků zkoušek tahem a neinstrumentovaných rázových zkoušek.

Tuhost polymeru, charakterizovaná veličinou modulu pružnosti v tahu E_t je v případě materiálu Nylon 12 prakticky nezávislá na směru a velikosti vrstvení, viz obr. 44a, b. Z grafů na uvedeném obrázku je patrné, že stejná charakteristika nabývá v případě materiálu Ultem 9085 přibližně dvojnásobných hodnot ve srovnání s Nylon 12 a je také mnohem více závislá jak na velikosti, tak směru vrstvení. Hodnota modulu pružnosti vzrůstá s velikostí vrstvení, v závislosti na směru vrstvení je nejvyšších hodnot E_t dosaženo ve směru 0° při velikosti vrstvení $330 \mu\text{m}$.

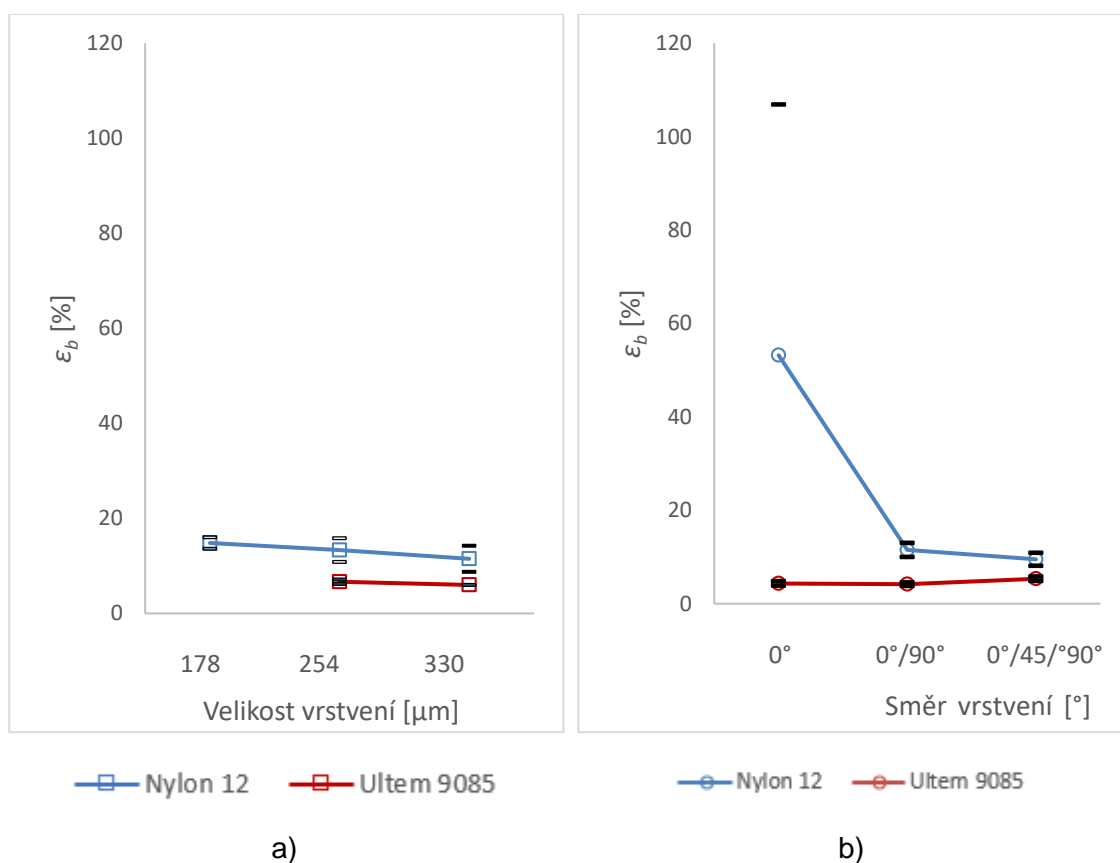


Obr. 44 Modul pružnosti v tahu E_t zkušebních těles polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 v závislosti a) na velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení $330 \mu\text{m}$

Deformace při přetržení ϵ_b polymeru Nylon 12 klesá s nižší tuhostí, resp. s modulem pružnosti v tahu E_t v případě závislosti na velikosti i směru vrstvení, viz obr. 45a, b. Nižší velikosti vrstvení lze dosáhnout vyšší adheze jednotlivých vrstev, což se projeví vyššími hodnotami deformace při přetržení.

Nejvyšších hodnot ϵ_b dosahuje tento polymer pro směr vrstvení 0° (při velikosti vrstvení $330 \mu\text{m}$). Tento výsledek je v souladu s literárními údaji, kdy deformace při lomu může u tohoto polymeru dosahovat hodnoty až 225 %. [36,41] Příčinou vysokých hodnot deformace při přetržení je pravděpodobně vysoká soudržnost vrstvení orientovaného do směru 0° , který je paralelní se směrem zatížení. [29]

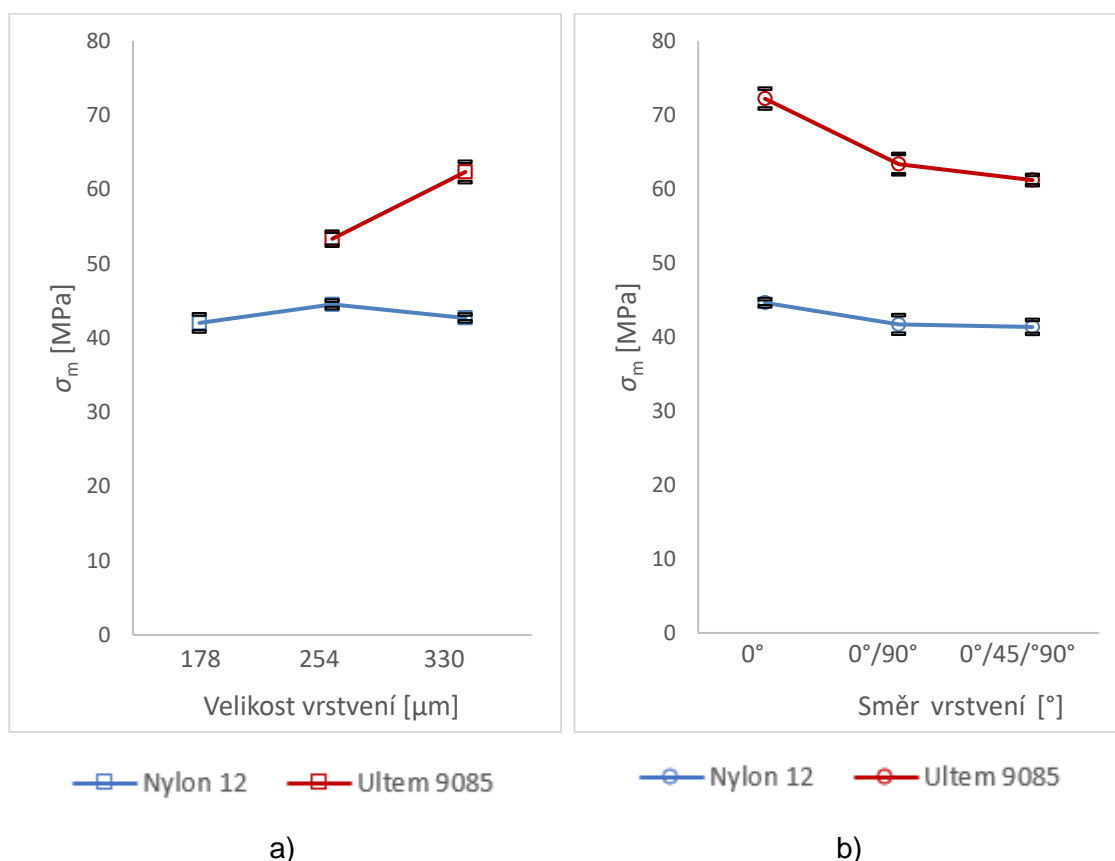
Polymer Ultem 9085 dosahuje výrazně nižších hodnot deformace do lomu ϵ_b než polymer Nylon 12, přičemž tato veličina je prakticky nezávislá jak na velikosti, tak i na směru vrstvení, viz obr. 45a, b. Nejvyšších hodnot ϵ_b , však na rozdíl od polymeru Nylon 12 vykazuje při směru vrstvení $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ (s velikostí vrstvení $330 \mu\text{m}$). Rozdíl hodnot ϵ_b této kombinace směrů od ostatních kombinací je však minimální.



Obr. 45 Deformace při porušení ϵ_b zkušebních těles polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 v závislosti a) na velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení $330 \mu\text{m}$

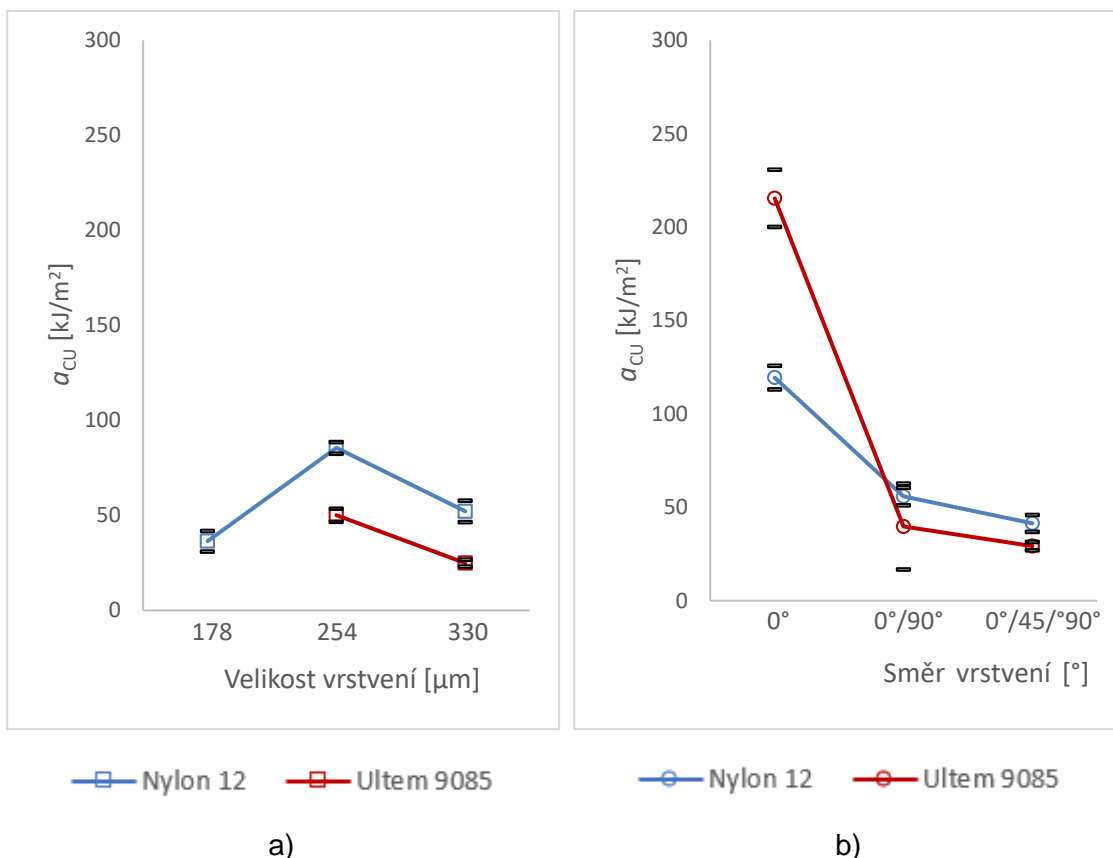
Mez pevnosti σ_m v případě polymeru Nylon 12 není výrazně ovlivněna velikostí a směrem vrstvení (všechny hodnoty σ_m jsou prakticky stejné), avšak v případě polymeru Ultem 9085 je vliv těchto parametrů výrazný, viz obr. 46a, b. Z grafů jsou také patrné vyšší hodnoty σ_m polymeru Ultem 9085, pro některé kombinace směru a velikosti vrstvení téměř dvojnásobné.

Oba polymery dosahují nejvyšších hodnot σ_m v případě velikosti a směru vrstvení 330 μm 0°.



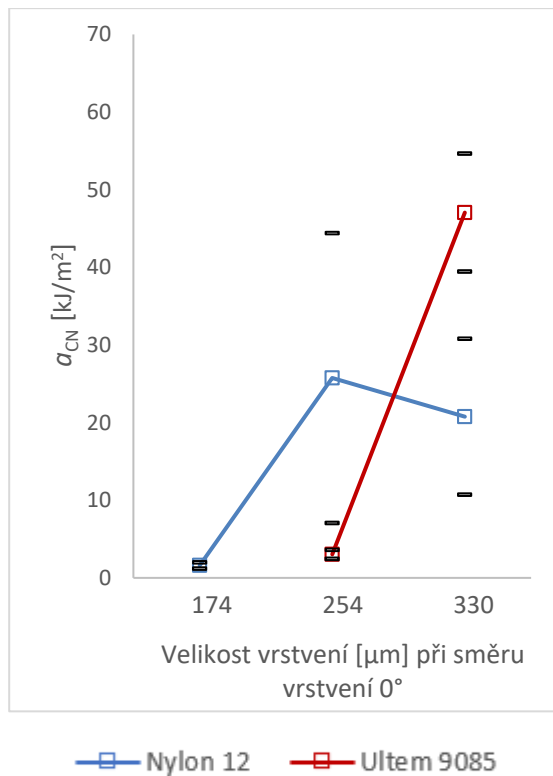
Obr. 46 Mez pevnosti v tahu σ_m zkušebních těles polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 v závislosti a) na velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm

Rázová houževnatost a_{cu} je v případě zkušebních těles bez vrubu poměrně výrazně závislá na velikosti i směru vrstvení, viz obr.47a, b. Nejvyšších hodnot v závislosti na velikosti vrstvení dosahovaly oba polymery při tloušťce vrstvy 254 μm , přičemž rázová houževnatost je v případě polymeru Nylon 12 přibližně dvojnásobná ve srovnání s materiálem Ultem 9085. Je nutné poznamenat, že v případě hodnocení závislosti rázové houževnatosti na velikosti vrstvení nebyl znám směr vrstvení zkušebních těles. Jak plyne z grafu na obr. 47 b, rázová houževnatost je značně citlivá na směr vrstvení. Nejvyšších hodnot rázové houževnatosti dosahovaly oba polymery pro směr vrstvení 0°, tedy směr vrstvení kolmý ke směru rázu. Materiál zkušebních těles v tomto případě vykazuje vysokou soudržnost vrstev a vysokou houževnatost. [29]



Obr. 47 Rázová houževnatost a_{CU} zkušebních těles bez vrubu z polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 v závislosti a) na velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení $330 \mu\text{m}$

Rázová houževnatost a_{CN} obou typů polymerů, určená na tělesech opatřených vytisknutým vrubem je v případě směru vrstvení 0° výrazně závislá na velikosti vrstvení, viz obr. 48. Hodnota rázové houževnatosti vzrůstá s velikostí vrstvení u obou typů polymerů. Nylon 12 dosahuje maximálních hodnot rázové houževnatosti při velikosti vrstvení $254 \mu\text{m}$, Ultem 9085 dosahuje nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti při velikosti vrstvení $330 \mu\text{m}$.



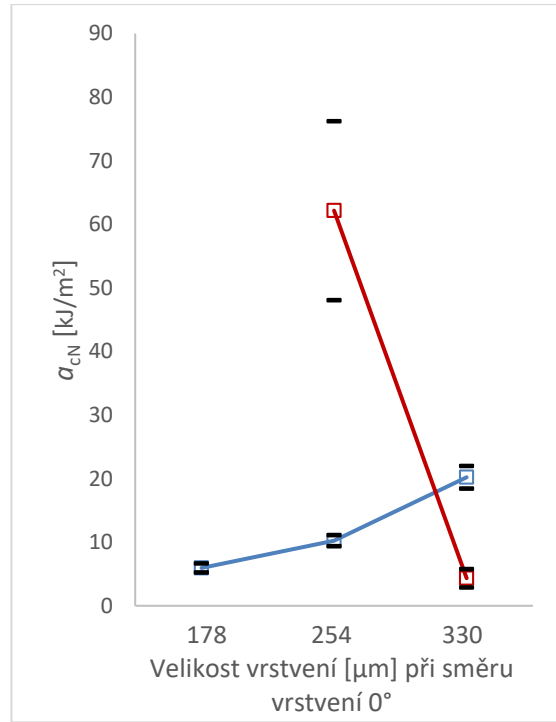
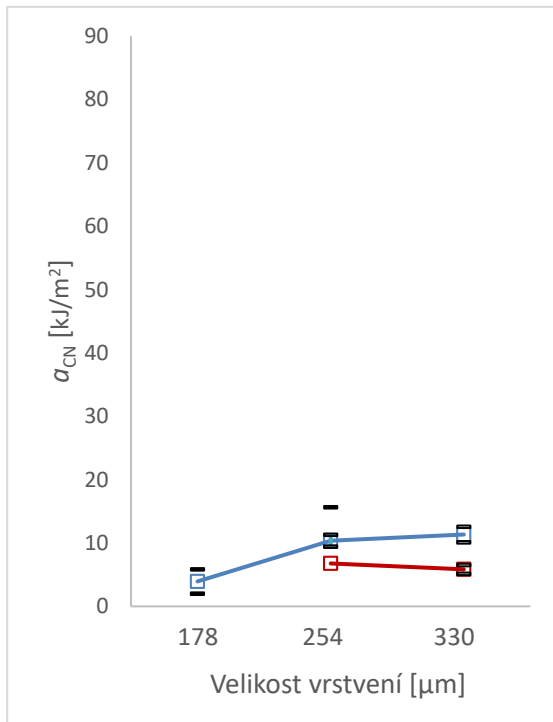
Obr. 48 Rázová houževnatost a_{CN} polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 s vytisknutým vrubem v závislosti na velikosti vrstvení při směru vrstvení 0°

Rázová houževnatost vrubovaných těles s obrobenými vruby byla v případě obou typů polymerů velmi nízká, a to pro všechny velikosti vrstvení, viz obr. 49a.

V závislosti na velikosti vrstvení při směru vrstvení 0° , viz obr. 49b, nabývá Nylon 12 vyšších hodnot rázové houževnatosti se vzrůstající velikostí vrstvení na rozdíl od polymeru Ultem 9085, u kterého je uvedená závislost opačná.

V závislosti na směru vrstvení při velikosti vrstvení $330 \mu\text{m}$ je hodnota rázové houževnatosti směrem vrstvení výrazněji ovlivněna v případě polymeru Nylon 12 (obr. 49c). Z grafu na uvedeném obrázku je rovněž patrné, že hodnoty rázové houževnatosti Ultem 9085 jsou pro všechny směry vrstvení velmi nízké.

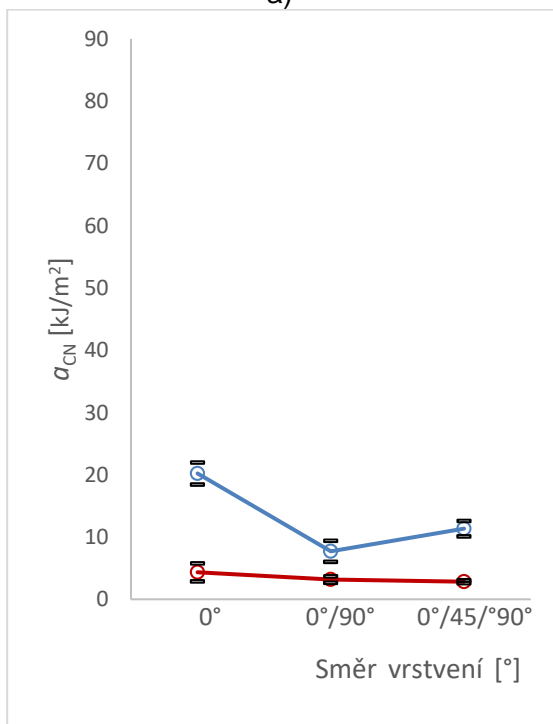
Nejvyšších hodnot rázové houževnatosti, určené na tělesech s obrobenými vruby dosahoval polymer Nylon 12 s velikostí a směrem vrstvení $330 \mu\text{m}$ 0° , polymer Ultem 9085 s velikostí a směrem vrstvení $254 \mu\text{m}$ 0° . Nízkou hodnotu rázové houževnatosti polymeru Ultem 9085 při velikosti a směru vrstvení $330 \mu\text{m}$ 0° lze přisuzovat existenci dutin ve struktuře těles a z toho plynoucí delaminaci vrstev při dynamické ohybovém namáhání, viz obr. 22.



—□— Nylon 12 —□— Ultem 9085

a)

b)



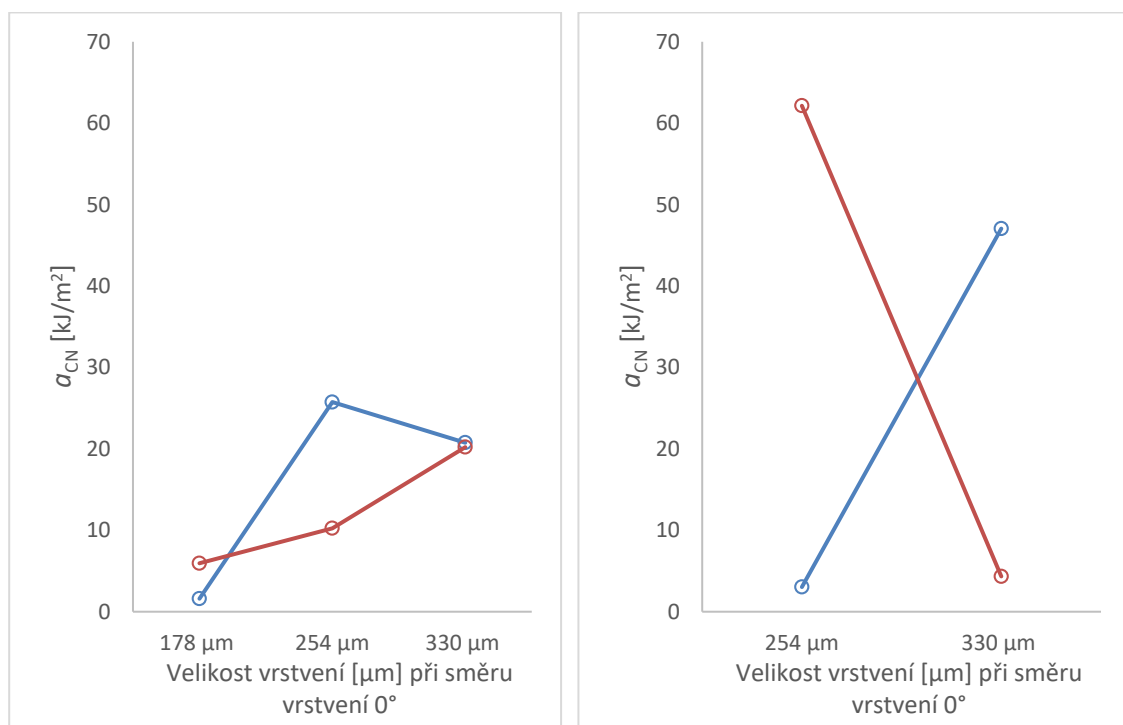
—○— Nylon 12 —○— Ultem 9085

c)

Obr. 49 Rázová houževnatost a_{CN} polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 s obroubeným vrubem v závislosti na a) velikosti vrstvení b) velikosti vrstvení při směru 0° c) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm

Srovnání obou typů polymerů z pohledu způsobu zhotovení vrubu, a to v závislosti na velikosti vrstvení (směr vrstvení 0°) je uvedeno na obr. 50a, b. Je zřejmé, že vrub zhotovený 3D tiskem v tělesech z polymeru Nylon 12 vykazuje nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti pro velikost vrstvení 254 μm, obr. 50a. Pro jiné velikosti vrstvení jsou hodnoty rázové houževnatosti na způsobu výroby vrubů prakticky nezávislé.

Polymer Ultem 9085 vykazuje v případě vrubu zhotoveného 3D tiskem odlišné chování než v případě vrubu zhotoveného obráběním. Tato skutečnost se projevuje výrazným rozdílem hodnot rázové houževnatosti, obr. 50b. Rázová houževnatost polymeru Ultem 9085 nabývá vyšších hodnot se vzrůstající velikostí vrstvení v případě vytisknutého vrubu, kdy důvodem může být zvýšená soudržnost vrstvení vlivem jeho spečení v oblasti vrubu, viz obr. 25b, a výrazně klesá s tloušťkou vrstev v případě obrobeneho vrubu. Pro detailnější hodnocení příčin uvedeného chování by ovšem bylo nutné mít k dispozici zkušební tělesa s větším počtem velikostí vrstvení.



—○— Nylon 12 tisk
 —○— Nylon 12 obrobena
 —○— Ultem 9085 tisk
 —○— Ultem 9085 obrobena

a)

b)

Obr. 50 Srovnání hodnot rázové houževnatosti a_{CN} zkušebních těles s vytisknutým a obrobeneým vrubem polymeru a) Nylon 12 b) Ultem 9085 v závislosti na velikosti vrstvení při směru vrstvení 0°

6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo posouzení vlivu anizotropie, tj. velikosti a směru vrstvení nanášených vrstev na mechanické vlastnosti polymerů Nylon 12 a Ultem 9085, vytisknutých technologií Fused Deposition Modeling (FDM).

V teoretické části práce je uveden přehled komerčně dostupných technologií aditivní výroby se zaměřením na technologii FDM. Tato technologie je rozebírána z hlediska principu tisku, používaných materiálů a vlivu parametrů výroby na fyzikální a mechanické vlastnosti výsledných produktů.

V experimentální části práce je vliv parametrů tisku (velikosti a směru vrstvení) hodnocen na základě výsledků mechanických zkoušek provedených na dvou typech polymerů, Nylon 12 a Ultem 9085. Účelem mechanických zkoušek bylo zjištění napětově-deformační odezvy na statické a dynamické zatěžování hladkých i vrubovaných zkušebních těles, ve všech případech za pokojové teploty. V případě vrubovaných zkušebních těles byl rovněž studován vliv způsobu výroby vrubu (tisk vs. obrábění) na hodnoty rázové houževnatosti. Všechny experimenty byly z důvodu reprodukovatelnosti a vzájemné porovnatelnosti provedeny na zkušebních tělesech v kondicionovaném stavu.

Na základě výsledků mechanických zkoušek lze konstatovat, že materiálové charakteristiky a mechanické vlastnosti polymerů Nylon 12 a Ultem 9085 jsou silně závislé na jejich anizotropii, tedy na velikosti a směru nanášeného vrstvení. Z pohledu výhodných mechanických vlastností se v případě obou typů polymerů jako nejefektivnější varianta třírozměrného tisku polymerního materiálu v poloze "on flat" jeví nanášení polotekutého filamentu s velikostí a směrem vrstvení $330\ \mu\text{m}\ 0^\circ$. Na druhou stranu, jako nejméně vhodná varianta tisku se jeví nanášení polotekutého filamentu při velikosti a směru vrstvení $330\ \mu\text{m}\ 0^\circ/45^\circ/90^\circ$.

Z výsledků zkoušek jsou také dobře patrné odlišnosti v lomovém chování použitých polymerů, důležité z hlediska jejich potencionálních oblastí aplikace. Polymer Nylon 12 lze charakterizovat jako materiál s nižší úrovní pevnosti a tuhosti, avšak poměrně vysokou plasticitou a houževnatostí. Polymer Ultem 9085 naopak vyniká svou relativně vysokou pevností, zároveň však poměrně nízkou plasticitou a vyšší křehkostí.

Literatura

- [1] COWARD, Cameron. 3D printing. New York, New York, USA: Alpha, a member of Penguin Group (USA), 2015. ISBN 978-1615647446.
- [2] HORVATH, Joan C. Mastering 3D printing. Berkeley, California: Apress, 2014. Technology in action series. ISBN 978-1-4842-0025-4.
- [3] FISCHER, Matthias a Volker SCHÖPPNER. Fatigue Behavior of FDM Parts Manufactured with Ultem 9085. JOM [online]. 2017, 69(3), 563-568 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1007/s11837-016-2197-2. ISSN 1047-4838. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11837-016-2197-2>
- [4] SHIH, Randy. Parametric Modeling with Autodesk Fusion 360 (Spring 2018 Edition). 2. Mission USA, 2018. ISBN 978-1630571993.
- [5] BARNATT, Christopher. 3D printing: Third Edition. 3. dopl. vyd. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. ISBN 978-1539655466.
- [6] HAUSMAN, Kalani Kirk a Richard HORNE. 3D printing for dummies. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-66077-5.
- [7] Ultra-high-resolution 3D Printer Breaks Speed-Records at Vienna University of Technology [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: Technische Universität Wien : 3D-Printer with Nano-Precision. Technische Universität Wien : TU Wien [online]. Dostupné z: https://www.tuwien.ac.at/en/news/news_detail/article/7444/
- [8] ZALDIVAR, R.J., D.B. WITKIN, T. MCLOUTH, D.N. PATEL, K. SCHMITT a J.P. NOKES. Influence of processing and orientation print effects on the mechanical and thermal behavior of 3D-Printed ULTEM ® 9085 Material. Additive Manufacturing [online]. 2017, 13, 71-80 [cit. 2018-03-21]. DOI: 10.1016/j.addma.2016.11.007. ISSN 22148604. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860416301609>
- [9] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen H TTER. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Munich: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [10] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, c2010. ISBN 978-1-4419-1120-9.
- [11] CARNEIRO, O.S., A.F. SILVA a R. GOMESA. Fused deposition modeling with polypropylene [online]. 15.10.2015 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127515004037>
- [12] Key Takeaways From Sculpteo's State of 3D Printing 2017 Study [online]. 2017 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/news/key-takeaways-sculpteos-state-3d-printing-2017-study/>
- [13] CHUANG, Kathy C., Joseph E. GRADY a Robert D. DRAPER. ADDITIVE MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF ULTEM POLYMERS AND COMPOSITES [online]. 2015, , 15 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160001352.pdf>

- [14] WANGA, Xin, Man JIANG, Zuowan ZHOU, Jihua GOUA a David HUI. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective [online]. 2017 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816321230>
- [15] ÁLVAREZ, Kenny, Rodrigo F. LAGOS a Miguel AIZPUN. Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. *Ingeniería e Investigación* [online]. 2016, 36(3), 110- [cit. 2018-03-1]. DOI: 10.15446/ing.investig.v36n3.56610. ISSN 2248-8723. Dostupné z: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/ingainv/article/view/56610>
- [16] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Rozdělení a charakteristika polymerů* [online]. Svitavy: Code Creator, 2016 [cit. 2018-03-17]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [17] 3D printing solutions: Materials, technologies and printers: how to make the right choice for your organization and use case. *Stratasys* [online]. 2016 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/campaign/resource-guide/3d-printing-solutions>
- [18] FRANCE, Anna Kaziunas. *Make: 3D Printing: Projects and Tutorials From The Pages of MAKE magazine*. Maker Media, 2013. ISBN 1457182939.
- [19] EBEWELE, Robert Oboigbaotor. *Polymer science and technology*. Boca Raton: CRC Press, c2000. ISBN 9780849389399.
- [20] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2., opr. a rozš. vyd.* Brno: CERM, c2002. ISBN 9788072042487.
- [21] GARDNER, John, Edward A. JASHIN a Emilie J. SIOCHI. High Temperature Thermoplastic Additive Manufacturing Using Low-Cost, OpenSource Hardware [online]. October 2016, , 17 [cit. 2018-05-16]. DOI: 10.13140/RG.2.2.20690.15049. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170000214.pdf>
- [22] FDM best practices: Support removal. *Stratasys* [online]. 2016 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/resources/best-practices>
- [23] WU, Wenzheng, Peng GENG, Guiwei LI, Di ZHAO, Haibo ZHANG a Ji ZHAO. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials* [online]. 2015, 8(9), 5834-5846 [cit. 2018-03-18]. DOI: 10.3390/ma8095271. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/8/9/5271>
- [24] MOHAMED, Omar Ahmed, Jahar Lal BHOWMIK a Syed Hasan MASOODA. Mathematical modeling and FDM process parameters optimization using response surface methodology based on Q-optimal design [online]. 9.7.2016 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X16303675>

- [25] MOHAMED, Omar A., Syed H. MASOOD a Jahar L. BHOWMIK. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects [online]. 2015, , 12 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://html.rhhz.net/AIM/html/122.htm#rhhz>
- [26] KNOOP, F. a V. SCHOEPPNER. MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF FDM PARTS MANUFACTURED WITH POLYAMIDE 12 [online]. 2015, , 14 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-77-Knoop.pdf>
- [27] HERNANDEZ, R., D. SLAUGHTER, D. WHALEY, J. TATE a B. ASIABANPOUR. ANALYZING THE TENSILE, COMPRESSIVE, AND FLEXURAL PROPERTIES OF 3D PRINTED ABS P430 PLASTIC BASED ON PRINTING ORIENTATION USING FUSED DEPOSITION MODELING [online]. 2016, , 12 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2016/076-Hernandez.pdf>
- [28] Knowledge Base. 3D Hubs: Local Manufacturing | 3D Printing & CNC Machining [online]. Copyright ©2018 3D Hubs [cit. 10.01.2018]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base>
- [29] FDM Materials | ABS, ASA, PC, PPSF, ULTEM, Nylon | Stratasys Direct. 3D Printing Service | Order 3D Printed Parts Online | Stratasys Direct [online]. [cit. 19.03.2018]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/materials/fused-deposition-modeling>
- [30] EL-GIZAWY, A. Sherif, Shan CORL a Brian GRAYBILL. Process-induced Properties of FDM Products [online]. , 7 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/FDM%20Test%20Reports/Processinduced%20Properties%20of%20FDM%20Products.pdf?v=634600741947138884>
- [31] MOHAMED, Omar Ahmed. Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment [online]. 10.7.2016 [cit. 2018-03-19]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2157-6>. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-016-2157-6>
- [32] ENKQVIST, Gustav. Investigation of microstructure and mechanical properties of 3D printed Nylon [online]. 2017 [cit. 2018-04-1]. Dostupné z: <http://tu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1153278&dswid=-2861>. Master thesis. Luleå University of Technology. Vedoucí práce Joffe, Roberts.
- [33] BAGSIK, Agnes. MECHANICAL PROPERTIES OF FUSED DEPOSITION MODELING PARTS MANUFACTURED WITH ULTEM*9085 [online]. 2011, , 5 [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/~media/Main/Files/FDM%20Test%20Reports/Mechanical%20Properties%20of%20Ultem%20FDM%20Parts.pdf>

- [34] P. CHENNAKESAVA SAI, SHIVRAJ YEOLE. Fused Deposition Modeling - Insights [online]. National Institute of Technology Tiruchirappalli, 2014 [cit. 2018-01-22]. ISBN9789384743123. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/269702639_Fused_Deposition_Modeling_-_Insights
- [35] SIKDER, S., Ahmad BARARI a H. A. KISHAWY. Effect of Adaptive Slicing on Surface Integrity in Additive Manufacturing. In: Volume 1A: 34th Computers and Information in Engineering Conference [online]. ASME, 2014, 2014-8-17, V01AT02A052- [cit. 2018-03-19]. DOI: 10.1115/DETC2014-35559. ISBN 978-0-7918-4628-5. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/DETC2014-35559>
- [36] SINGH, Rupinder, Piyush BEDI a Fernando FRATERNALI. Effect of single particle size, double particle size and triple particle size Al₂O₃ in Nylon-6 matrix on mechanical properties of feed stock filament for FDM [online]. 28.8.2016, , 8 [cit. 2018-05-22]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.08.039. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816314135>
- [37] ČSN EN ISO 527-2. Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Praha: ÚNMZ, 2012. 16 s.
- [38] ČSN EN ISO 179-1. Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. Praha: ÚNMZ 2010. 24 s.
- [39] ČSN EN ISO 1110. Plasty - Polyamidy - Zrychlené kondicionování zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 1999. 8 s.
- [40] Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy. Praha: ÚNMZ, 2012. 28 s.
- [41] CHALOUPKA, Ing. Matyáš. Konstrukce 3D tiskárny pro tisk materiálu s příměsí karbonových vláken [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/100884>. Diplomová práce. VUT FSI. Vedoucí práce Ing. Jan Pavlík, Ph.D.
- [42] RAHIM, T. N. A. T., A. M. ABDULLAH, H. MD AKIL, D. MOHAMAD a Z. A. RAJION. The improvement of mechanical and thermal properties of polyamide 12 3D printed parts by fused deposition modelling. Express Polymer Letters [online]. 2017, 11(12), 963-982 [cit. 2018-02-4]. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2017.92. ISSN 1788618X. Dostupné z: <http://www.expresspolymlett.com/letolt.php?file=EPL-0008339&mi=c>

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Popis
.STL	stereolitografický
ABS	akrylonitril-butadien-styren
ABSi	akrylonitril- Butadien-Styren–biokompatibilní
a_{CU}	rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu
a_{CN}	rázová houževnatost zkušebních těles opatřených vrubem
b (b2)	šířka konců zkušebního tělesa
C	úplné přeražení zkušebního tělesa
CAD	Computer-Aided Design
DDM	Direct Digital Manufacturing
E_c	korigovaná energie
E_M	energie
E_t	modul pružnosti v tahu
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FST	Fire, Smoke, Toxicity
h	doporučená tloušťka zkušebního tělesa
L	celková délka zkušebního tělesa
L_o	počáteční měřená délka zkušebního tělesa
LOM	Laminated Object Manufacturing
N	Dusík
N	nepřeraženo
O	Kyslík
P	částečné přeražení zkušebního tělesa
PA	polyamid
PA 12CF	polyamid vyztužený uhlíkovými vlákny
PC	polykarbonát
PEEK	polyetherketon
PEI	polyetherimid
PLA	polyactid acid
r	radius
r_N	poloměr kořene vrubu
RP	Rapid Prototyping
s	směrodatná odchylka

SLA	Stereolitografie, Stereolithography
SLA-1	první komečně dostupná 3D tiskárna SLA-1
SLS	Selective laser sintering
α	úhel rozevření vrubu
ϵ_b	deformace při přetržení
σ_m	Mez pevnosti
σ_y	Napětí na mezi kluzu
\bar{X}	aritmetický průměr měřené veličiny

Seznam obrázků

- Obr. 1 První komerčně dostupná 3D tiskárna SLA-1
- Obr. 2 Příklady použití 3D tiskových technologií a) planetová převodovka
b) tělní implantáty
- Obr. 3 Nanomodel formule tisknutý pomocí dvoufotonové litografie
- Obr. 4 Přehled nejpoužívanějších technologií aditivní výroby
- Obr. 5 Princip technologie FDM
- Obr. 6 Rozdělení používaných termoplastů dle oblastí použití
- Obr. 7 Popis některých parametrů výroby
- Obr. 8 Orientace tisknutého modelu při jeho výrobě
- Obr. 9 Příklady ustavení a upevnění tisknutého modelu pomocí podpůrné konstrukce
- Obr. 10 Válec vytisknutý ve směru Z a Y
- Obr. 11 Vliv směru zatížení vzhledem ke směru naneseného vrstvení na jeho soudržnost
- Obr. 12 Závislost meze pevnosti na orientaci modelu při 3D tisku
- Obr. 13 Příklady orientace vrstvení vzorků a) 0° b) 45° c) 90° d) +45°/-45°
- Obr. 14 a) vzniklá dutina mezi vlákny a konturou materiálu b) materiál bez dutiny
- Obr. 15 Závislost meze pevnosti polymeru Ultem 9085 na parametrech výroby
- Obr. 16 Schodová chyba tisknutého materiálu
- Obr. 17 Zkušební tělesa typu 1B
- Obr. 18 Zkušební těleso pro stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy
- Obr. 19 Nerovnosti na povrchu zkušebních těles pro tahovou zkoušku
a) Nylon 12 b) Ultem 9085
- Obr. 20 Vzduchová dutina mezi vrstvami a konturou na konci zkušebního tělesa
a) Nylon 12 b) Ultem 9085
- Obr. 21 Rozdílné tloušťky vrstvení ve zkušebním tělese polymeru Nylon 12 (směr vrstvení 0°)
- Obr. 22 Vzduchové dutiny mezi vrstvením zkušebního vzorku Ultem 9085 s orientací 0°
- Obr. 23 Provedení vrubu na zkušebním tělese materiálu Nylon 12 obráběním
- Obr. 24 Provedení vrubu na zkušebním tělese materiálu Nylon 12 obráběním
- Obr. 25 Provedení vrubu 3D tiskem a) Nylon 12 b) Ultem 9085
- Obr. 26 Typické křivky napětí/poměrná deformace
- Obr. 27 Závislost modulu pružnosti v tahu E_t polymeru Nylon 12 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 28 Závislost meze pevnosti v tahu σ_m polymeru Nylon 12 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 29 Závislost deformace při přetržení ε_b polymeru Nylon 12 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm

- Obr. 30 Plastická deformace v oblasti lomu a lomová plocha zkušebního tělesa a), b) s velikostí vrstvení 254 μm c) s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°
- Obr. 31 Příklady porušených zkušebních těles pro zkoušku tahem polymeru Nylon 12
- Obr. 32 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0° po zkoušce tahem
- Obr. 33 Srovnání lomových ploch těles s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0° s deformací při přetržení a) 10 % b) 118 %
- Obr. 34 Závislost modulu pružnosti v tahu E_t polymeru Ultem 9085 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 35 Závislost meze pevnosti v tahu σ_m polymeru Ultem 9085 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 36 Závislost deformace při přetržení ϵ_b polymeru Ultem 9085 na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 37 Příklady porušených zkušebních těles pro zkoušku tahem polymeru Ultem 9085
- Obr. 38 Oblast lomové plochy s min. plastickou deformací tělesa s velikostí vrstvení 330 μm
- Obr. 39 Rázová houževnatost a_{CU} zkušebních těles bez vrubu (Nylon 12) v závislosti na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 40 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles polymeru Nylon 12 a) s vytisklým vrubem v závislosti na velikosti vrstvení při směru vrstvení 0° b) s obrobeným vrubem v závislosti na velikosti vrstvení c) s obrobeným vrubem v závislosti na velikosti a směru vrstvení
- Obr. 41 Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu polymeru Ultem 9085 v závislosti na a) velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 42 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles polymeru Ultem 9085 a) s vytisklým vrubem v závislosti na velikosti vrstvení při směru vrstvení 0°, b) s obrobeným vrubem v závislosti na velikosti vrstvení c) s obrobeným vrubem v závislosti na velikosti a směru vrstvení
- Obr. 43 Delaminace zkušebních těles a) s velikostí a směrem vrstvení 254 μm 0°, opatřených tištěným vrubem, b) s velikostí a směrem vrstvení 254 μm 0° opatřená obrobeným vrubem
- Obr. 44 Modul pružnosti v tahu E_t zkušebních těles polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 v závislosti a) na velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm

- Obr. 45 Deformace při porušení ϵ_b zkušebních těles polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 v závislosti a) na velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 46 Mez pevnosti v tahu σ_m zkušebních těles polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 v závislosti a) na velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 47 Rázová houževnatost a_{CU} zkušebních těles polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 bez vrubu v závislosti a) na velikosti vrstvení b) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 48 Rázová houževnatost a_{CN} polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 s vytisknutým vrubem v závislosti na velikosti vrstvení při směru vrstvení 0°
- Obr. 49 Rázová houževnatost a_{CN} polymeru Nylon 12 a Ultem 9085 s obrobeným v závislosti na a) velikosti vrstvení b) velikosti vrstvení při směru 0° c) směru vrstvení při velikosti vrstvení 330 μm
- Obr. 50 Srovnání hodnot rázové houževnatosti a_{CN} zkušebních těles s vytisknutým a obrobeným vrubem polymeru a) Nylon 12 b) Ultem 9085 v závislosti na velikosti vrstvení při směru vrstvení 0°

Seznam tabulek

- Tab. 1 Rozdělení 3D tiskových technologií
- Tab. 2 Výhody a nevýhody technologie FDM
- Tab. 3 Přehled teplot při tisku modelů z vybraných materiálů
- Tab. 4 Rozdělení experimentálního materiálu Nylon 12 a Ultem 9085 dle velikosti a směru vrstvení
- Tab. 5 Nominální rozměry zkušebních těles
- Tab. 6 Základní materiálové charakteristiky, Nylon 12
- Tab. 7 Pozorované typy porušení zkušebních těles materiálu Nylon 12
- Tab. 8 Základní materiálové charakteristiky, Ultem 9085
- Tab. 9 Rázová houževnatost a_{CU} zkušebních těles bez vrubu, Nylon 12
- Tab. 10 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles s vytisknutým vrubem, Nylon 12
- Tab. 11 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles s obrobeným vrubem, Nylon 12
- Tab. 12 Rázová houževnatost a_{CU} zkušebních těles bez vrubu, Ultem 9085
- Tab. 13 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles s vytisknutým vrubem, Ultem 9085
- Tab. 14 Rázová houževnatost a_{CN} zkušebních těles s obrobeným vrubem, Ultem 9085

Seznam příloh

- Příloha A. Křivky napětí/poměrná deformace polymeru Nylon 12
- Příloha B. Křivky napětí/poměrná deformace polymeru Ultem 9085
- Příloha C. Výsledky tahových zkoušek polymeru Nylon 12
- Příloha D. Výsledky tahových zkoušek polymeru Ultem 9085
- Příloha E. Výsledky neinstrumentovaných rázových zkoušek polymeru Nylon 12
- Příloha F. Výsledky neinstrumentovaných rázových zkoušek polymeru Ultem 9085

Příloha A



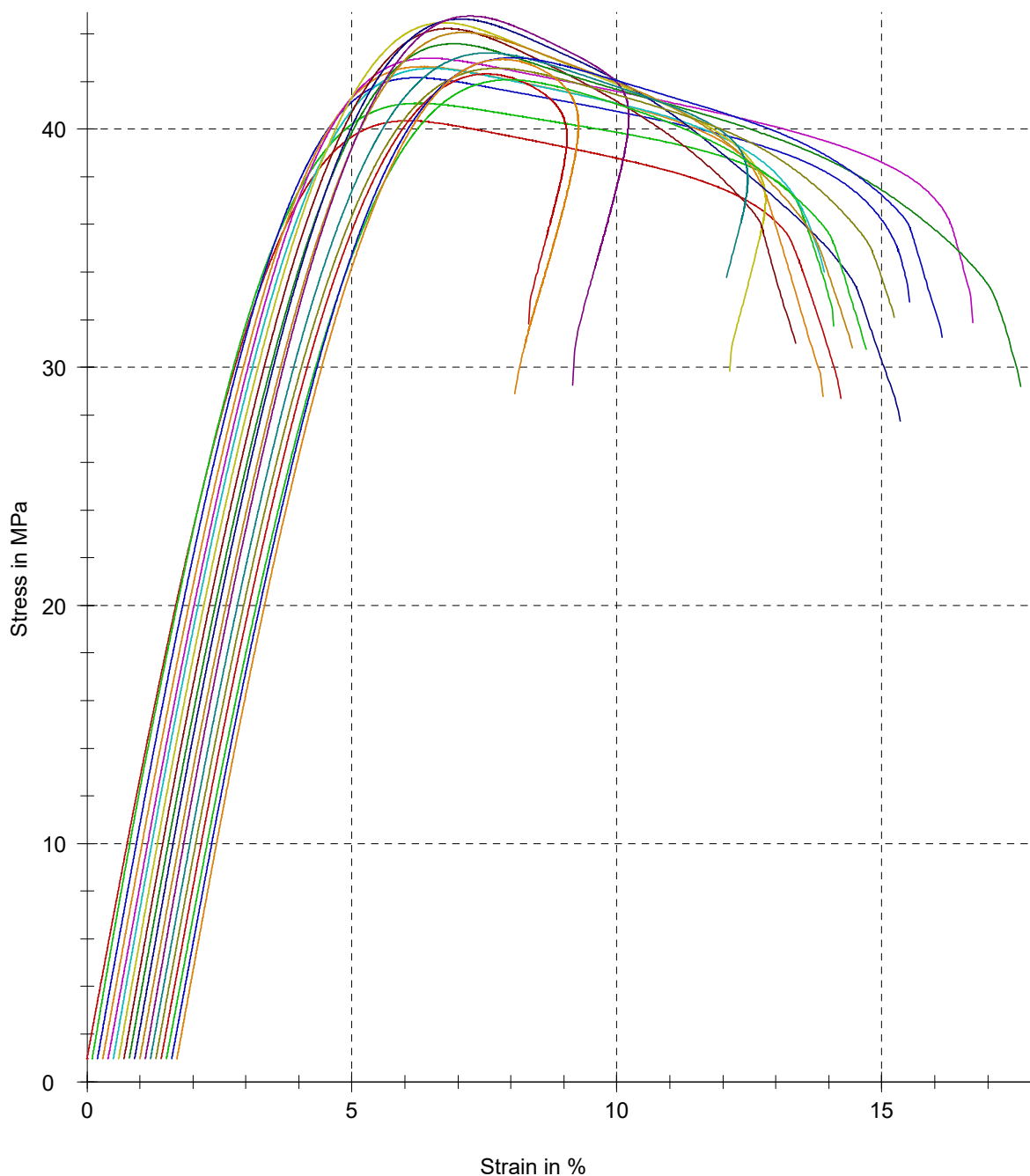
Test report

Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Speed, tensile modulus : 1 mm/min Gage length, standard travel : 50 mm
Test speed : 5 mm/min

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Nylon 12 v závislosti na velikosti vrstvení



Test report

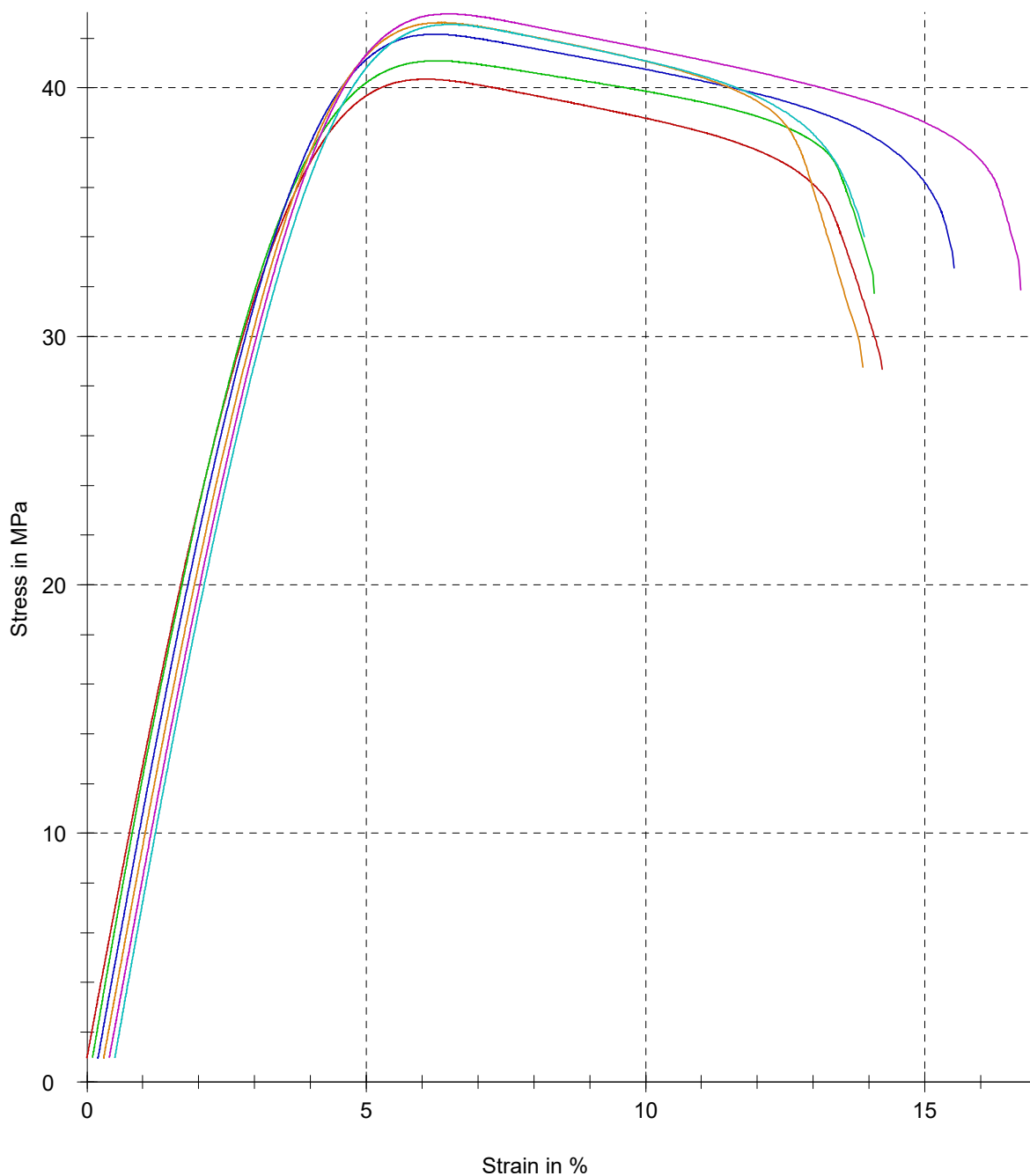
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Nylon 12 s velikostí vrstvení 178 μm



Test report

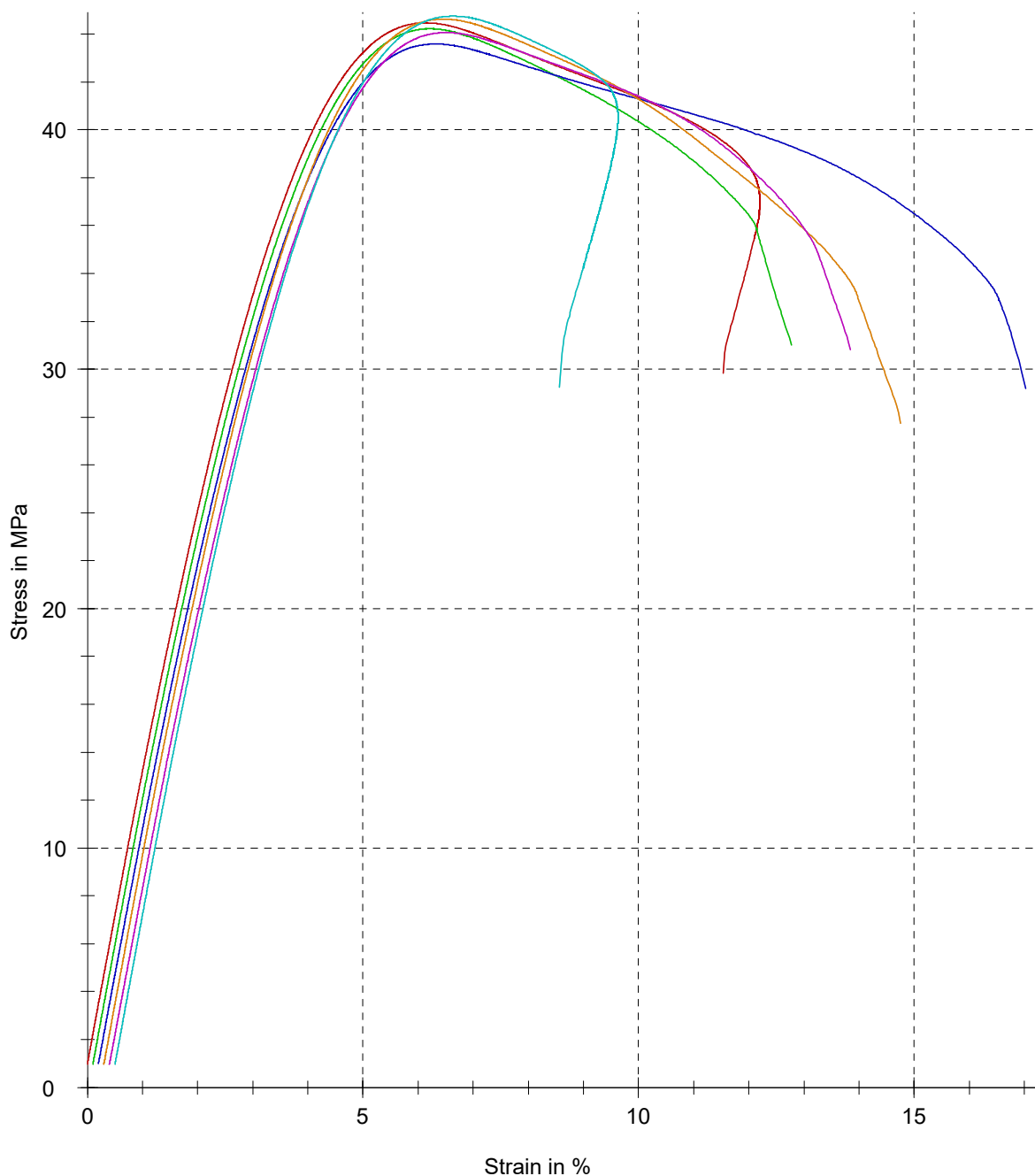
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Nylon 12 s velikostí vrstvení 254 μm



Test report

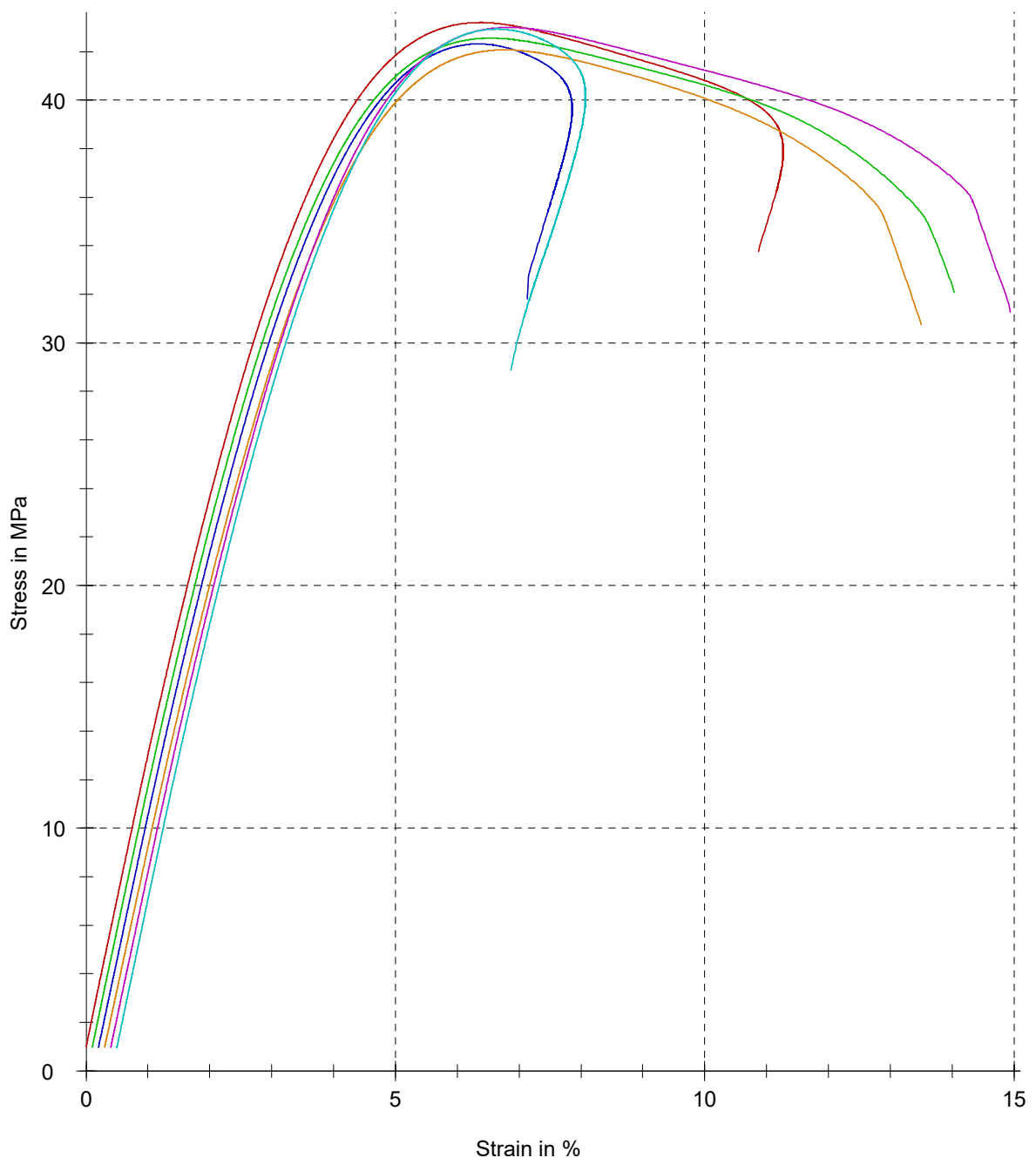
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Nylon 12 s velikostí vrstvení 330 μm



Test report

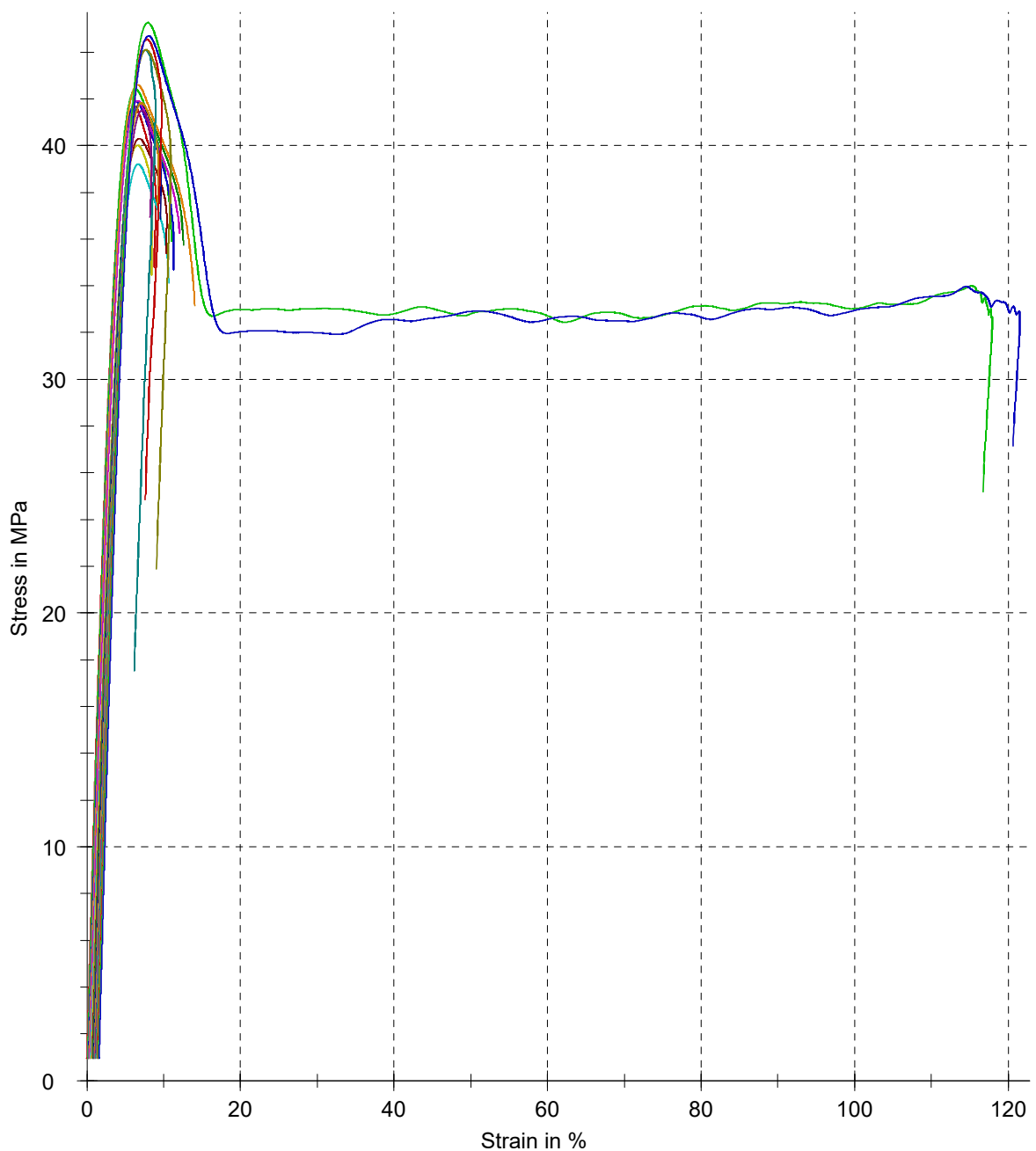
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Nylon 12 v závislosti na velikosti a směru vrstvení



Test report

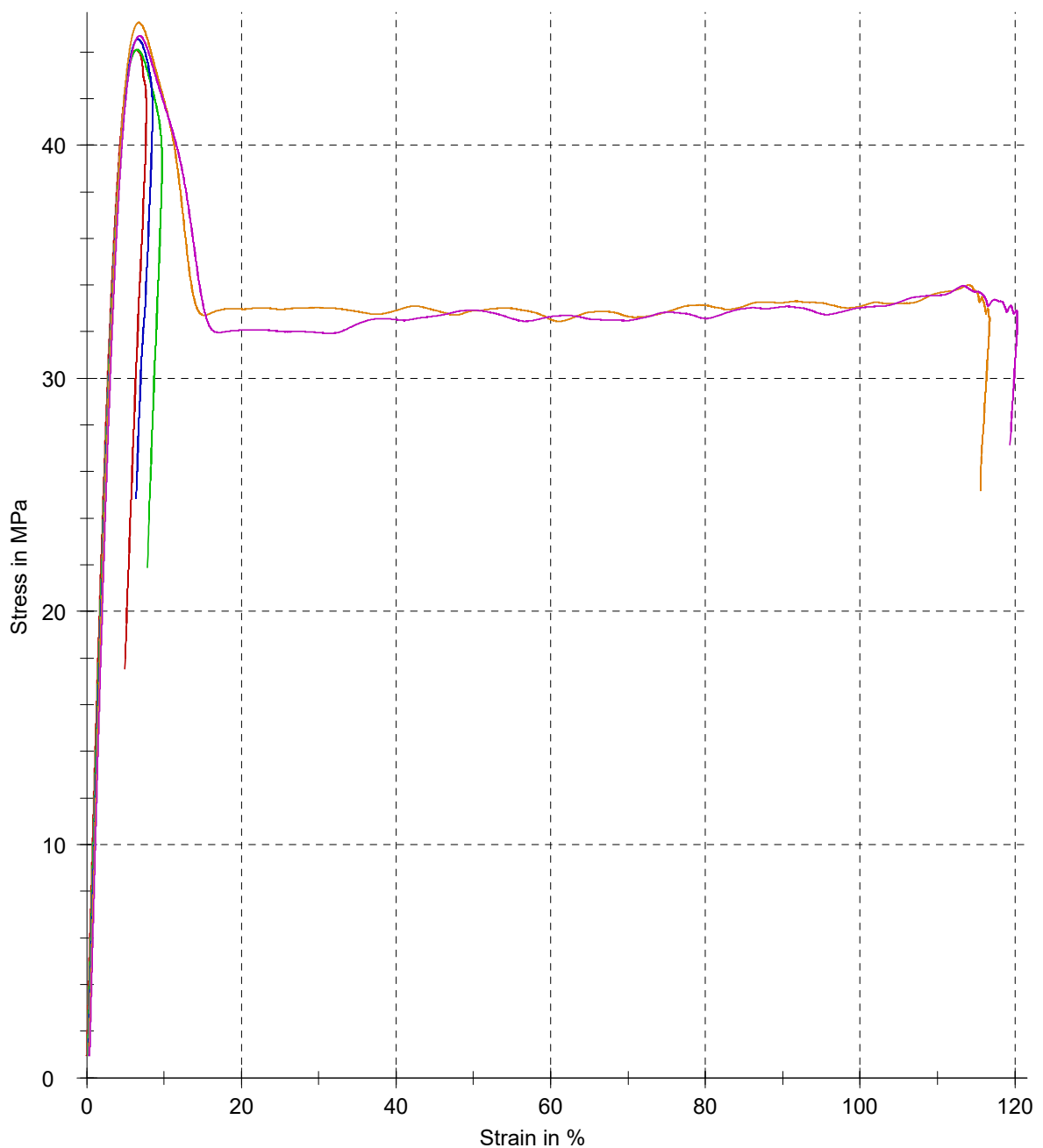
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Nylon 12 s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°



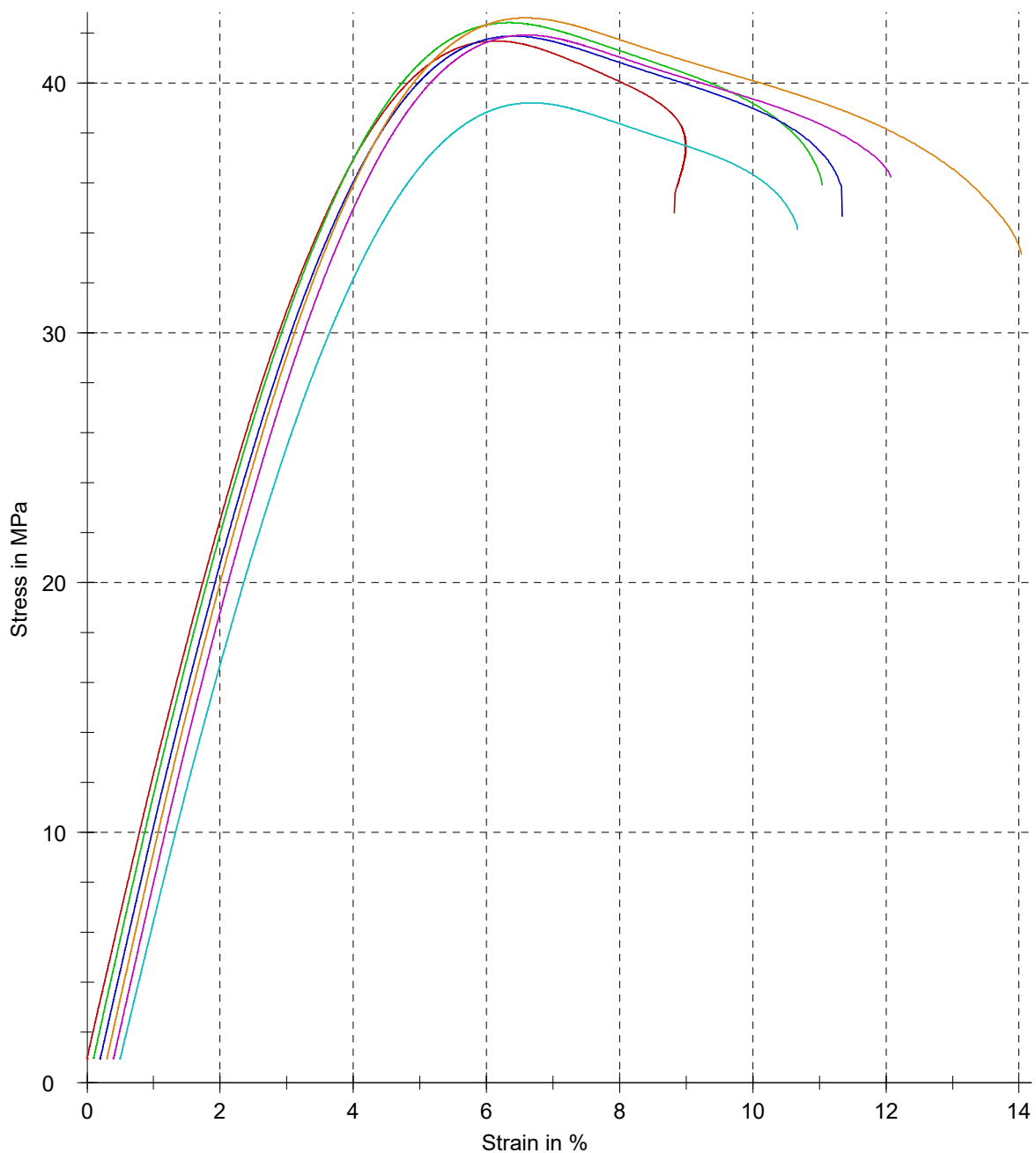
Test report

Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Speed, tensile modulus : 1 mm/min Gage length, standard travel : 50 mm
Test speed : 5 mm/min

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Nylon 12 s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/90°



Test report

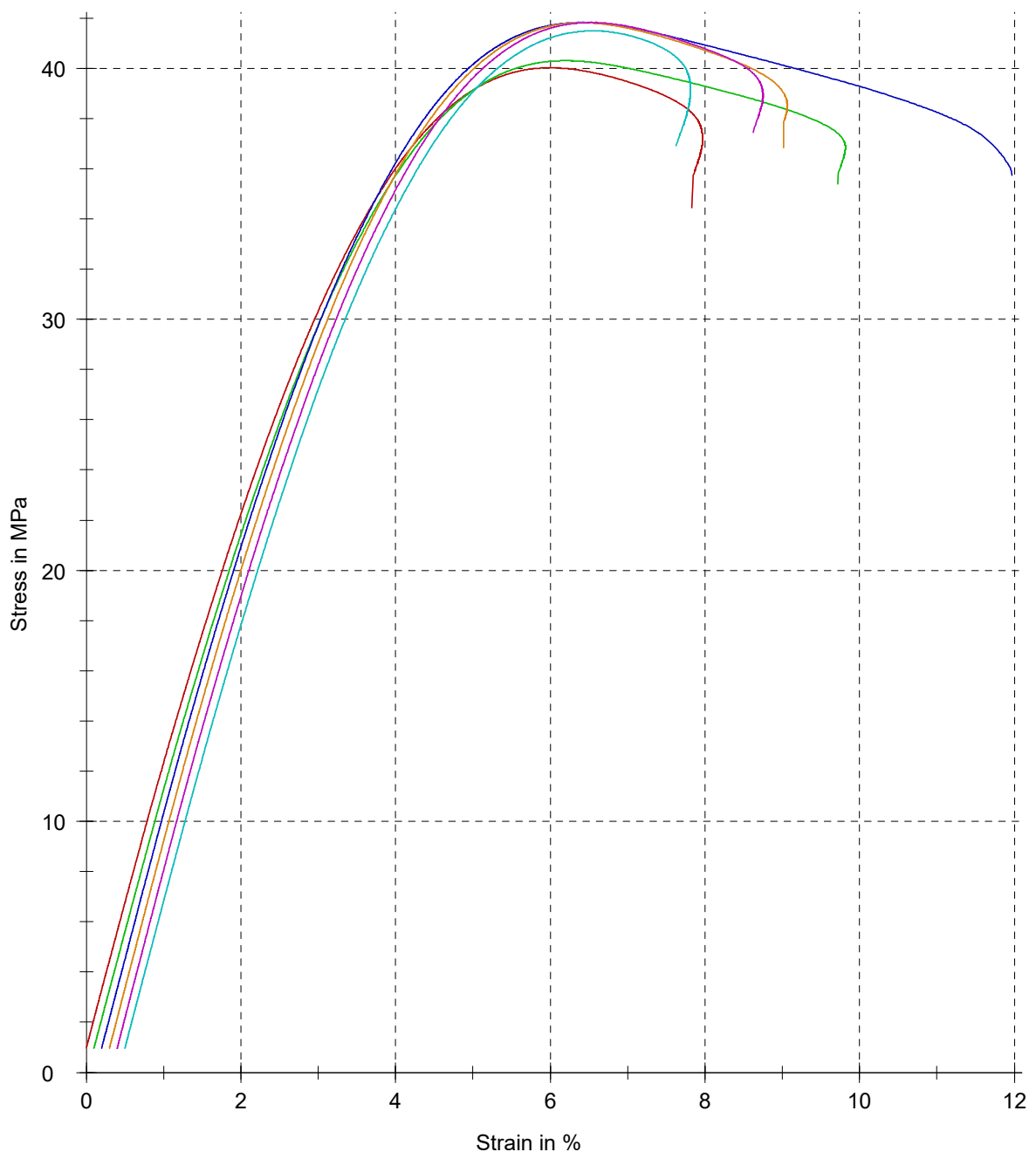
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Nylon 12 s velikostí a směrem
vrstvení 330 μ m 0°/45°/90°

Příloha B

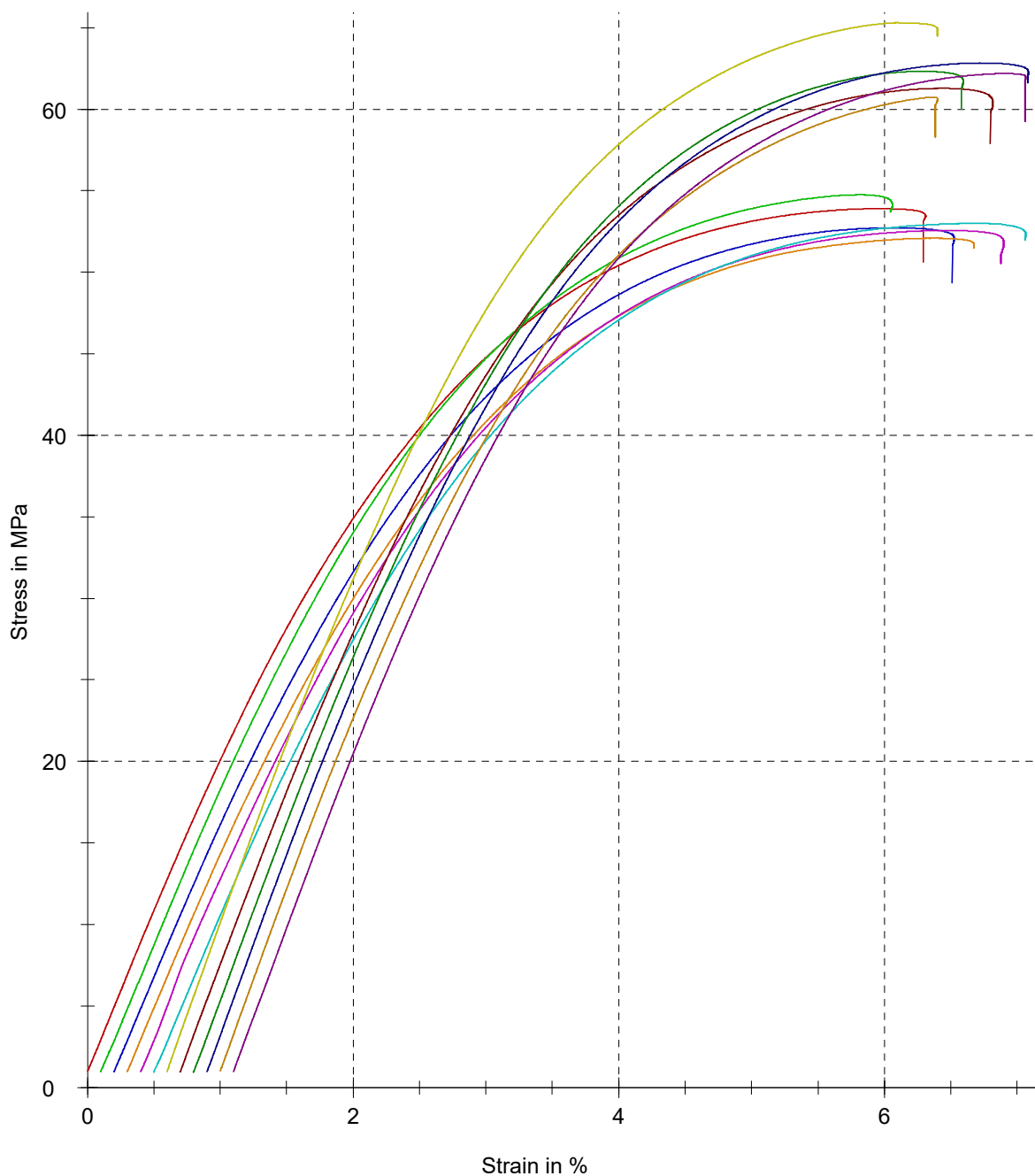
Test report

Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Speed, tensile modulus : 1 mm/min Gage length, standard travel : 50 mm
Test speed : 5 mm/min

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Ultem 9085 v závislosti na velikosti vrstvení



Test report

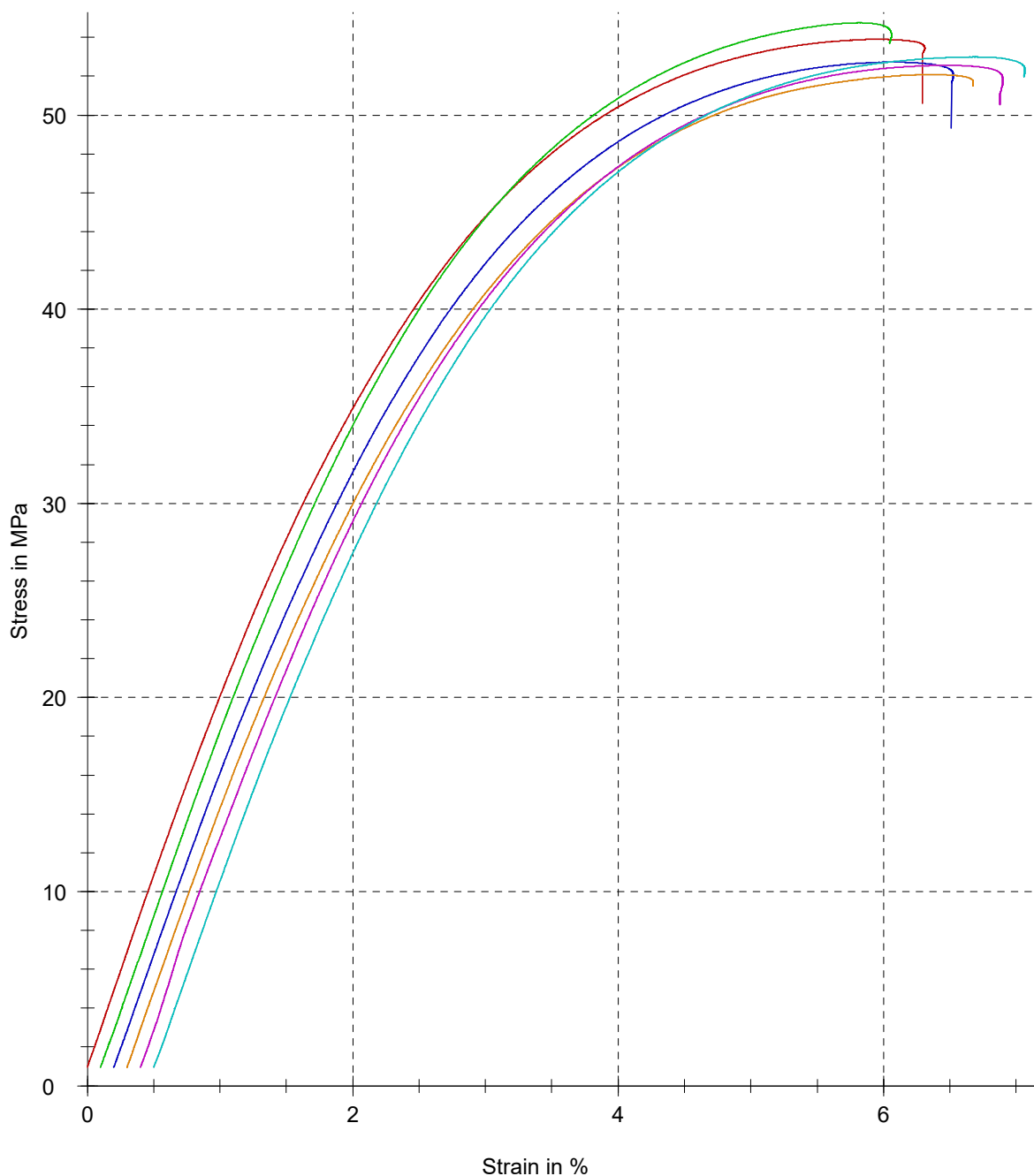
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Ultem 9085 s velikostí vrstvení 254 μ m



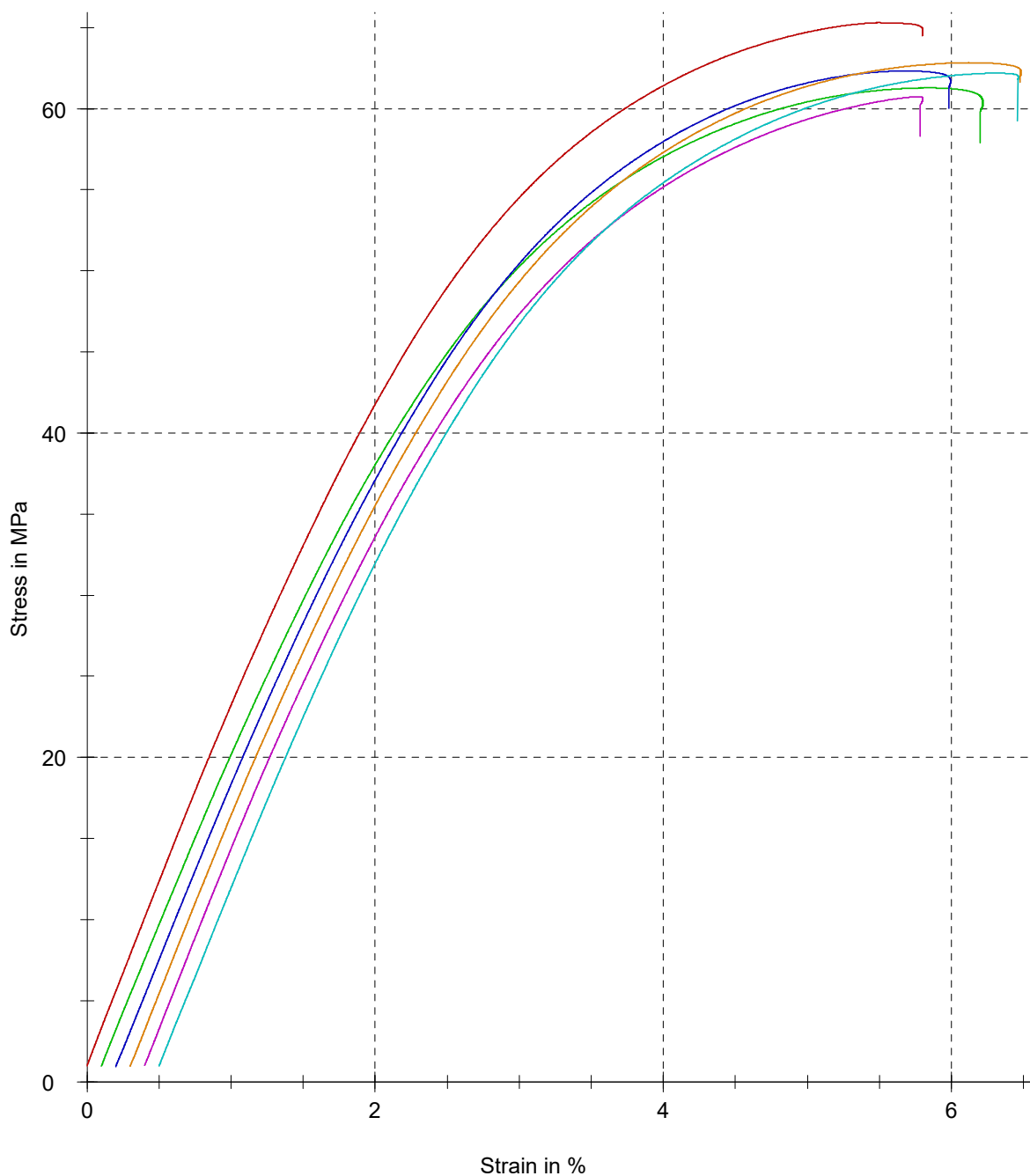
Test report

Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Speed, tensile modulus : 1 mm/min Gage length, standard travel : 50 mm
Test speed : 5 mm/min

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Ultem 9085 s velikostí vrstvení 330 μ m



Test report

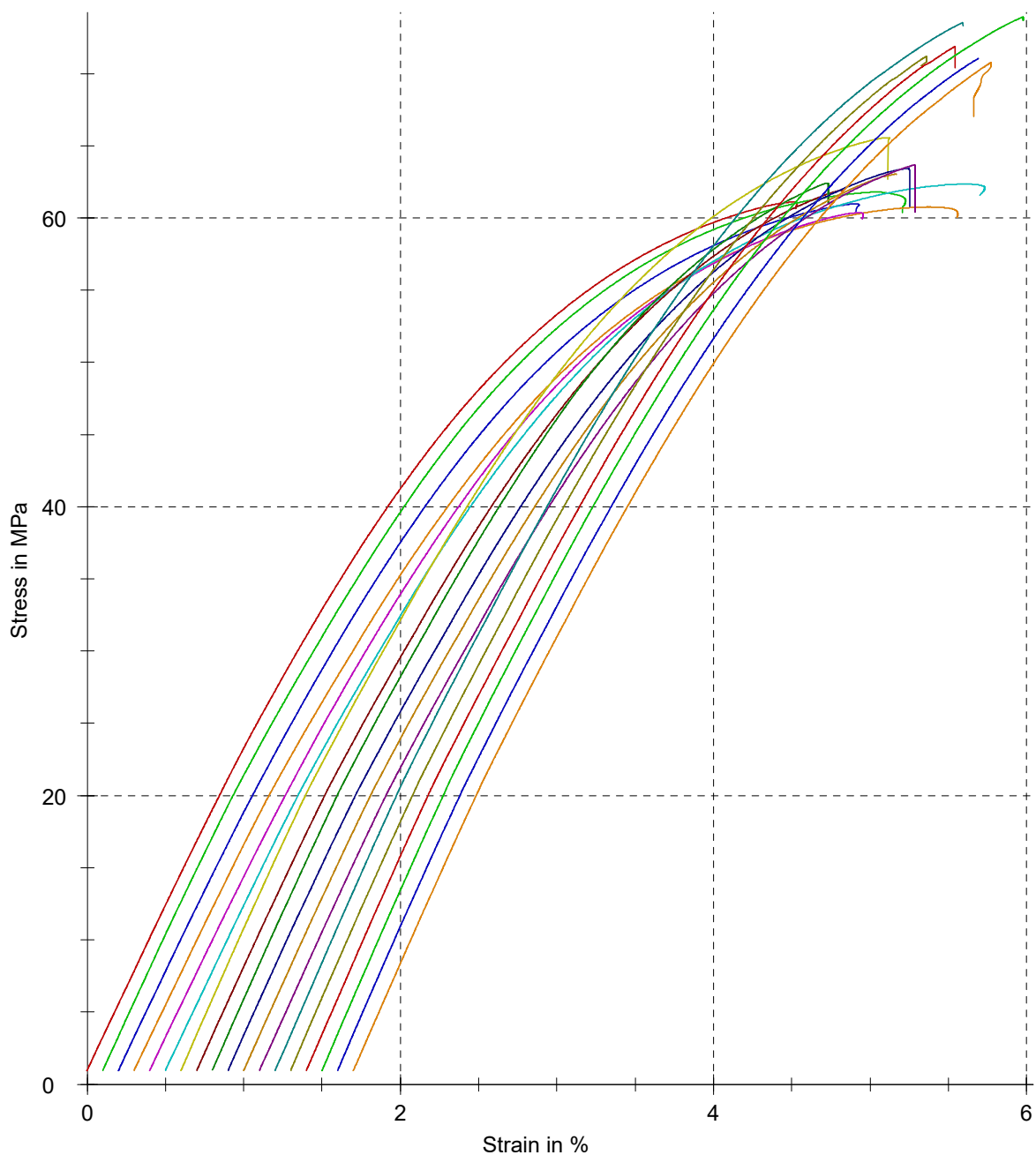
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Ultem 9085 v závislosti na směru vrstvení



Test report

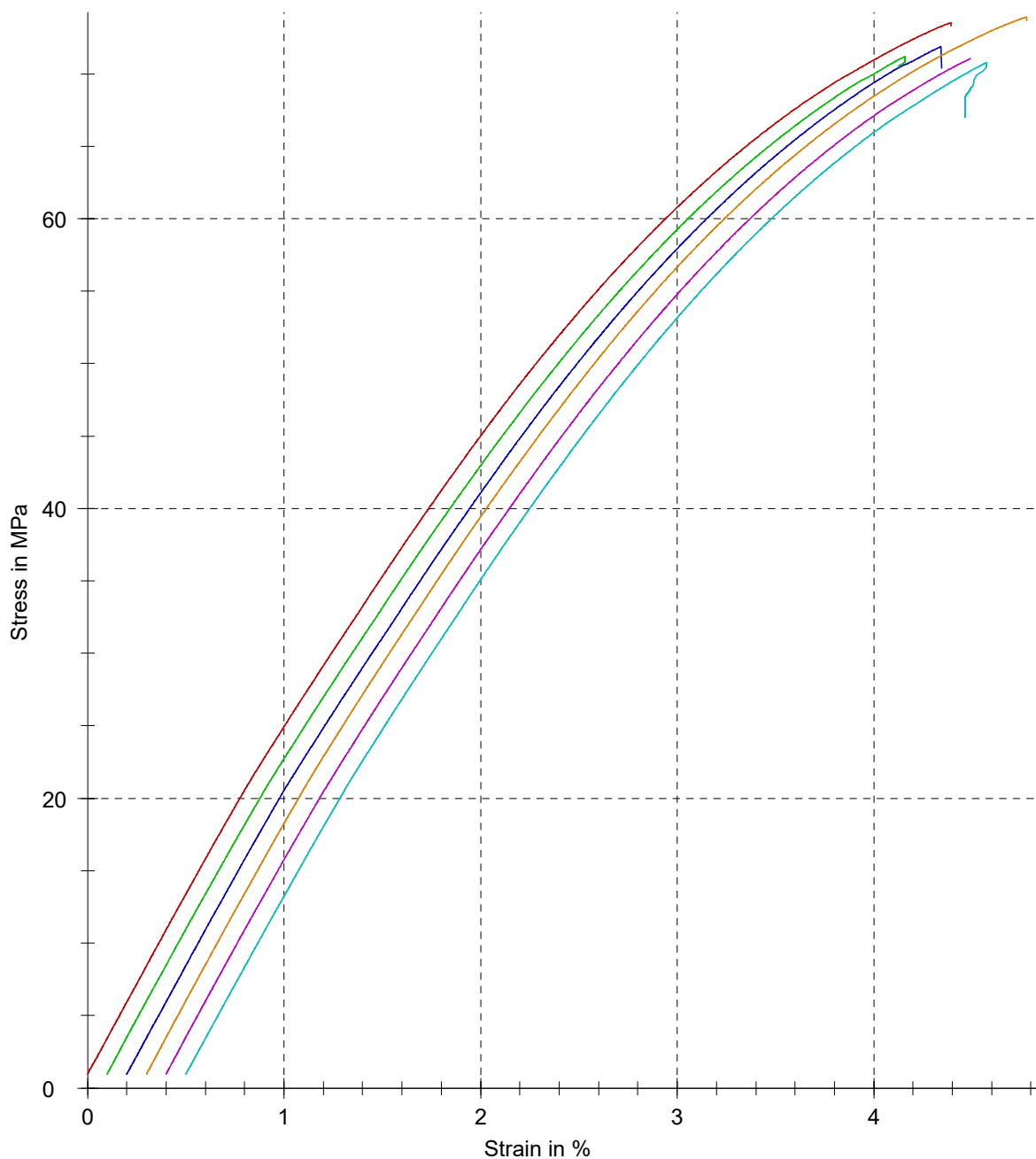
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Ultem 9085 s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°



Test report

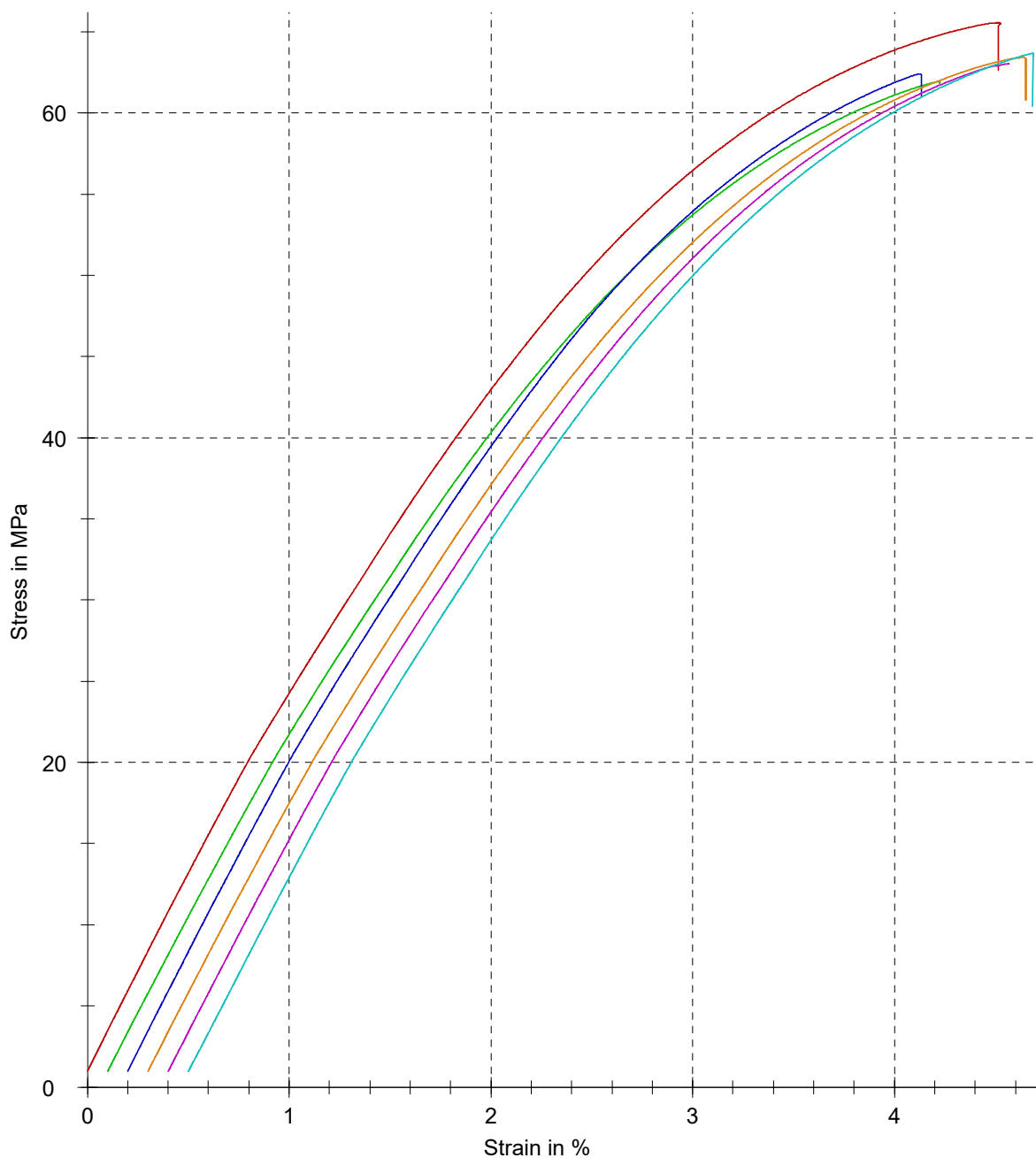
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Ultem 9085 s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/90°



Test report

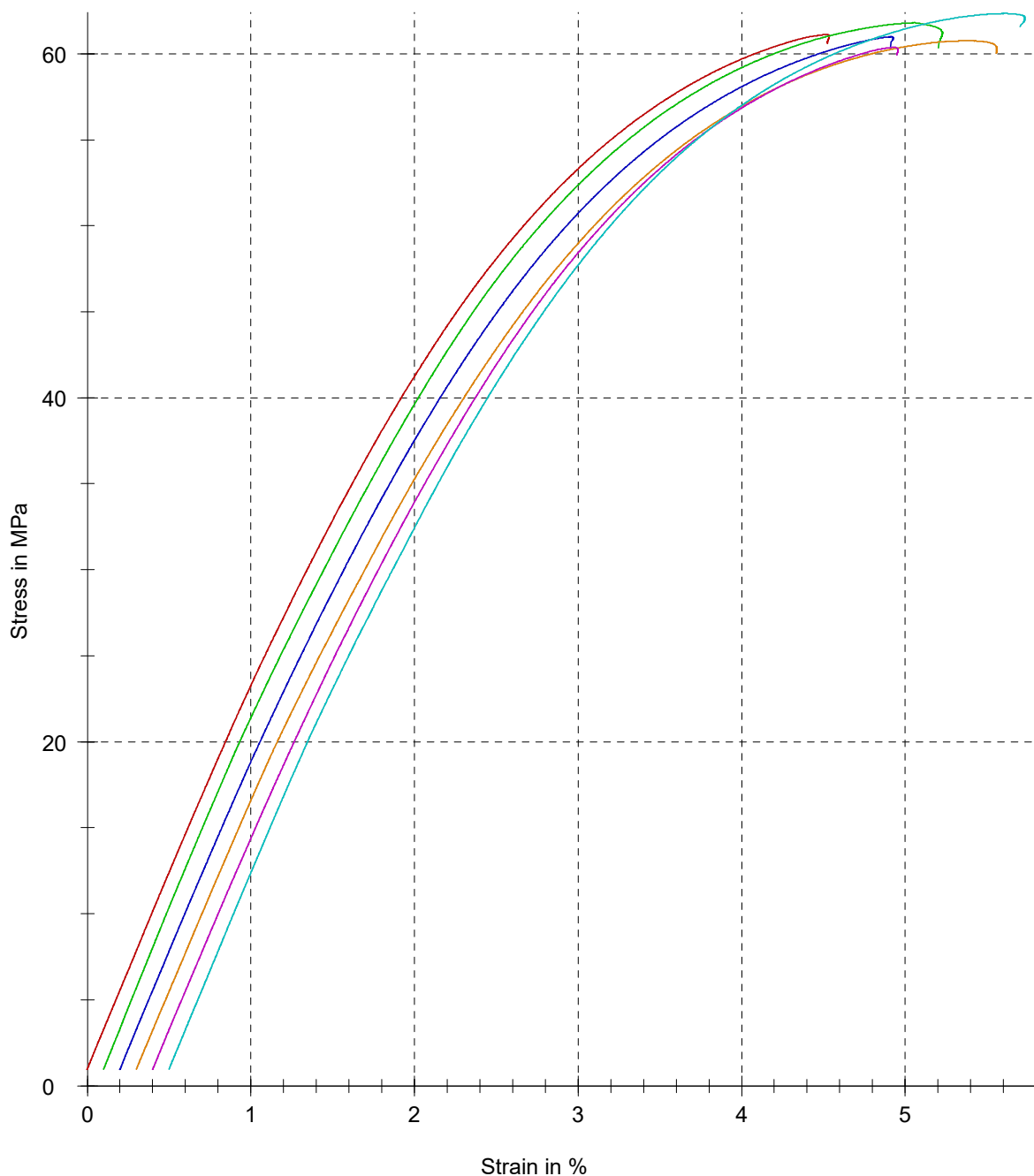
Customer : DP F. Král
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1B
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa
Speed, tensile modulus : 1 mm/min
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 111,37 mm
Gage length, standard travel : 50 mm

Series graph:



Křivky napětí/poměrná deformace zkušebních těles polymeru Ultem 9085 s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/45°/90°

Příloha C

Tab. C.1 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 178 μm , Nylon 12

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	1210	40	25	14
2	1310	41	23	14
3	1260	42	26	16
4	1230	43	27	14
5	1220	43	28	17
6	1270	43	26	14
$\bar{X} \pm s$	1250 \pm 34,16	42 \pm 1,15	25,8 \pm 1,57	14,8 \pm 1,21

Tab. C.2 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 254 μm , Nylon 12

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	1250	45	27	12
2	1250	44	26	14
3	1250	44	25	17
4	1260	45	26	15
5	1230	44	27	13
6	1260	45	27	9
$\bar{X} \pm s$	1250 \pm 10,00	44,5 \pm 0,50	26,8 \pm 0,75	13,3 \pm 2,49

Tab. C.3 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 330 μm , Nylon 12

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	1230	43	26	11
2	1220	43	25	14
3	1200	42	26	8
4	1190	42	25	13
5	1210	43	26	15
6	1220	43	25	8
$\bar{X} \pm s$	1212 \pm 13,44	42,7 \pm 0,47	25,5 \pm 0,5	11,5 \pm 2,75

Tab. C.4 Zkušební tělesa s velikostí a směrem u vrstvení 330 μm 0°, Nylon 12

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	1230	44	25	9
2	1220	44	26	10
3	1220	45	26	9
4	1240	45	27	118
5	1250	45	25	120
$\bar{X} \pm s$	1232 \pm 10,65	44,6 \pm 0,49	25,8 \pm 0,75	53,2 \pm 53,73

Tab. C.5 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/90°, Nylon 12

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	1160	42	25	9
2	1200	42	24	11
3	1180	42	25	12
4	1190	43	24	14
5	1180	42	24	11
6	1110	39	23	12
$\bar{X} \pm s$	1170 \pm 29,44	41,7 \pm 1,25	24,2 \pm 0,69	11,5 \pm 1,5

Tab. C.6 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/45°/90°, Nylon 12

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	1170	40	23	8
2	1160	40	24	10
3	1180	42	25	12
4	1190	42	25	10
5	1190	42	24	9
6	1170	42	25	8
$\bar{X} \pm s$	1177 \pm 11,06	41,3 \pm 0,94	24,3 \pm 0,75	9,5 \pm 1,38

Příloha D

Tab. D.1 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 254 μm , Ultem 9085

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	1990	54	32	6
2	1940	55	34	6
3	1930	53	31	7
4	1940	52	30	7
5	2100	53	26	7
6	1950	53	31	7
$\bar{X} \pm s$	1975 \pm 59,09	53,3 \pm 0,94	30,7 \pm 2,43	6,7 \pm 0,47

Tab. D.2 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 330 μm , Ultem 9085

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	2280	65	41	6
2	2180	61	38	6
3	2200	62	40	6
4	2240	63	38	6
5	2260	61	36	6
6	2180	62	40	6
$\bar{X} \pm s$	2223 \pm 39,02	62,3 \pm 1,37	38,8 \pm 1,67	6,0 \pm 0,00

Tab. D.3 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°, Ultem 9085

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	2500	74	42	4
2	2500	71	41	4
3	2490	72	42	4
4	2520	74	42	5
5	2500	71	41	4
6	2480	71	42	5
$\bar{X} \pm s$	2498 \pm 12,13	72,2 \pm 1,34	41,7 \pm 0,47	4,3 \pm 0,47

Tab. D.4 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/90°, Ultem 9085

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	2470	66	37	5
2	2390	62	37	4
3	2450	62	38	4
4	2410	63	37	4
5	2410	63	38	4
6	2400	64	39	4
$\bar{X} \pm s$	2422 \pm 28,53	63,3 \pm 1,37	37,6 \pm 0,75	4,2 \pm 0,37

Tab. D.5 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/45°/90°, Ultem 9085

Číslo zk. tělesa	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	ϵ_b [%]
1	2280	61	40	5
2	2360	62	36	6
3	2280	61	38	5
4	2250	61	37	5
5	2260	60	38	6
6	2280	62	38	5
$\bar{X} \pm s$	2285 \pm 35,47	61,2 \pm 0,69	37,4 \pm 1,21	5,3 \pm 0,47

Příloha E

Tab. E.1 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 178 μm bez vrubu, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	C	1,57	37,77
2	C	1,79	42,88
3	C	1,38	33,13
4	C	1,76	42,23
5	C	1,49	36,13
6	C	1,51	36,22
7	C	1,75	42,01
8	C	1,80	23,21
9	C	1,49	35,77
10	C	1,46	35,29
$\bar{X} \pm s$			36,46 \pm 5,44

Tab. E.2 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 254 μm bez vrubu, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	P	3,40	80,93
2	P	3,49	83,95
3	P	3,67	88,58
4	N	3,71	88,32
5	P	3,45	83,11
6	P	3,76	90,29
7	P	3,69	88,01
8	P	3,44	82,29
9	P	3,64	86,98
10	P	3,47	83,16
$\bar{X} \pm s$			85,56 \pm 3,06

Tab. E.3 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 330 μm bez vrubu, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	C	2,00	45,94
2	C	2,12	48,62
3	C	2,33	53,21
4	C	2,68	61,00
5	C	2,18	43,67
6	C	2,24	51,26
7	C	2,23	50,86
8	C	2,14	49,05
9	C	2,46	56,33
10	C	2,70	61,54
$\bar{X} \pm s$			52,15 \pm 5,66

Tab. E.4 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0° bez vrubu, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	N	5,31	122,13
2	N	5,17	118,82
3	N	4,97	114,45
4	N	4,66	107,16
5	N	5,00	115,36
6	N	5,22	120,66
7	N	5,00	115,17
8	N	5,58	129,66
9	N	5,35	124,07
10	N	5,46	126,84
$\bar{x} \pm s$			119,43 ± 6,33

Tab. E.5 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/90° bez vrubu, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	C	2,61	60,44
2	C	2,25	52,32
3	C	2,48	57,50
4	C	2,36	54,56
5	C	2,78	64,28
6	C	2,40	55,42
7	C	2,13	49,42
8	C	2,11	48,66
9	C	2,40	55,44
10	C	2,60	60,02
$\bar{x} \pm s$			55,8 ± 4,69

Tab. E.6 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/45°/90° bez vrubu, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	C	1,71	39,73
2	C	2,00	46,54
3	C	1,51	35,14
4	C	1,81	41,77
5	C	1,78	41,13
6	C	1,84	42,70
7	C	1,90	44,02
8	C	2,15	50,19
9	C	1,61	37,72
10	C	1,52	35,27
$\bar{x} \pm s$			41,42 ± 4,54

Tab. E.7 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 178 μm 0° s vytisknutým vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cn} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,03	0,73
2	C	0,04	0,98
3	C	0,07	1,70
4	C	0,04	0,98
5	C	0,08	1,94
6	C	0,05	1,21
7	C	0,07	1,70
8	C	0,04	0,97
9	C	0,07	1,69
10	C	0,07	1,69
$\bar{x} \pm s$			1,36 ± 0,41

Tab. E.8 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 254 μm 0° s vytisknutým vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,37	11,27
2	C	1,73	52,41
3	C	0,29	8,76
4	C	0,46	13,88
5	C	1,87	56,34
6	C	0,40	12,17
7	C	1,03	30,96
8	C	1,63	49,48
9	C	0,38	11,57
10	C	0,35	10,64
$\bar{x} \pm s$			25,75 \pm 18,68

Tab. E.9 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0° s vytisknutým vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,95	27,31
2	C	1,07	30,65
3	C	0,97	27,91
4	C	0,18	5,15
5	C	0,79	22,66
6	C	0,94	26,93
7	C	1,02	28,85
8	C	0,24	6,83
9	C	0,70	26,17
10	C	0,18	5,14
$\bar{x} \pm s$			20,76 \pm 10,05

Tab. E.10 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 178 μm s obrobeným vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,20	5,97
2	C	0,14	4,18
3	C	0,17	5,05
4	C	0,23	6,87
5	C	0,09	2,69
6	C	0,17	5,05
7	C	0,03	0,89
8	C	0,17	5,03
9	C	0,08	2,37
10	C	0,04	1,20
$\bar{x} \pm s$			3,93 \pm 1,93

Tab. E.11 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 254 μm s obrobeným vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,36	10,68
2	C	0,41	12,13
3	C	0,29	8,67
4	C	0,36	10,71
5	C	0,37	10,95
6	C	0,31	9,12
7	C	0,34	10,15
8	C	0,37	11,00
9	C	0,35	10,29
10	C	0,34	9,99
$\bar{x} \pm s$			10,37 \pm 0,93

Tab. E.12 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 330 μm s obrobeným vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,37	10,61
2	C	0,36	10,39
3	C	0,38	10,88
4	C	0,35	9,45
5	C	0,42	12,01
6	C	0,40	11,42
7	C	0,45	12,87
8	C	0,36	10,33
9	C	0,48	13,74
10	C	0,41	11,74
$\bar{x} \pm s$			11,34 \pm 1,22

Tab. E.13 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0° s obrobeným vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,64	18,40
2	C	0,75	21,49
3	C	0,84	24,07
4	C	0,73	20,95
5	C	0,65	18,64
6	C	0,73	20,93
7	C	0,73	20,89
8	C	0,71	20,30
9	C	0,63	18,09
10	C	0,64	18,37
$\bar{x} \pm s$			20,21 \pm 1,78

Tab. E.14 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/90° s obrobeným vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,28	6,49
2	C	0,26	6,02
3	C	0,43	10,05
4	C	0,27	6,25
5	C	0,33	7,66
6	C	0,37	8,56
7	C	0,46	10,75
8	C	0,39	9,09
9	C	0,26	6,02
10	C	0,27	6,25
$\bar{x} \pm s$			7,71 \pm 1,70

Tab. E.15 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/45°/90° s obrobeným vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,38	10,96
2	C	0,37	10,67
3	C	0,37	10,63
4	C	0,44	12,70
5	C	0,35	10,08
6	C	0,40	11,51
7	C	0,37	10,68
8	C	0,50	14,38
9	C	0,40	11,50
10	C	0,36	10,34
$\bar{x} \pm s$			11,35 \pm 1,24

Tab. E.16 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 178 μm 0° s obrobeným vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,23	5,58
2	C	0,23	5,61
3	C	0,26	6,36
4	C	0,25	6,10
5	C	0,20	4,87
6	C	0,26	6,33
7	C	0,26	6,34
8	C	0,29	7,05
9	C	0,27	6,57
10	C	0,19	4,64
$\bar{x} \pm s$			5,95 \pm 0,72

Tab. E.17 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 254 μm 0° s obrobeným vrubem, Nylon 12

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,31	9,36
2	C	0,29	8,77
3	C	0,35	10,52
4	C	0,35	10,58
5	C	0,38	11,45
6	C	0,34	10,27
7	C	0,33	9,99
8	C	0,39	11,75
9	C	0,34	10,29
10	C	0,31	9,37
$\bar{x} \pm s$			10,24 \pm 0,88

Příloha F

Tab. F.1 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 254 μm bez vrubu, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	C	2,21	52,67
2	C	2,09	50,10
3	C	2,10	50,43
4	C	1,83	43,77
5	C	2,13	51,04
6	C	1,82	43,39
7	C	2,21	53,02
8	C	2,11	50,59
9	C	2,26	54,23
10	C	2,16	51,91
$\bar{x} \pm s$			50,12 \pm 3,49

Tab. F.2 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 330 μm bez vrubu, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	C	1,01	23,57
2	C	1,06	24,45
3	C	1,06	24,47
4	C	0,92	21,26
5	C	1,09	25,35
6	C	1,08	25,09
7	C	1,23	28,58
8	C	1,06	24,67
9	C	1,08	25,07
10	C	1,14	26,44
$\bar{x} \pm s$			24,90 \pm 1,78

Tab. F.3 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0° bez vrubu, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	N	9,39	219,11
2	C	8,01	187,22
3	N	9,32	218,79
4	N	9,69	228,11
5	N	8,45	198,16
6	N	9,72	227,84
7	N	8,66	203,52
8	N	10,11	236,57
9	N	9,78	230,01
10	N	8,73	204,72
$\bar{x} \pm s$			215,41 \pm 15,33

Tab. F.4 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/90° bez vrubu, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	C	4,63	108,54
2	C	1,46	34,30
3	C	1,36	31,90
4	C	1,26	29,69
5	C	1,41	33,12
6	C	1,49	35,01
7	C	1,31	30,81
8	C	1,41	33,12
9	C	1,32	30,84
10	C	1,27	29,88
$\bar{x} \pm s$			39,72 ± 23

Tab. F.5 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/45°/90° bez vrubu, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cu} [kJ·m ⁻²]
1	C	1,23	28,93
2	C	1,13	26,59
3	C	1,24	29,13
4	C	1,11	26,09
5	C	1,27	29,92
6	C	1,34	31,61
7	C	1,25	29,50
8	C	1,27	29,81
9	C	1,14	26,85
10	C	1,44	33,89
$\bar{x} \pm s$			29,23 ± 2,26

Tab. F.6 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 254 μm 0° s vytisknutým vrubem, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	P	0,07	2,07
2	P	0,08	2,37
3	P	0,12	3,57
4	P	0,11	3,27
5	P	0,10	2,98
6	P	0,12	3,55
7	P	0,11	3,27
8	P	0,12	3,57
9	P	0,12	3,56
10	P	0,07	2,09
$\bar{x} \pm s$			3,03 ± 0,59

Tab. F.7 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0° s vytisknutým vrubem, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	1,65	49,59
2	C	1,50	44,91
3	C	1,89	56,71
4	C	1,66	49,83
5	C	1,13	33,99
6	C	1,19	35,86
7	C	1,38	41,39
8	C	1,93	57,78
9	C	1,71	50,99
10	C	1,65	49,42
$\bar{x} \pm s$			47,05 ± 7,59

Tab. F.8 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 254 μm s obrobeným vrubem, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,13	3,87
2	C	0,17	5,09
3	C	0,12	3,62
4	C	0,11	3,27
5	C	0,12	3,60
6	C	1,12	33,35
7	C	0,11	3,28
8	C	0,11	3,28
9	C	0,15	4,49
10	C	0,13	3,89
$\bar{x} \pm s$			6,77 \pm 8,88

Tab. F.9 Zkušební tělesa s velikostí vrstvení 330 μm s obrobeným vrubem, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,19	5,44
2	C	0,22	6,32
3	C	0,21	6,00
4	C	0,22	6,26
5	C	0,22	6,27
6	C	0,14	4,00
7	C	0,20	5,72
8	C	0,20	5,69
9	C	0,21	6,08
10	C	0,23	6,57
$\bar{x} \pm s$			5,84 \pm 0,69

Tab. F.10 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 254 μm 0° s obrobeným vrubem, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	P	1,33	32,22
2	P	3,45	83,83
3	P	2,92	71,04
4	P	3,09	74,77
5	P	2,39	57,79
6	P	2,56	61,64
7	P	2,12	51,28
8	P	3,11	75,51
9	P	2,28	55,37
10	P	2,38	57,93
$\bar{x} \pm s$			62,14 \pm 14,08

Tab. F.11 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0° s obrobeným vrubem, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	P	4,21	98,45
2	C	0,12	2,82
3	C	0,23	5,39
4	C	0,30	6,96
5	C	0,13	3,04
6	C	0,12	2,80
7	C	0,19	4,45
8	C	0,21	4,91
9	P	4,29	99,98
10	P	5,71	133,61
$\bar{x} \pm s$			36,24 \pm 49,55

Tab. F.12 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/90° s obrobeným vrubem, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,20	4,69
2	C	0,14	3,28
3	C	0,13	3,02
4	C	0,13	3,05
5	C	0,12	2,81
6	C	0,13	3,04
7	C	0,13	3,04
8	C	0,13	3,05
9	C	0,13	3,05
10	C	0,12	2,81
$\bar{X} \pm s$			3,18 \pm 0,52

Tab. F.13 Zkušební tělesa s velikostí a směrem vrstvení 330 μm 0°/45°/90° s obrobeným vrubem, Ultem 9085

Číslo zk. Tělesa	Typ lomu	Korigovaná energie E_c [J]	Rázová houževnatost a_{cN} [kJ·m ⁻²]
1	C	0,12	2,83
2	C	0,12	2,81
3	C	0,12	2,81
4	C	0,11	2,57
5	C	0,11	2,58
6	C	0,14	3,29
7	C	0,12	2,81
8	C	0,13	3,05
9	C	0,13	3,02
10	C	0,11	2,57
$\bar{X} \pm s$			2,83 \pm 0,22