

Vliv struktury na mechanické chování vstřikovaných plošných prvků

Bc. Pavel Horák

Diplomová práce
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel HORÁK**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vliv struktury na mechanické chování vstříkovaných plošných prvků**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Výroba zkušebních vzorků na školním vstříkovacím stroji
3. Studium mechanického chování krátkovláknových produktů
4. Vyhodnocení experimentálně získaných dat

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**

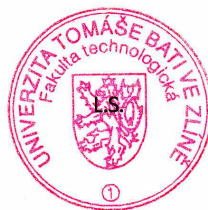
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2009**

Ve Zlíně dne 12. února 2009


doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vlivem orientace vláken kompozitních materiálů na mechanické vlastnosti. Teoretická část popisuje kompozitní materiály, zkoušky mechanických vlastností a technologii vstřikování. Praktická část je zaměřena na měření mechanických vlastností ve směru vláken a ve směru kolmém na směr vláken.

Klíčová slova: krátkovláknové kompozity, orientace vláken, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the influence of fibre orientation of composite materials on their mechanical properties. The theoretical part describes composite materials, test methods for mechanical properties and injection technology. The practical part is oriented on measurement of mechanical properties in fibre direction and in perpendicular direction to fibre direction.

Keywords: short-fibre composites, fibre orientation, mechanical properties

Rád bych poděkoval Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a obětavý přístup při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. a Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc při vypracování praktické části.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem citoval(a). V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden(a) jako spoluautor(ka).

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 9 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 10 |
| 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY | 11 |
| 1.1 VLASTNOSTI KOMPOZITŮ | 12 |
| 1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ | 14 |
| 1.2.1 Partikulové kompozity | 14 |
| 1.2.2 Vláknové kompozity | 15 |
| 1.2.3 Struktuované kompozity | 17 |
| 2 TERMOPLASTY PLNĚNÉ KRÁTKÝMI VLÁKNY | 19 |
| 2.1 TERMOPLASTICKÁ MATRICE | 19 |
| 2.1.1 Polypropylen (PP) | 20 |
| 2.2 KRÁTKÁ VLÁKNA | 20 |
| 2.2.1 Skleněná vlákna..... | 21 |
| 2.3 ROZHRANÍ MEZI MATRICÍ A VLÁKNEM | 22 |
| 2.4 ORIENTACE VLÁKEN VLIVEM TOKU TAVENINY | 23 |
| 3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ | 27 |
| 3.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ | 27 |
| 3.2 DRUHY ZKOUŠEK MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ | 28 |
| 3.3 ZKOUŠKA TAHEM | 28 |
| 3.4 ZKOUŠKA OHYBEM | 35 |
| 4 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ | 39 |
| 4.1 POPIS VSTŘIKOVACÍHO CYKLU..... | 39 |
| 4.2 VTOKOVÝ SYSTÉM..... | 40 |
| 4.2.1 Horký vtokový systém..... | 41 |
| 4.2.2 Studený vtokový systém..... | 41 |
| 4.2.3 Vtoková ústí | 41 |
| 4.3 ŘEŠENÍ UMÍSTĚNÍ VTOKOVÉHO ÚSTÍ | 42 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 44 |
| 5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE | 45 |
| 6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ | 46 |
| 6.1 MATERIÁL VZORKŮ | 46 |
| 6.2 VSTŘIKOVÁNÍ VZORKŮ – TYPY VTOKOVÝCH ÚSTÍ..... | 46 |
| 6.3 ZKUŠEBNÍ VZORKY | 46 |
| 6.3.1 Kruhové destičky..... | 46 |
| 6.3.2 Zkušební tyčinky | 47 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 6.4 | VSTŘIKOVACÍ STROJ | 47 |
| 6.5 | VSTŘIKOVACÍ FORMA | 48 |
| 6.6 | TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY VSTŘIKOVÁNÍ..... | 49 |
| 7 | ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ..... | 50 |
| 7.1 | 2D ZKOUŠKA KRUHOVÉ DESKY | 51 |
| 7.1.1 | Princip | 51 |
| 7.1.2 | Výsledky měření..... | 51 |
| 7.1.3 | Závěr..... | 53 |
| 7.2 | TŘÍBODOVÝ OHYB | 53 |
| 7.2.1 | Princip | 53 |
| 7.2.2 | Výsledky měření..... | 54 |
| 7.2.3 | Závěr..... | 55 |
| 7.3 | TAHOVÁ ZKOUŠKA | 56 |
| 7.3.1 | Princip | 56 |
| 7.3.2 | Výsledky měření..... | 57 |
| 7.3.3 | Závěr..... | 58 |
| 7.4 | ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI | 59 |
| 7.4.1 | Princip | 59 |
| 7.4.2 | Výsledky měření..... | 60 |
| 7.4.3 | Závěr..... | 62 |
| 8 | VÝPOČET POISSONOVA ČÍSLA..... | 64 |
| 8.1 | PRINCIP BIAXIÁLNÍHO OHYBOVÉHO TESTU..... | 64 |
| 8.2 | VÝPOČET POISSONOVA ČÍSLA PRO PP | 67 |
| 8.3 | VÝPOČET POISSONOVA ČÍSLA PRO PP 30% GF | 69 |
| 8.4 | ZÁVĚR..... | 70 |
| 9 | TOKOVÉ ANALÝZY VSTŘIKOVACÍ FORMY | 71 |
| 9.1 | DOBA PLNĚNÍ | 71 |
| 9.2 | ORIENTACE VLÁKEN | 72 |
| 9.2.1 | Kuželové vtokové ústí..... | 72 |
| 9.2.2 | Filmové vtokové ústí..... | 73 |
| 9.2.3 | Bodové vtokové ústí..... | 74 |
| 9.3 | TLAK VE VSTŘIKOVACÍ FORMĚ | 75 |
| 9.4 | STUDENÉ SPOJE | 76 |
| 9.5 | ZÁVĚR..... | 77 |
| 10 | ZKOUMÁNÍ STRUKTURY | 78 |
| 10.1 | MIKROSKOPICKÁ ZKOUŠKA | 78 |
| 10.2 | PREDIKCE CHOVÁNÍ STRUKTUR NA ZÁKLADĚ STRUKTURNÍCH MODELŮ | 79 |
| 10.2.1 | Modul pružnosti v tahu | 79 |
| 10.2.2 | Modul pružnosti v ohybu | 82 |
| 10.2.3 | Závěr..... | 84 |

| | |
|---|-----------|
| ZÁVĚR | 85 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 86 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 88 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 89 |
| SEZNAM TABULEK..... | 92 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 93 |

ÚVOD

Během vývoje lidské společnosti si člověk osvojil používání nejrůznějších druhů materiálů jako kámen, bronz, dřevo nebo keramiku. Podle nejpoužívanějších materiálů byly i pojmenovány vývojové epochy lidstva, a to doba kamenná, bronzová či železná. Umění vyrábět a používat nové materiály vždy posunulo úroveň techniky na vyšší stupeň. Ani v současné době si nelze představit další pokrok v technice, medicíně nebo informatice bez nových materiálů. Nové materiály otevírají člověku nové možnosti a posouvají bariéry jeho vývoje kupředu.

V současné době je k dispozici přes 15 tisíc různých materiálů nabízených ve stovkách modifikacích. Žádný z nich se však nerozvíjí tak dynamicky jako polymery a kompozity na jejich bázi. Tyto polymerní materiály se obecně dělí na dvě skupiny, plasty a eleastomery. Plasty se vyznačují širokou škálou použití od obalů, přes výrobky pro domácnost, hygienické výrobky, zdravotnické pomůcky až ke konstrukčním prvkům v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu. Nevýhodou plastů je hranice jejich použití v konstrukčních aplikacích především v důsledku limitující tuhosti, pevnosti a tepelné odolnosti. Jestliže však do pryskyřice či plastu přidáme výztuž ve formě vláken, která mají vysokou tuhost, pevnost a teplotní stabilitu, získáme zcela novou, unikátní skupinu materiálů nazývanou vláknové kompozity.

Kompozitní materiály se vyznačují řadou výhodných vlastností jakými jsou např. nízká hustota a široký interval pevností. Velkou předností je i odolnost proti korozi, odolnost proti opotřebení, minimální tepelná vodivost a elektroizolační schopnosti. Kromě výhod je třeba také zmínit případné nevýhody. Mnohdy se nejedná o nevýhodu, ale pouze o významnou odlišnost od tradičních materiálů, která způsobuje komplikaci při konstruování. Mezi takové „nevýhody“ lze třeba zařadit výrobu kompozitních materiálů v jednom kroku s konečným produktem. Zde je pak těžké od sebe oddělit vlastnosti materiálu od užitných vlastností výrobku. Na rozdíl u konstrukčních ocelí je to velmi snadné, což zjednodušuje optimalizaci a spolehlivost konstrukčních postupů. Z tohoto důvodu existuje velmi omezená databáze konstrukčních dat pro kompozity.

Tato diplomová práce se zabývá vlivem směru orientace vláken kompozitních materiálů na mechanické vlastnosti jako pevnost, tuhost nebo vrubovou houževnatost.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity jsou materiály, které jsou tvořeny dvěma nebo více materiálovými složkami. Abychom ale mohli hovořit o kompozitech, je třeba, aby složky vytvářející kompozitní materiál měly výrazně odlišné fyzikálně-mechanické vlastnosti od složeného materiálu a aby mezi nimi byly zřetelné hranice.

Podle této definice, nemůžeme mezi kompozity počítat běžné kovy, které při výrobě získaly znečišťující, popřípadě legující prvky. V kovech totiž mají jednotlivé složky téměř stejné fyzikálně-mechanické vlastnosti, nemají obvykle vláknový charakter a navíc množství nečistot a legujících prvků je vůči základní složce zanedbatelně malé. Modul pružnosti slitinové oceli je necitlivý k množství přítomného karbidu a proto kovovou slitinu běžně nepovažujeme za kompozit, zvláště ne z hlediska analýzy. Stejně tak, mezi kompozitní materiály není možné zařadit plasty, které obecně obsahují malá množství plniv, apertur, pohlcovačů ultrafialového záření a jiných materiálů usnadňujících výrobní proces. Malé množství těchto přísad ale nijak výrazně neovlivní mechanické vlastnosti plastů.

Na druhou stranu mezi kompozity patří perlitická ocel, která má mikrostrukturu tvořenou vrstvou feritu a cementitu. Feritová fáze je měkká a tažná, kdežto cementit je velmi tvrdý a křehký. Výsledné vlastnosti perlitické oceli jsou diametrálně odlišné od vlastností příslušející jednotlivým fázím.

Kompozitní materiály můžeme také najít v přírodě. Nejběžnějším přírodním kompozitem je dřevo skládající se ze silných a pružných celulózových vláken, které jsou obklopeny lininem sloužícím jako pojivo. [1]



Obr. 1. Příklady kompozitních výrobků

1.1 Vlastnosti kompozitů

Mnoho současných průmyslových odvětví požaduje materiály s neobvyklými kombinacemi vlastností, které nejsme schopni uspokojit konvenčními slitinami kovů, keramickými materiály ani polymerními látkami. Jako jedna z možných cest se jeví využívání kompozitních materiálů.

Většina kompozitů je tvořena jednou nebo více nespojitými fázemi, ponořených do spojitě složky. Spojitá fáze, jejíž hlavní vlastností je pojit k sobě jednotlivé části nespojitě fáze, se označuje jako matrice. Diskontinuitní fáze, která je nosnou částí kompozitu, se nazývá vyztužením nebo vyztužovacím materiálem a je obvykle pevnější a tvrdší.

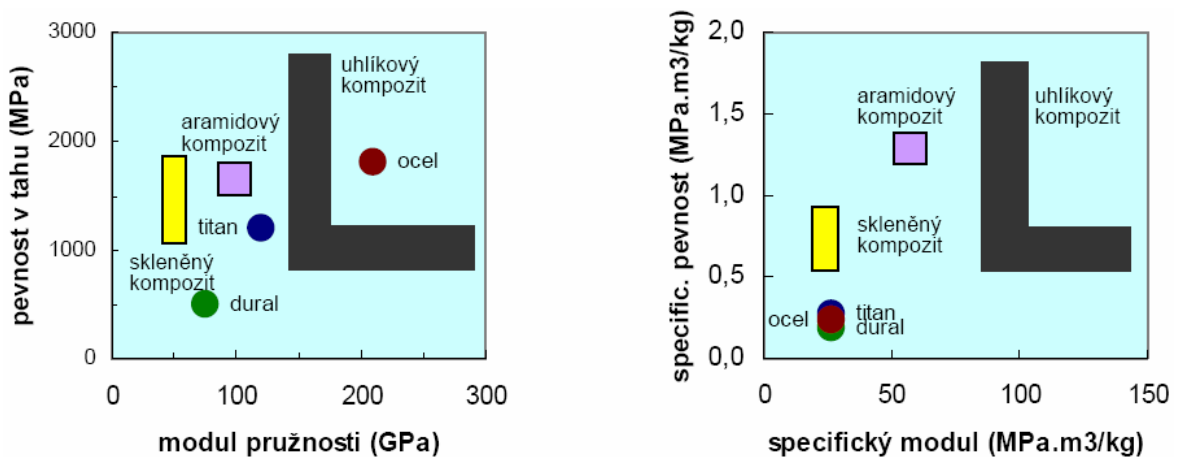
Rozhodující vliv na výsledné vlastnosti kompozitů má několik faktorů. Vlastnosti kompozitů jsou samozřejmě silně ovlivněny vlastnostmi jednotlivých složek tvořících kompozit. Výsledné vlastnosti mohou být ovšem dány nejenom prostým součtem vlastností jednotlivých fází, ale také v případě vzájemného synergetického působení složek můžeme získat vlastnosti natolik specifické, že je nemůžeme považovat jako prostý součet vlastností fází. Proto je k popisu charakteristik kompozitů jako materiálového systému potřeba vedle specifikace materiálu jednotlivých složek a jejich vlastností, uvažovat také geometrii vyztužení. Do popisu geometrie vyztužení je třeba zahrnout tvar, velikost, popřípadě způsob vrstvení. Máme-li shodnou geometrii vyztužení, nejsou ještě zaručeny shodné vlastnosti, neboť se musíme ještě zabývat také vlivem koncentrace, koncentrační distribuce a orientace.

Významný vliv na vlastnosti kompozitu má tvar částic nespojitě fáze, které můžeme často pro jednoduchost uvažovat jako koule. Texturou materiálu rozumíme rozložení částic spolu s jejich velikostí a distribucí rozložení. Tvar částic významně ovlivňuje, spolu s objemovým podílem složek, mezifázový povrch, který je rozhodujícím faktorem při určení vzájemného působení mezi vyztuží a maticí.

Pro stanovení vlastností kompozitu je velmi důležitá koncentrace složek a homogenita materiálu. Koncentrace je obecně považována za jediný nejdůležitější parametr ovlivňující vlastnosti celého kompozitu. Homogenita je důležitou charakteristikou, která určuje rozsah, ve kterém se může reprezentativní objem lišit ve fyzikálních a mechanických vlastnostech od průměrných vlastností jeho složek. Nezaručení homogenity materiálu představuje velké nebezpečí vzniku křehkého lomu.

Nejvýznamnější charakteristikou kompozitů je možnost řídit jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti pomocí vhodné volby orientace vyztužovacích částic. S tím ovšem blízce souvisí pojem anizotropie materiálu. Je-li tvar částic a jejich rozměry ve všech směrech přibližně stejné a jejich rozložení v matrici je homogenní, chová se kompozit jako izotropní materiál, který má ve všech směrech v daném místě totožné vlastnosti. Totéž platí v případě, že rozměry částic vyztužovací fáze jsou nestejně a jejich uspořádání v pojivu je náhodné. V případě, že bude převládat jistý směr v orientaci částic, můžeme dosáhnout silně anizotropních vlastností. Anizotropie může vést k nebezpečí vzniku lomu, působíme-li ve směru "nejslabších" fyzikálně-mechanických vlastností, ale především umožňuje vytvářet velmi lehké, ale za to extrémně pevné konstrukce, které dokáží odolávat vysokým namáháním ve směru nejlepších mechanických vlastností. Tato přednost kompozitů vede k jejich častému využívání v leteckém průmyslu a kosmickém vývoji. [1]

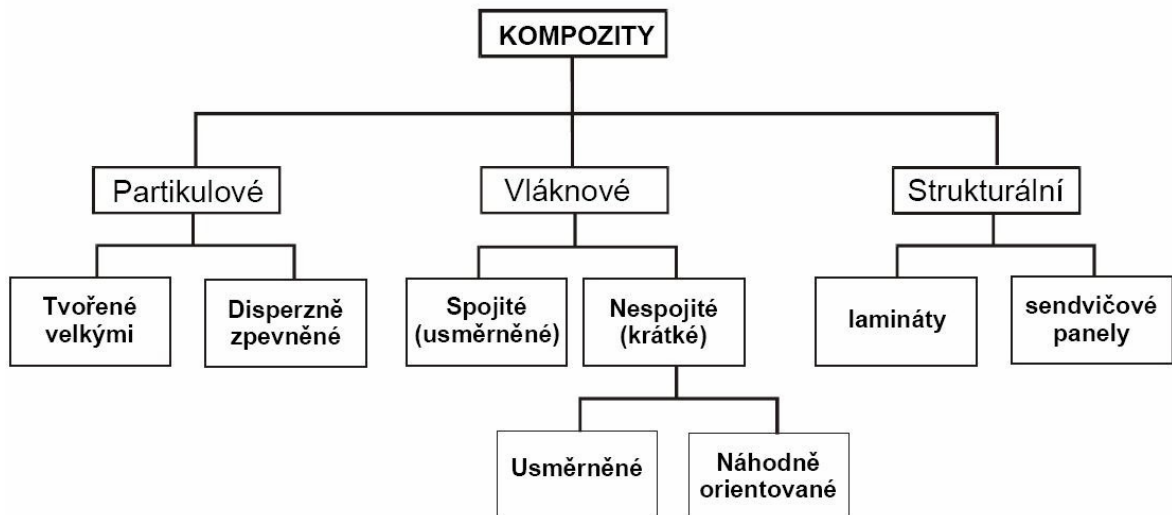
Obrázky ukazují vztah mezi pevností a tuhostí (modulem pružnosti) u tradičních kovových materiálů a kompozitů. Oblasti vlastností kompozitů jsou vzhledem ke kovům širší protože lze kombinovat vlákna o různých vlastnostech, např. u uhlíkových kompozitů lze dle potřeby použít buď vlákna o vysokém modulem pružnosti (High Modulus) nebo vlákna s vysokou pevností (High Tension), resp. jejich kombinaci. [9]



Obr. 2. Porovnání mechanických vlastností kovových a kompozitních materiálů

1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Na obrázku 3 je uvedeno jedno z možných rozdělení kompozitů. Hlavní členění je na partikulové, vláknové a strukturální kompozity. Navíc každá z těchto větví obsahuje nejméně dvě další podskupiny specifikující velikost částic a jejich uspořádání, popřípadě jejich orientaci a vrstvení. [1]



Obr. 3. Rozdělení kompozitních materiálů

1.2.1 Partikulové kompozity

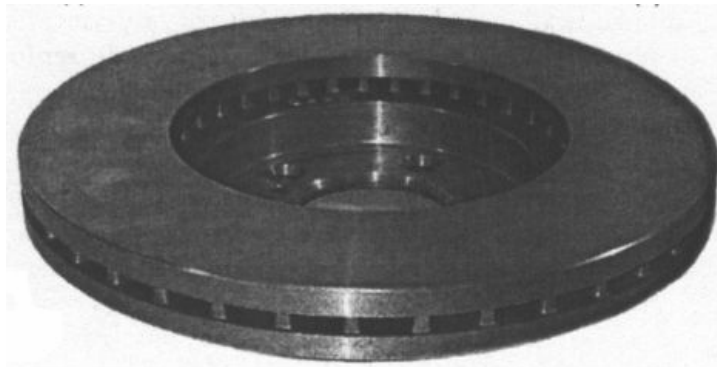
Jak je vidět z obrázku 3, mezi partikulové (částicové) kompozity patří kompozity s velkými částicemi a tzv. disperzně zpevněné kompozity. Rozdíl mezi nimi je dán mechanismem jejich zpevnění a vyztužení. Pojem velké částice určuje, že interakce mezi částicemi a maticí není jen na úrovni atomové nebo molekulové, ale je třeba uvažovat vzájemné působení a vliv hranic částic. Většina těchto kompozitů má částicovou fázi tvrdší a pevnější než matici. Zpevnění vede k omezení pohybu pojivové fáze v okolí každé částice. V tomto smyslu, matrice převádí část namáhání na částice, které tak představují nosnou část materiálu. Stupeň zpevnění, vedoucí ke zdokonalení fyzikálně-mechanických vlastností, je závislý na interakci a kvalitě vazby mezi částicemi a maticí.

Nejvýznamnějším partikulovým kompozitem s velkými částicemi je beton, jehož matrice představuje cement a nosná fáze je dána částicemi písku a šterku. Částice mají různorodou geometrii, ale měly by mít přibližně stejné rozměry ve všech směrech. Pro zvýšení zpevnění by měly být částice menší a rovnoměrněji rozloženy v maticí. Navíc je třeba si

uvědomit, že mechanické vlastnosti jsou významně ovlivněny velikostí rozhraní a kvalitou vazeb mezi nosnou částí a pojivem.

Pro disperzně zpevněné kompozity jsou částice obecně mnohem menší, o velikosti 10 až 100 nm. Zde ale hraje rozhodující roli interakce mezi částicemi a matricí na atomové a molekulární úrovni. Kovy a kovové slitiny mohou být obecně zpevněny kovovou a nekovovou fází, která interaguje s okolní matricí. Mechanismus zpevnění je založen na vzájemném působení částic na pohyb dislokací uvnitř pojiva. Využití těchto kompozitních materiálů je možné také v elektrotechnice, kde se používají například kompozity s částicemi wolframu, nebo molybdenu a jejich karbidů ve stříbrných a měděných matricích.

[1]

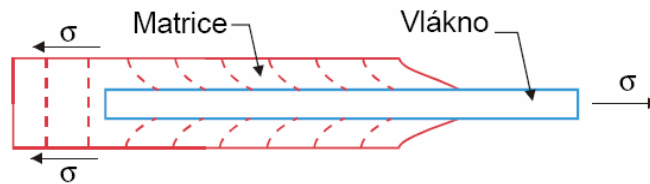


Obr. 4. Brzdový disk (Al + SiC)

1.2.2 Vláknové kompozity

Z technologického pohledu jsou nejdůležitější kompozity takové, které mají svoji vyztužovací fázi tvořenu vlákny. Obecně je pevnost materiálu velmi ovlivněna nedokonalostmi a vadami materiálu. Možnou cestou vedoucí ke zpevnění je odstranění těchto vad. Pevnost kompaktních materiálů snižují především trhlinky ve směru kolmém k namáhání. Ukazuje se, že pevnost spojitého materiálu (např. plastu) je výrazně menší než materiálu tvořeného vlákny, je-li zatěžování ve směru vláken. Je to dáno tím, že velké nečistoty, které mohou být přítomny v kompaktním materiálu jsou minimalizovány v důsledku malých průřezových rozměrů vlákna. Zde ale nastává problém využití těchto vláken v technických aplikacích. Proto je třeba vkládat vlákna do matricového materiálu a tím vytvářet tzv. vláknové kompozity.

Matrice spojuje vlákna dohromady a slouží především k přenosu namáhání do vláken (viz obr. 5).

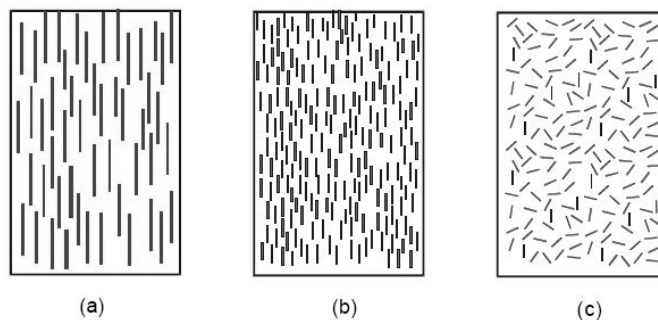


Obr. 5. Vláknové kompozity

Vyztužovací vlákna mohou být ve vláknovém kompozitu krátká (viz obr. 6b) nebo dlouhá (viz obr. 6a) vzhledem k rozměrům jejich průřezů. Kompozity s dlouhými vlákny jsou označovány jako **dlouhovláknové** (vyztužené spojitými vlákny) a kompozity s krátkými vlákny jako **krátkovláknové** (vyztužené diskretními vlákny).

Jako krátkovláknové kompozity uvažujeme takové materiály, ve kterých délka vlákna ovlivňuje jejich vlastnosti. V kompozitech vyztužených spojitými vlákny, lze předpokládat, že břemeno působí přímo na vlákna a že vlákna ve směru namáhání jsou hlavní nosnou složkou. V tomto případě, ale matrice ztrácí nosnou vlastnost a zůstává jí pouze vlastnost pojit vlákna k sobě a chránit je.

Pro krátkovláknové kompozity musíme brát v úvahu uspořádání a orientaci vláken. Ve většině případů, se pro tyto kompozitní materiály předpokládá, že vlákna jsou v kompozitu nahodile uspořádána (viz obr. 6c). Tím se zaručí izotropnost kompozitní desky. To znamená, že vlastnosti krátkovláknového kompozitu s nahodilou strukturou nejsou závislé po tloušťce desky na směru. Použitím specifických výrobních postupů, můžeme ale dosáhnout jisté směrové orientace krátkých vláken, kde jeden ze směrů významně převládá nad ostatními. Získáme tak kompozitní materiál s anizotropními vlastnostmi. [1]

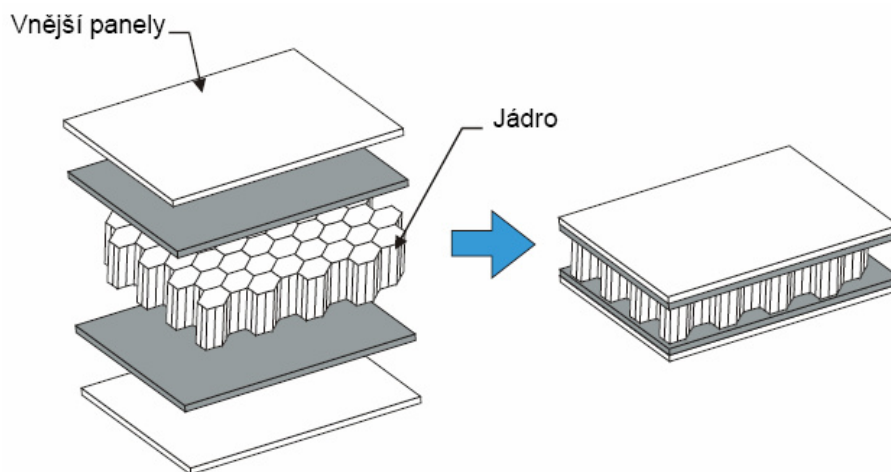


Obr. 6. Typy vláknových kompozitů

1.2.3 Strukturované kompozity

Strukturované kompozity jsou obvykle tvořeny jak homogenním tak kompozitním materiálem. Vlastnosti výsledného materiálu závisí nejenom na vlastnostech jednotlivých složek, ze kterých se materiál skládá, ale také na geometrickém uspořádání a na výsledné struktuře kompozitu. Mezi nejběžnější strukturované kompozity patří především lamináty a sendvičové panely.

Sendvičové panely jsou strukturované kompozity složené ze dvou silných vnějších plátů, které jsou oddělené vrstvou materiálu o nízké hustotě a nízké pevnosti. Vnější pláty přenášejí tahová a smyková napětí. Nejčastěji jsou používány hliníkové slitiny, kompozitní desky, oceli nebo také například překližka. Vnitřní vyplňující vlákno má dvě důležité funkce. Za prvé, odděluje vnější povrchy a brání deformacím ve směrech kolmých k vnějším plátům. Za druhé, zajišťuje určitý stupeň zpevnění podél rovin, které jsou vůči vnějším plátům kolmé. Pro jádra se používají například polymerní materiály, syntetické gumy nebo balsové dřevo. Jádro také může mít tvar včelích pláství, tedy hexagonálních buněk navzájem spojených do jediného celku. V tomto případě může být materiál jádra totožný s materiálem zbývající části. Sendvičové kompozity mají významné využití především ve stavebnictví, pro výrobu střech, podlah, nebo zdí, ale také v leteckém průmyslu pro výrobu křídel a trupů.

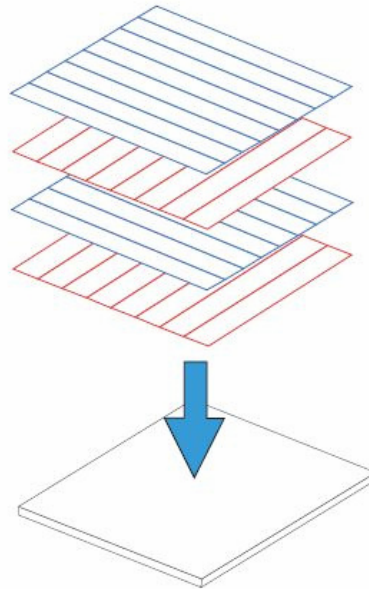


Obr. 7. Sendvičové panely

Laminátové kompozity jsou složené ze dvoudimenzionálních plátů dlouhovláknových kompozitů. U každého z nich převládá určitý směr, ve kterém jsou mechanické vlastnosti

nejlepší. Jednotlivé desky jsou vzájemně spojeny pojivem a to tak, aby orientace převládajících pevnostních směrů byla pro jednotlivé vrstvy rozdílná.

Laminátové kompozity mají relativně vysoké pevnosti v několika specifických směrech. Tyto pevnosti jsou v daném směru samozřejmě nižší než pevnosti v případě, že by všechna vlákna měla směr namáhání.



Obr. 8. Laminátové kompozity

Lamináty jsou vyráběny tak, aby se chovaly jako nevrstevnaté materiály. Jednotlivé vrstvy nazýváme laminami a spoje těchto lamin považujeme za dokonalé, smykově nedeformovatelné a nekonečně tenké. Vrstvy se nemohou po sobě navzájem posouvat a posuvy předpokládáme v příčném směru za spojitě. [1]

2 TERMOPLASTY PLNĚNÉ KRÁTKÝMI VLÁKNY

Polymerní materiály při plnění krátkými vlákny a při použití termoplastické matrice umožňují velmi produktivní technologií (vstřikování, vytlačování) vyrobit díly, jejichž hodnoty pevnosti v tahu σ_t dosahují až 260 MPa a hodnoty modulu pružnosti v tahu E až 30 GPa. [3]

2.1 Termoplastická matrice

Úlohou matrice je vzájemně spojovat vyztužující fázi a přenášet do ní zatížení. Matrice také chrání výztuž před vlivy okolí. Měla by mít proto dobré mechanické vlastnosti, adhezi k výztuži, dobrou odolnost proti okolnímu prostředí a měla by být houževnatá. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách výztuže a její poměrné prodloužení při přetržení by mělo být větší než mezní prodloužení výztuže. Tento požadavek splňují pouze polymerní a kovové matrice. Polymerní matrice jsou nejdostupnější a rozdělují se na termoplastické a reaktoplastické.

Termoplastická matrice může být opakovaně přetvářena, protože její strukturu tvoří dlouhé lineární řetězce spojené mezimolekulárními silami a fyzikálním zapletením řetězců. Reaktoplastickou maticí tvoří většinou viskózní tekutiny s relativně malými molekulami, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Protože dochází ke vzniku chemických vazeb a třídimenzionální polymerní sítě, neumožňují reaktoplasty další přetváření.

Termoplast je většinou houževnatější než reaktoplast, mez kluzu (případně pevnost) při teplotě 20 °C je ale také menší než 100 MPa a modul pružnosti se pohybuje od 2 do 4 GPa. Maximální pracovní teplota závisí na nadmolekulární struktuře termoplastu - u amorfních polymerních materiálů je v průměru o 50 °C menší než teplota skelného přechodu T_g , u semikrystalických termoplastů je o 50 až 100 °C menší než teplota tání krystalů T_m . Ačkoliv jsou reaktoplasty při výrobě stále dominantní, použití termoplastické matrice stále vzrůstá.

Polotovary s termoplastickou maticí umožňují velmi produktivní výrobu dílů, protože doba výrobního cyklu je kratší než při použití reaktoplastických matic, které je nutno tvrdit. Termoplastickou maticí může tvořit například PP, PE, PS, PA, POM, PC, ABS, PET a další termoplasty. Z materiálových, ekonomických i zpracovatelských aspektů jsou

pro takové ztužování jako matricové polymerní materiály nejvhodnější PE, PP a kopolymer EVA. Mezi nejlevnější matrice patří PP. Dražší, pevnější, chemicky a tepelně odolné termoplasty, lze použít pro značně mechanicky a tepelně namáhané díly. [3]

2.1.1 Polypropylen (PP)

Polypropylen je druhým nejvýznamnějším vyráběným polyolefinem. Molekulová hmotnost obchodních typů bývá v rozmezí 100 000 až 600 000 g/mol. Zpracovává se vstřikováním při teplotě 200 až 280 °C a vytlačováním na trubky, desky, fólie a profily při teplotě 200 až 270 °C. Desky a bloky lze také lisovat z granulí při teplotě 180 až 250 °C. Bod tání leží v intervalu 160 až 170 °C.

Krátkodobě odolává teplotám až 140 °C. Vyniká výbornými dielektrickými vlastnostmi, při zpracování vykazuje nejnižší závislost na kolísání technologických parametrů. PP má značně menší sklon ke korozi pod napětím než ostatní polyolefiny, větší tvrdost a pevnost v ohybu, ale nižší rázovou houževnatost. Má poměrně dobrou odolnost proti opotřebení, vysokou odolnost proti chemickým činidlům s výjimkou silně oxidačních látek.

Lze ho použít na různé výrobky, u nichž jsou žádány tuhost, mechanická pevnost a dobré elektroizolační vlastnosti. V automobilovém průmyslu se např. uplatňují vstřikované dílce z PP na přístrojové desky, ventilátory aj. [3]

2.2 Krátká vlákna

Z důvodů malých průřezových rozměrů není možné používat vlákna samostatně. Proto se vlákna vkládají do polymerní matrice a vytváří tak vláknové kompozity. Matrice spojuje vlákna dohromady, chrání je proti narušení a slouží k přenosu namáhání do vláken. Funkce přenosu namáhání do vláken je důležitá zejména u kompozitů s krátkými vlákny.

Vlákna mohou být skleněná, uhlíková, polymerní, keramická a kovová. Polymerní matrice se ale nevyztužují kovovými nebo keramickými vlákny, protože jsou dražší a také proto, že tato vlákna mají větší hustotu a zmenšovala by měrnou pevnost a měrný modul termoplastu. Mezi nejpoužívanější vlákna patří skelná, jsou poměrně levná a v západní Evropě se v současné době pro plněné termoplasty spotřebovává přibližně 30 % jejich produkce. Velmi pozoruhodné vlastnosti mají polymerová vlákna. Přínos polymerních vláken spočívá ve snížení hmotnosti a bezproblémové recyklaci. Tato vlákna jsou převážně

uhlíková vlákna, bórová a aramidová vlákna (známá pod názvem kevlar) a také přírodní vlákna (konopné a lněné). V porovnání se skleněnými vlákny vykazují polymerní vlákna větší pružnost, což je výhodné pro zpracování.

Vlákna jsou vždy mnohem pevnější než stejné materiály v kompaktní podobě. Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem, protože přirozené defekty se zmenšují. Většina vyráběných vláken má kruhový průřez o průměru od 7 μm do 100 μm . U vláken s krystalickou strukturou lze experimentálně zjistit, že nejpevnější atomové vazby jsou přednostně orientovány v podélném směru vlákna.

Pro dosažení požadované tuhosti a pevnosti termoplastu plněného krátkými vlákny je nutné zvolit vhodný typ vlákna a jeho objemový podíl v termoplastické matrici. Podíl vláken se vyjadřuje objemovým zlomkem vlákna V_f , který vyjadřuje poměr objemu vláken v_f k celkovému objemu plněného termoplastu v_c :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad [-] \quad (1)$$

Z technologického hlediska je výhodné udávat hmotnostní podíl vláken v termoplastu, který lze použít pro dávkování ve výrobě. Mezi objemovým zlomkem V_f a hmotnostním zlomkem w_f platí jednoduchý vztah:

$$w_f = \frac{\rho_f}{\rho_m} \cdot V_f \quad [-] \quad (2)$$

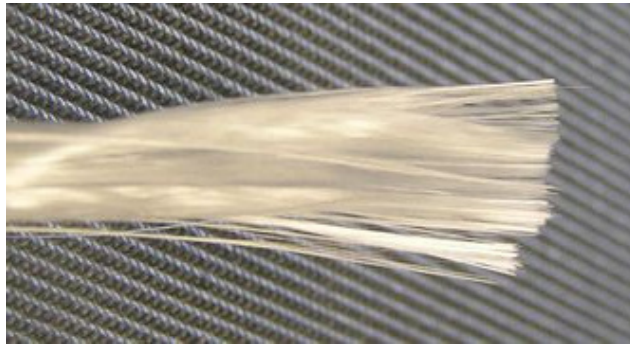
kde ρ_f , ρ_m jsou hustoty materiálu vláken a matrice.

Při požadavcích na vysoký modul pružnosti a na vysokou pevnost je snahou dosáhnout v plněném termoplastu co nejvyššího podílu vláken. [3]

2.2.1 Skleněná vlákna

Nejčastěji používaným plnivem je sklo. Skleněná vlákna se vyrábějí dvou- nebo jednostupňově kontinuálním tažením z taveniny. Současně se odtahuje vlákno ze 400-1200 trysek, průměr jednotlivých vláken je 9-16 mikronů. Nejčastěji se používají skleněná vlákna z bezalkalické boritohlinitokřemičité skloviny (skleněné vlákno typu E), omezeně bezborité skloviny typu S nebo R s vyššími pevnostmi a modulem, příp. chemicky více odolná sklovina C. Při plnění skleněnými vlákny, které mají vysokou pevnost v tahu a

vysoký modul pružnosti, se zvýší tuhost a pevnost v závislosti na stupni plnění, délce vláken a jejich orientaci při zpracování. [3]



Obr. 9. Svazek skleněného vlákna

2.3 Rozhraní mezi matricí a vláknem

Rozhraní mezi složkami má v termoplastech plněných krátkými vlákny významnou úlohu. Při vzájemném působení složek s rozdílnými vlastnostmi nelze za rozhraní považovat výhradně plochu vzájemného kontaktu, ale patří sem také tenká vrstva v okolí kontaktní plochy, která bývá lokálně deformována vlivem rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti a tuhosti složek. Tato vrstva má na rozhraní také jinou morfologii než vnitřní oblasti matrice.

Má-li být výztuž dokonale obklopena matricí, je nutné, aby při přípravě plněného termoplastu došlo k dobrému smáčení výztuže, tj. aby při vysoké energii volného povrchu výztuže měla kapalná matrice co nejmenší povrchovou energii.

Tzv. kontaktní úhel θ (úhel smáčení) je dán vztahem:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{tp} - \gamma_{tk}}{\gamma_{kp}} \quad [-] \quad (3)$$

kde γ_{tp} je povrchová energie napětí na rozhraní tuhé a plynné fáze,

γ_{tk} je povrchová energie rozhraní tuhé a kapalné fáze,

γ_{kp} je povrchová energie rozhraní kapaliny a plynu.

Jestliže je kontaktní úhel velmi malý, tj. hodnota $\cos \theta$ se blíží 1, kapalná fáze dobře smáčí podklad.

Nejmenší povrchovou energii mají matrice s malou kohezní energií, které jsou v tuhém stavu málo pevné. Patří k nim všechny polymerní matrice. Budou proto dobře smáčet materiály s vysokou hodnotou povrchové energie.

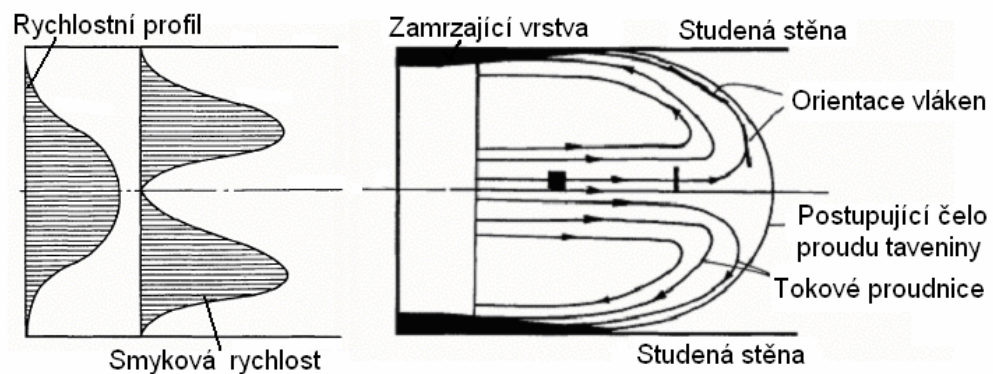
Ke zvýšení vzájemné soudržnosti složek a k omezení difúze cizích molekul mezifázovým rozhraním se povrch výztuže upravuje tzv. apretací. Úprava spočívá v nanesení vhodné chemické látky na povrch částic nebo vláken. Jestliže je výztuž anorganické povahy, obsahuje apretační látka anorganické funkční skupiny reagující s jejich povrchem a také funkční skupiny organické, reagující s polymerní matricí. Nejčastějšími apretacemi jsou různé typy silanů a organické sloučeniny titanu. [4]

2.4 Orientace vláken vlivem toku taveniny

V průběhu vstřikovacího procesu může docházet k orientaci vláken různým způsobem. V samotném výrobku je často pozorována charakteristická vrstevnatá struktura s vlákny orientovanými ve zcela jiných směrech v závislosti polohy vrstvy po tloušťce výrobku. Pro kompozity plněné krátkými skleněnými vlákny bylo prokázáno, že tok taveniny, respektive geometrie toku taveniny, je hlavním činitelem ovlivňujícím orientaci vláken. Viskozita a rychlost toku mohou ovlivnit proporce orientovaných oblastí. Nevhodná orientace může vést až k selhání výrobku. Zvláště u tokové geometrie existuje mnoho proměnných, které mohou ovlivnit orientaci vláken. Mezi hlavní činitele patří teplota taveniny, teplota formy a rychlost vstřikování.

Při zaplňování dutiny formy v průběhu vstřikování dochází k tzv. fontánovému toku. Při něm nedochází ke skluzu taveniny po stěnách formy, ale k valení taveniny. Právě tento laminární fontánový tok má veliký vliv na orientaci vláken a tím i na vlastnosti výrobku.

Orientace během toku má zejména vliv na polymery plněné krátkými vlákny se štíhlostí L/D větší než 10. Při fontánovém toku se na povrchu dutiny formy vytváří zamrzající vrstva a proud taveniny se pohybuje právě uvnitř těchto vrstev. Z obrázku je patrné, že v okolí centrální osy má tavenina při fontánovém toku nejvyšší rychlost, ale působení smykových sil je zanedbatelné. Právě působením rychlosti toku taveniny a smykovým polem je určována budoucí orientace vláken ve výrobku. Z tohoto důvodu mají vlákna poblíž centrální osy orientaci spíše kolmou na směr toku, která se mění díky formování se postupujícího čela taveniny. Tím se dostávají vlákna až do orientace směru toku taveniny.



Obr. 10. Schématické znázornění fontánového toku

Z uvedeného vyplývá, že vstříkované díly z polymerů plněných krátkými vlákny mají jistou vrstevnatou strukturu. Různá orientace vláken po tloušťce výstřiku závisí zejména na geometrii toku uvnitř formy, dále na druhu použitého materiálu a samozřejmě na technologických parametrech. Přesto však lze vysledovat všeobecná pravidla, kterými se orientace vláken řídí.

Většina vstříkovaných dílců z polymerů plněných krátkými vlákny vykazuje třívrstvou strukturu. Tato struktura se skládá z povrchové vrstvy, vrstvy v okolí centrální osy a mezivrstvy, která spojuje povrchovou a střední část. Byly nalezeny tři činitele způsobující orientaci vláken ve směru toku taveniny. Těmito činiteli jsou elongační tok, sbíhavý tok a smykový tok. Naopak orientaci kolmou na směr toku vláken způsobuje rozbíhavý tok.

V povrchové vrstvě mají vlákna tendenci orientovat se vlivem elongačního toku ve směru toku taveniny. Také v mezivrstvě je orientace vláken ve směru toku, přičemž nejvyšší stupeň orientace se předpokládá v určité hloubce pod povrchem. Tato vrstva maximální orientace se nachází v místě, kde se nacházelo rozhraní mezi zamrzlou povrchovou vrstvou a tekoucí vrstvou v průběhu vstříkávání. Toto ovšem platí pro neizotermální tok. Jedná-li se o tok rozbíhavý, je převažující orientace v mezivrstvě příčná na směr toku.

Protože skutečně vyráběné díly mají obvykle tenké stěny, lze říci, že většinu oblastí zabírá rozbíhavý a sbíhavý tok. Předpokládá se, že orientace vláken v prostřední vrstvě je většinou stejná jako v jádře. Při zanedbání povrchové vrstvy, která má malou tloušťku, se dá očekávat, že vlastnosti materiálu závisí hlavně na orientaci vláken v jádře.

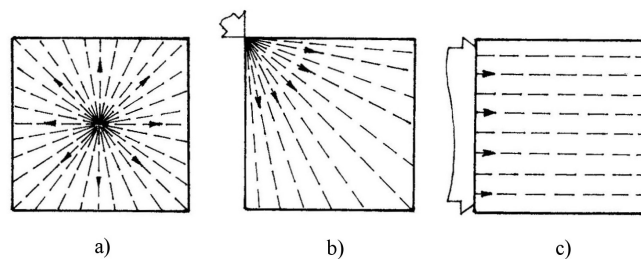
Jiné zdroje hovoří o tom, že orientace v jednotlivých vrstvách výstřiku je ovlivněna zejména gradientem teploty, viskozitou taveniny a geometrií dutiny vstříkovací formy.

Proto zvýšení teploty taveniny a průřezu dutiny vede ke snížení orientace a tloušťky podpovrchové vrstvy. Vliv tohoto jevu však není tak významný jako jev předchozí.

Orientace vláken nemusí být jediným důvodem různých vlastností v různých místech výrobku. I v případě neplněných polymerů se setkáváme s proměnlivými vlastnostmi výrobku. Mezi příčiny rozdílných vlastností patří např. orientace makromolekulárních řetězců polymerního materiálu nebo v případě krystalických materiálů má vliv na vlastnosti materiálu koncentrace krystalů, případně jejich orientace.

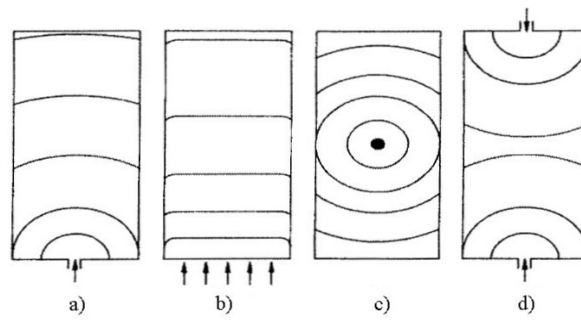
Právě přítomnost částic plniva má velký vliv na morfologii matrice. Tuhé částice svojí přítomností v matrici velmi významně ovlivňují orientaci jednotlivých řetězců u amorfních polymerů. U krystalických polymerů vytvářejí pevné částice na svém povrchu velké množství nukleačních míst, ze kterých mohou vyrůstat krystaly.

Předpokládanou orientaci krátkých vláken v polymerní matrici v závislosti na použitém vtokovém ústí lze zjednodušeně znázornit. Na obrázku jsou znázorněny předpokládané orientace vláken při použití a) centrálně umístěného vtoku, b) v rohu umístěného vtoku, c) filmového vtoku.



Obr. 11. Vliv polohy vtoku na směr vláken

Abychom mohli lépe odhadnout orientaci vláken v matrici je třeba znát mimo reologických vlastností taveniny také způsob, jakým tavenina zaplňuje formu. Na následujícím obrázku je znázorněn postup zaplňování dutiny formy pro několik základních případů umístění vtoků: a) bodový vtok umístěný z boku, b) filmový vtok, c) centrálně umístěný bodový vtok, d) dva protilehle umístěné bodové vtoky.



Obr. 12. Postup zaplňování dutiny formy

Z těchto důvodů je prakticky nemožné získat elastické konstanty pro monotropní plně usměrněnou krátkovláknovou strukturu pouze za pomoci experimentálních měření. Zde hrají svoji úlohu teoretické modely takovýchto struktur. [5]

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ

3.1 Mechanické vlastnosti polymerů

Tuhost

vyjadřuje sílu, kterou je nutno vynaložit pro deformaci tělesa v pružné oblasti deformací. Mírou této síly je modul pružnosti ve smyku a v tahu.

Pevnost

polymerů se liší v návaznosti na jejich molekulární i nadmolekulární strukturu. Tvary tahových křivek se liší podle toho, zda daný polymer se nachází v oblasti teplot pod či nad teplotou skelného přechodu T_g . U amorfních polymerů pod T_g dochází k přetržení tělesa ihned po překonání pružné deformace. Některé semikrystalické polymery mají schopnost se dále zpevňovat po překonání meze kluzu a napětí na mezi pevnosti pak může být i několikrát větší než napětí na mezi kluzu.

Tvrдость

je složitou veličinou, která souvisí jak s kvalitou povrchu tak s vnitřními vlastnostmi polymeru. Zejména u elastomerů existují empirické vztahy přepočtu mezi tvrdostí a modulem pružnosti ve smyku. Literatura uvádí tvrdosti, které jsou obvykle používány pro charakterizaci elastomerů, dále tvrdosti HRC pro tvrdé polymerní materiály pod T_g a nejobsáhleji používané tvrdosti vtiskem kuličky.

Houževnatost

je důležitou vlastností materiálu, která vyjadřuje množství práce nutné na vznik nového povrchu. Tuto vlastnost materiálu lze nejlépe vystihnout hodnotou lomové houževnatosti K_c a hnací síly trhliny G . Tyto údaje se naneštěstí v literatuře nevyskytují a jsou předmětem dalších zkoušek. Většinou je nutné se omezit na údaje, které poskytují plastikařské zkušební metody, tj. rázová houževnatost metodou Charpy a Izod s vrubem a bez vrubu. Vzhledem k tomu, že pro vysoce houževnaté materiály je nutné použít tělesa s jiným tvarem vrubu než u méně houževnatých materiálů, je vzájemné srovnání na základě číselných údajů o vynaložených energiích složité. [6]

3.2 Druhy zkoušek mechanických vlastností

Při technickém použití plastů nás obvykle zajímá jejich mechanická pevnost proti různým působením síly. Používané zkušební metody můžeme rozdělit do tří skupin:

Statické zkoušky – při těchto zkouškách je materiál namáhán pomalu se měnícími silami. Síla se zvyšuje rovnoměrně pomalu, obvykle do okamžiku porušení tělíska.

Dynamické zkoušky – působením síly se mění buď rázem, nebo za velmi krátký časový úsek. Někdy se pracuje také tak, že působení síly je dlouhodobé, ale její velikost se mění periodicky v extrémně krátké době.

Únavové zkoušky – Mechanické vlastnosti se zkoušejí dlouhodobě za předepsaných podmínek časově proměnného namáhání, obvykle až do porušení materiálu. Pro jednotlivé druhy plastů tyto zkoušky bývají rozličné.

Mechanické zkoušky většinou neprovádíme na samotné součásti, ale na zkušebních vzorcích předepsaného tvaru a rozměrů. [7]

3.3 Zkouška tahem

Jednou z nejdůležitějších zkoušek materiálu hodnotících jeho pevnost je tahová zkouška. Při zkoušce tahem je materiál namáhán silou tak, že dojde k jeho porušení. Kdyby byl materiál izotropní, bylo by napětí v celém průřezu zkušebního tělesa rozloženo rovnoměrně. V praxi se tento ideální stav nevyskytuje, vlastnosti plastů se v různých místech liší a tahové napětí je rozloženo nerovnoměrně. Vznikají tím smyková napětí.

Je nutné si předem uvědomit pochody při namáhání tahem. Jestliže budeme působit na průřez tělesa S silou F , bude osově napětí působící v průřezu zkušebního tělesa při tahové zkoušce $\sigma = \frac{F}{S}$. Průřez tělesa se nám při zkoušce však bude měnit až do okamžiku, kdy se dosáhne rovnováhy mezi deformací a napětím. Při dalším zatěžování síly se dostaneme do okamžiku, kdy se těleso přetrhne. Protože průřez tělesa se při zkoušce stále mění, je zjišťování skutečného napětí obtížné. V praxi se obvykle pracuje s tak zvaným **smluvním napětím**, což je síla vztažená na počáteční průřez zkušebního tělesa:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad [MPa] \quad (4)$$

Tento způsob vyjadřování je vžitý pro kovy a byl také převzat pro plasty. Tam, kde dochází k malým deformacím jako jsou reaktoplasty, polystyren apod., tento stav ještě vyhovuje. U elastomerů, kde nastává prodloužení o několik desítek procent, je však již potom podstatné zmenšení průřezu tělesa a tím i velký rozdíl mezi napětím na začátku a na konci zkoušky.

S prodlužováním tělesa se mění jeho původní délka l_0 na l a vyjadřujeme ji jako **poměrné nebo relativní prodloužení (deformace v tahu)**:

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-] \quad (5)$$

S prodlužováním zkušebního tělesa nastává také zmenšování průřezu:

$$\varepsilon_s = \frac{S_0 - S}{S_0} = \frac{\Delta S}{S_0} \quad [-] \quad (6)$$

Relativní změna průřezu v závislosti na relativní změně délky se nazývá **Poissonovo číslo**:

$$\mu = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_l} \quad [-] \quad (7)$$

Pro změnu objemu při prodloužení byl odvozen tento vztah:

$$\frac{\Delta V}{V_0} \approx (1 - 2\mu) \cdot \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-] \quad (8)$$

Podle tohoto vzorce může Poissonovo číslo dosáhnout maximálně hodnoty 0,5.

Pro zkoušky v tahu v počáteční části křivky platí Hookův zákon, který říká, že deformace je úměrná použité síle:

$$\varepsilon = K \cdot \sigma \quad [-] \quad (9)$$

kde: ε - poměrné prodloužení

K - součinitel úměrnosti

σ - napětí v tahu

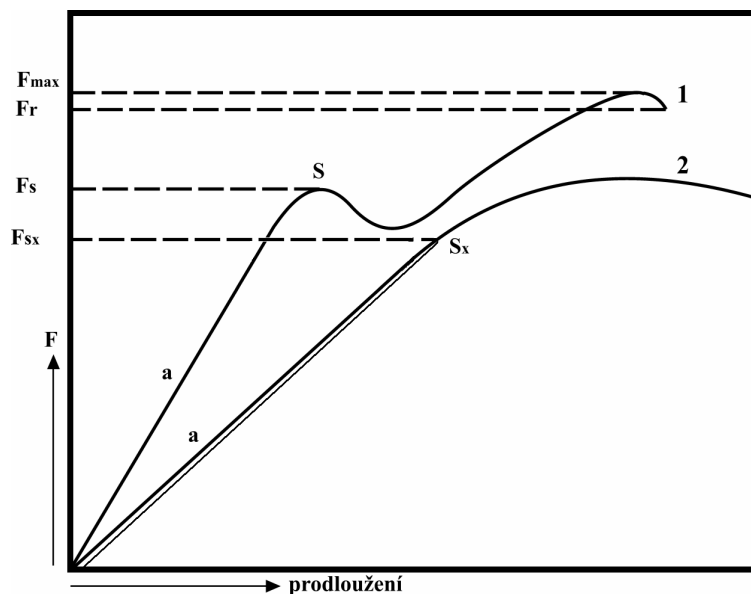
Součinitel úměrnosti K udává poměrnou změnu délky při jednotkovém napětí. Je to cotg úhlu, který svírá tečna křivky v diagramu napětí – poměrné prodloužení s osou ε . Protože takto vycházejí velmi malé hodnoty, používá se v praxi jeho převrácená hodnota

$$\frac{1}{K} = E \quad [MPa] \quad (10)$$

E je **modul pružnosti**, také nazývaný Youngův modul.

Výše uvedené vztahy platí přibližně, protože přísně lineární závislost prodloužení na napětí není dodržena u žádného materiálu. Proto se v praxi objevují menší nebo větší odchylky od Hookova zákona. Průběh křivek až po mez úměrnosti v tahu je však velmi podobný. Rozlišení nastává až po překročení této meze.

Obecná tahová křivka polymerů je velmi podobná tahovým křivkám kovů. Idealizovaně je nakreslena na *obr. č. 13*. V průběhu zkoušky se trvale měří síla a prodloužení zkušebního tělesa. Z křivky „síla – prodloužení“ se vyhodnocují charakteristické veličiny ze zkoušky tahem. [7]



Obr. 13. Obecná křivka „síla – prodloužení“

Křivka 1- materiál vykazuje mez kluzu

Křivka 2 - materiál nevykazuje mez kluzu

a - přímkové části na počátku křivky

S - mez kluzu

x - úsek na ose prodloužení pro stanovení meze kluzu

S_x - smluvní mez kluzu

Při vyhodnocování křivky se používají některé pojmy, v jejichž názvech a symbolech však není ve všech normách jednotnost.

Mez úměrnosti v tahu

Je to mezní napětí, do kterého je deformace úměrná napětí. Až do meze úměrnosti je průběh tahové křivky prakticky přímkový (viz obr. 13 – úsek a) a v této oblasti platí Hookův zákon. Ve skutečnosti však již i při poměrně malém napětí zůstává na zkušební tělísku určitá trvalá deformace. Pro dokonale pružný materiál bychom tuto mez zjistili postupným zvyšováním a postupným rušením napětí až do té hodnoty, kdy zůstane určité prodloužení. V praxi se obvykle jako mez úměrnosti v tahu definuje mezní napětí, při kterém po odtížení zkušební tělísko vykazuje trvalý přírůstek měřené délky max. 0,01%.

Horní mez kluzu

Bod na křivce, do kterého se zvyšovalo prodloužení se stoupajícím napětím. Za touto horní mezí se dále zvyšuje deformace, přičemž napětí poklesne. Pokles napětí pokračuje až k dolní mezi kluzu. Deformace přestává být homogenní. V jednom místě tělesa se vytvořilo tenčí místo nazývané krček. Krček má menší průřez nežli původní vzorek a v souvislosti s tím napětí v této oblasti protažení klesá, protože průřez krčku se zmenšuje. Současně však dochází k orientaci molekul v místě krčku a tím se jeho odpor proti deformaci zvětšuje. Postupně dosáhne deformační zpevnění krčku takového stupně, že jeho tuhost je větší než tuhost neprodložené části tělesa. Proto se průřez krčku již téměř nemění a dochází k prodloužení částí tělesa, při němž se délka krčku zvětšuje.

Dolní mez kluzu

Tento bod udává na křivce kam až pokračuje pokles napětí při dalším prodlužování vzorku. Od tohoto bodu napětí opět stoupá, protože bylo celé těleso zpevněno orientací. Dochází k homogennímu protahování vydlouženého tělesa.

Smluvní mez kluzu

Stanovuje se v případech, kdy zkoušený materiál nemá mez kluzu. S_x se stanovuje graficky jako průsečík křivky „síla – prodloužení“ s přímkou vedenou rovnoběžně s počáteční přímkovou částí této křivky a vytínající na ose úseček prodloužení odpovídající poměrnému prodloužení, např. 1% (viz obr. 13 – křivka 2).

Mez pevnosti v tahu

Takto je označováno maximální napětí, resp. síla vztažená na plochu počátečního průřezu tělesa S_0 , naměřené v průběhu zkoušky tahem. Do výpočtu se dosazuje vždy maximální hodnota síly, i když k destrukci (vlastnímu přetržení) došlo později v okamžiku σ_r za nižšího napětí. Podobně jako u jiných materiálů je skutečná pevnost plastů mnohem menší než pevnost vypočítaná teoreticky na základě mezimolekulárních vazebných sil. Příčina spočívá v přítomnosti defektů ve struktuře, které představují místa s nižší pevností, než má okolní hmota. Při zatěžování mohou v těchto místech vznikat taková napětí, která překračují hodnotu kohezní pevnosti, čímž dochází ke vzniku mikrotrhliny. Ta se šíří dále až dojde k lomu tělesa v makroměřítku. [7]

Mez pevnosti v tahu při přetržení σ_r

Napětí, při kterém se těleso přetrhlo.

Poměrné prodloužení při přetržení ε_r

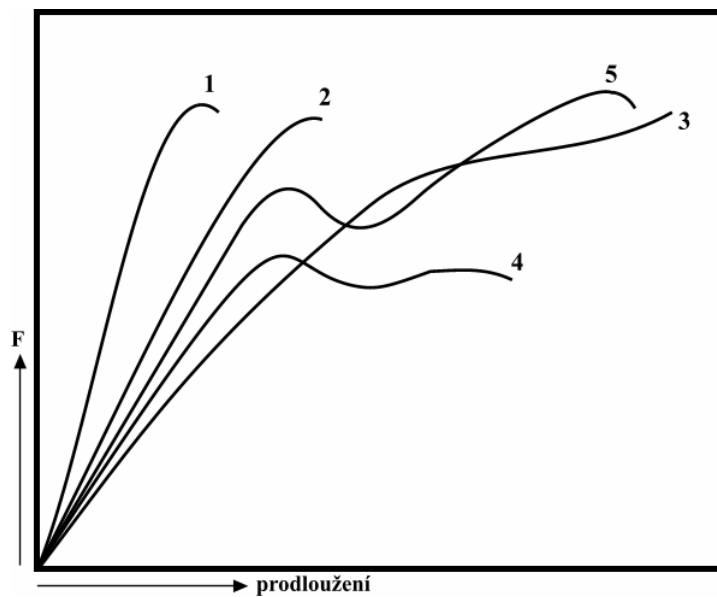
Je to poměrná změna délky při zkoušce tahem v okamžiku přetržení. Vyjadřuje se v procentech měřené délky:

$$\varepsilon_r = \frac{(l - l_0) \cdot 100}{l_0} = \frac{\Delta l \cdot 100}{l_0} \quad [\%] \quad (11)$$

Poměrné prodloužení při největší síle ε_z

Změna délky Δl v okamžiku dosažení největší síly F_{\max} vztažená na počáteční měřenou délku l_0 zkušebního tělesa.

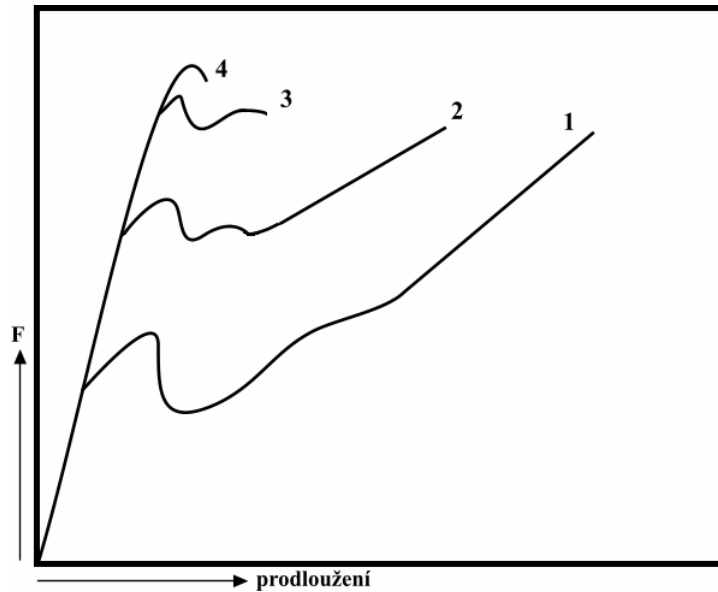
Různé materiály mají své charakteristické tahové křivky, které odpovídají mechanickým vlastnostem. Na *obr. č. 14* křivka 1 odpovídá materiálu s malou průtažností (reaktoplasty, jako epoxidové pryskyřice, bakelit), křivka 2 odpovídá houževnatějšímu materiálu (např. neměkčený PVC), křivka 3 odpovídá materiálu s velkou průtažností. Křivka nemá mez kluzu, sem patří měkčený PVC. Křivka 4 má dolní a horní mez kluzu, typický je polyethylen a polypropylen. Křivka 5 odpovídá polyamidu, u kterého se prodloužením mechanické vlastnosti zlepšují.



Obr. 14. Charakteristické křivky různých materiálů

- 1 - materiál s malou průtažností (epoxidové pryskyřice, bakelit)
- 2 - houževnatý materiál (PVC)
- 3 - materiál s velkou průtažností
- 4 - materiál s dolní a horní mezí kluzu (PE, PP)
- 5 - materiál zlepšující mechanické vlastnosti prodloužením (polyamid)

Obr. č. 15 znázorňuje, jak průběh tahové křivky může být ovlivněn způsobem provedení. Z podmínek při provádění je nejdůležitější teplota a rychlost deformace. Proto pokud není pro daný materiál určena rychlost deformace, je nutné ji volit co nejmenší, aby se projevíly charakteristické vlastnosti polymeru. [5]



Obr. 15. Závislost síly na rychlosti deformace u polypropylenu (1 - 2,6 mm/min, 2 - 15 mm/min, 3 - 52mm/min, 4 - 300mm/min)

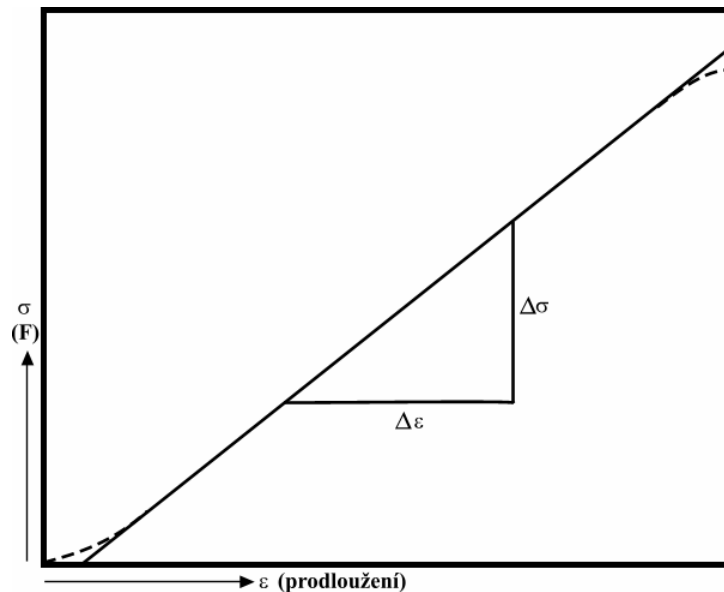
Modul pružnosti v tahu E

Je podíl napětí v tahu σ_t a poměrného prodloužení ε_t v oblasti, ve které existuje lineární závislost mezi napětím a prodloužením.

$$E = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad [MPa] \quad (12)$$

Jako počátek pro stanovení poměrného prodloužení k vyjádření modulu pružnosti je možno brát průsečík prodloužení počáteční přímkové části závislosti „síla – prodloužení“ s osou prodloužení, obr. č. 16. Experimentální chyby a nevyhnutelné nedokonalosti zkušebního zařízení jsou příčinou toho, že přímka proložená počáteční oblastí hodnot neprochází počátkem.

Při použití zkušebního zařízení s automatickým zápisem je možno přímo použít záznam zapisovače k proložení přímky grafickou cestou. Jestliže není k dispozici grafický záznam, doporučuje se vypočítat předem parametry přímky alespoň z 10 dvojic naměřených hodnot regresní metodou. [7]



Obr. 16. Závislost „napětí – poměrné prodloužení“, počáteční oblast

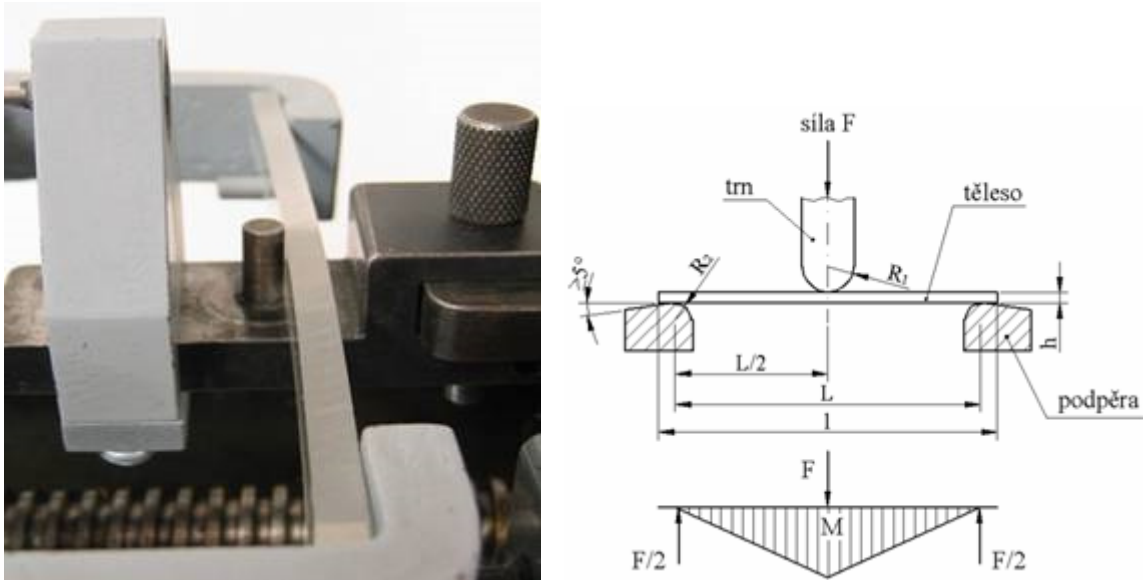
3.4 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem dává důležité konstrukční podklady pro ty polymerní materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, což je velmi častý případ. Jsou to nejen nosníky, ale např. samonosné střešní konstrukce z laminátů, obkladový materiál ve stavebnictví, který se prohýbá svou vlastní vahou, střešní krytiny, apod. Ohybová zkouška také umožňuje stanovit modul pružnosti E u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek.

Při ohybu je napětí v principu rozloženo tak, že v horních vrstvách je tahové a směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové.

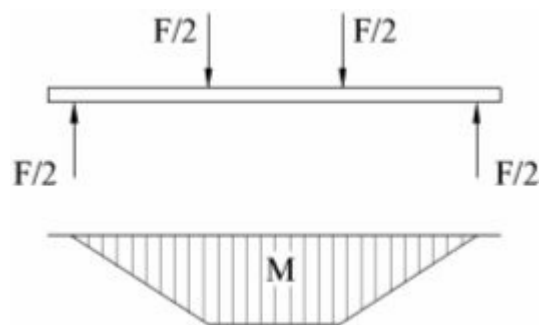
Rozlišujeme třibodovou a čtyřbodovou zkoušku ohybem.

Při **třibodové** zkoušce (viz obr. 17) je zkušební těleso podepřeno jako nosník dvěma podpěrami a konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. [8]



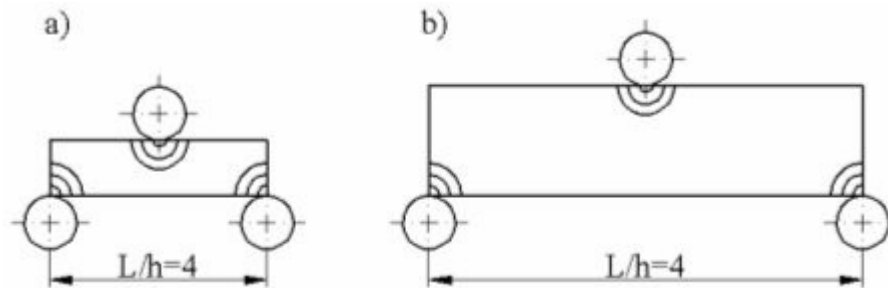
Obr. 17. Schéma třibodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu

Při **čtyřbodové** zkoušce je zkušební těleso prohýbáno dvěma trny působícími v jedné třetině nebo jedné polovině vzdálenosti podpěrných trnů. Hodnoty pevností v ohybu jsou nižší než u třibodového systému a je i jiné rozložení ohybového momentu (viz obr. 18). Jeho rovnoměrnější působení v celé délce zkušebního tělesa vedlo k tomu, že se modul pružnosti stanovuje hlavně tímto způsobem.



Obr. 18. Schéma čtyřbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu

Přechod ke čtyřbodovému systému je dán především snížením celkové koncentrace napětí v místech styku vzorku s trny jak podpěrnými tak zatěžovacími, což umožňuje testování tenkých vzorků ve srovnání s třibodovým ohybem.



Obr. 19. Efekt koncentrace napětí u vzorků rozličné tloušťky

(a – tenký vzorek, b – tlustý vzorek)

Způsob přípravy zkušebních těles, jejich rozměry, rychlost zatěžování, rozměry podpěrných i zatěžovacích trnů a další náležitosti ohybových zkoušek jsou uvedeny pro daný typ materiálů v příslušných normách. [8]

Výpočet a vyjádření výsledků

Napětí v ohybu

Vypočte se napětí v ohybu σ_f , vyjádřené v MPa, použitím následujícího vztahu:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [MPa] \quad (13)$$

kde: F - zatěžující síla

L - rozpětí podpěr

b - šířka zkušebního tělesa

h - tloušťka zkušebního tělesa

Modul pružnosti v ohybu

Pro stanovení modulu pružnosti v ohybu se vypočítají průhyby s_1 a s_2 odpovídající daným hodnotám deformace ohybem $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ a $\varepsilon_{f2} = 0,0025$ podle vztahu:

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} \cdot L^2}{6 \cdot h} \quad (i = 1,2) \quad [mm] \quad (14)$$

kde: s_i - je jednotlivá hodnota průhybu

ε_{fi} - odpovídající deformace ohybem

L - rozpětí podpěr

h - tloušťka zkušební tělesa

Modul pružnosti v ohybu E_f , vyjádřený v MPa, se vypočítá podle vztahu:

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad [MPa] \quad (15)$$

kde: σ_{f1} - napětí v ohybu, stanovené pro průhyb s_1

σ_{f2} - napětí v ohybu, stanovené pro průhyb s_2

Způsob výpočtu modulu pružnosti v ohybu je obdobný jako u modulu v tahu. Hodnotu modulu je možno vypočítat z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení. Průhyb nemá obecně překročit hodnotu 4,5 h, která odpovídá poměrnému prodloužení, resp. stlačení povrchových vláken o 0,5 % za popisovaných podmínek. Vzorec pro modul pružnosti v ohybu je odvozen za předpokladu zachování rovinnosti průřezu, platnosti Hookova zákona a zanedbání vlivu posouvajících sil. Tyto předpoklady jsou dostatečně splněny u štíhlých nosníků, je-li průhyb relativně malý.

Pro houževnaté materiály, jako jsou např. polyamidy, silně změkčené epoxidové pryskyřice, změkčený PVC apod., nemá zkouška v ohybu tak jak se běžně provádí žádný význam. Zkušební těleso se při této zkoušce nezlomí, ale prohýbá se tak dlouho, až vyklouzne z podpěr. V takových případech je nutno provádět tzv. *smluvní zkoušku*, tj. např. stanovit napětí, při kterém dojde k předepsanému průhybu např. rovném 1,5 násobku tloušťky zkušební tělesa. Touto zkouškou je možno rozlišit od sebe jednotlivé typy určitého polymeru. [7]

4 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování polymerů je diskontinuální pružná výrobní metoda pro výrobu tenkostěnných plastových dílů. Tato metoda umožňuje v automatických cyklech výrobu komplexní geometrie dílu při nízké energetické spotřebě a krátkém časovém cyklu. Vstřikování polymerů umožňuje nejenom výrobu jednotlivých dílů, ale také sdružování několika dílů do jednoho celku. Tento postup nám umožňuje minimalizovat vady vznikající při montáži a minimalizovat náklady na výrobu.

Vstřikování polymerů zahrnuje celou řadu technologických variant, které umožňují výrobu plastových dílů vstřikovaných z několika typů polymerů o různých vlastnostech, kombinaci polymeru s kovovými díly nebo anorganickými materiály. Základní požadavky na metodu vstřikování polymerů jsou nulové dokončovací operace a automatický výrobní cyklus, případně montáž s maximálním využitím automatizace a robotizace. Aby mohly být splněny tyto základní požadavky, je nutno klást důraz na moderní nástroje umožňující komplexní analýzu jak plastového dílu samotného, tak také analýzu výrobního procesu.

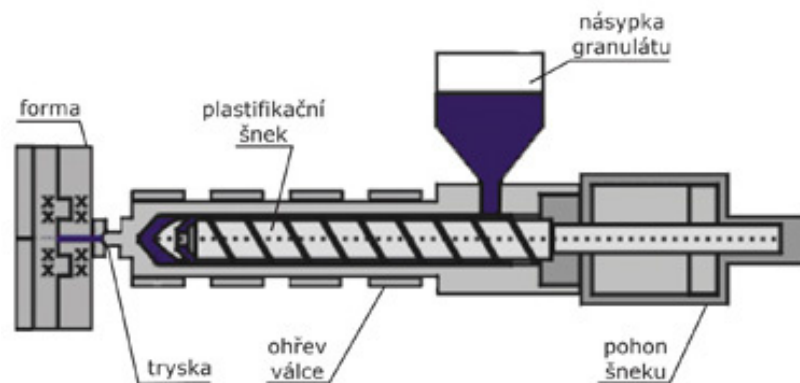
Z technologického hlediska má pro plastové díly ve strojírenství největší význam vstřikování. Vzhledem k požadavkům aplikační sféry vývoj této technologie doznává značného pokroku. Jedná se např. o vícekomponentní vstřikování (jeden výrobek z více druhů materiálu), plynem nebo vodou podporované vstřikování (duté díly), mikrovstřikování (miligramové výstřiky), vstřikování strukturně lehčených plastů, vstřikování hybridních dílů z kovů a plastů (PA, POM, PBT) aj. Základním trendem v této oblasti je přesné vstřikování s tolerancemi srovnatelnými s kovovými součástkami a vstřikování složitých modulů (sací modul, palivový modul apod.). [4]

4.1 Popis vstřikovacího cyklu

Z násypky vstřikovacího stroje se materiál dávkuje do plastikační jednotky, v níž se přivádí do plastického stavu účinkem tepla. Po přisunutí plastikační jednotky k formě se tavenina pod tlakem doplní vtokovým systémem do dutiny formy. Doba, po kterou trvá tento proces, se nazývá doba plnění. Po zaplnění dutiny formy se působí na materiál dotlakem. Tato doba se nazývá doba doplňování. Dotlak má za účel částečně vyrovnat vliv smrštění a zabránit unikání materiálu z dutiny formy. V další fázi zůstává zaplněná forma ještě určitou dobu uzavřena – probíhá chlazení výstřiku. Po zatuhnutí výrobku se forma v dělicí rovině

otevře a výstřik lze vyjmout, obvykle pomocí automatických vyhazovačů. Během chlazení a vyjímání výrobku připravuje plastikační jednotka novou dávku roztaveného materiálu, tak aby vstřikovací stroj mohl po uzavření formy zahájit další pracovní cyklus.

Vstřikovací formy svou velikostí a počtem otisků (počet dílů, které vypadávají při jednom zdvihu formy) odpovídají požadavkům na budoucí výrobek a na požadovanou kapacitu výroby. Zvyšováním počtu otisků roste kapacita výroby a klesá cena výrobku, je však nákladnější výroba formy.



Obr. 20. Schematické znázornění vstřikovacího stroje

Tato technologie je nejvíce rozšířenou pro zpracování plastů, vyžaduje však velké série výrobků (řádově desítky tisíc). Jen při takových sériích je možné vyšší náklady na výrobu formy rozpočítat do jednotlivých výrobků. Vstřikováním je možné zpracovat většinu běžných plastů. [4]

4.2 Vtokový systém

Úlohou vtokového systému formy je dopravit taveninu z trysky stroje do dutiny formy. Ztuhlý materiál ve vtokovém systému se nazývá vtokový zbytek. Minimalizací tohoto vtokového zbytku lze dosahovat značných úspor materiálu. V rámci minimalizace vtokového zbytku se vyvinulo několik vtokových systémů. Lze je rozdělit do dvou základních skupin:

- horký vtokový systém
- studený vtokový systém

Volba vtokového systému závisí na požadavcích kladených na konkrétní výrobek. Dále lze volbou vtokového systému ovlivnit například reziduální napětí, vytvoření nebo polohu studeného spoje.

4.2.1 Horký vtokový systém

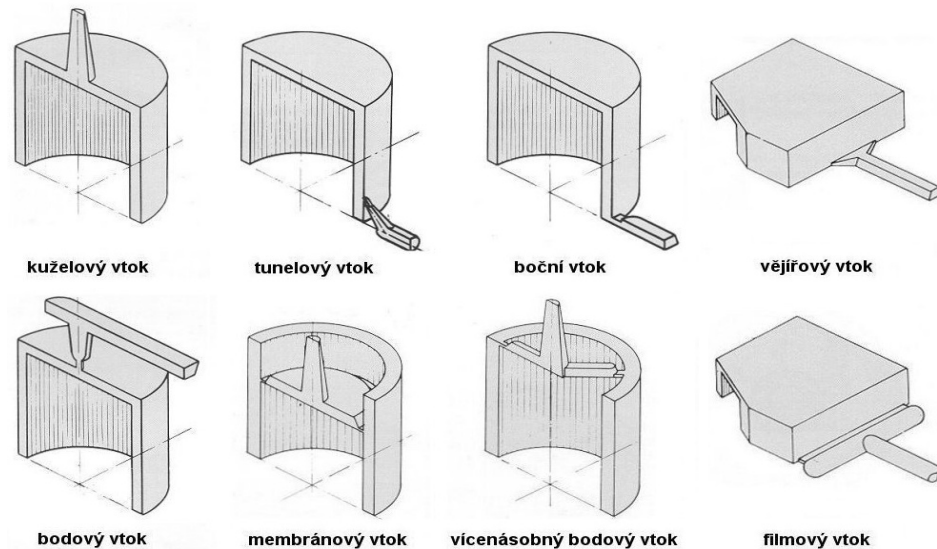
Horký vtokový systém se realizuje pomocí vyhřívaných vtokových soustav. Tento způsob vstřikování nám umožňuje zcela odstranit vtokový zbytek. Nejobvyklejším řešením je uložení rozváděcích kanálů do ohřívaného rozváděcího bloku nebo do desky. Vytápění rozváděcího bloku je možné realizovat jako ohřev externí (teplo je přiváděno topnými elementy na povrchu rozváděcího bloku) nebo jako interní ohřev (rozdávěcí blok je vyhříván zevnitř pomocí tzv. topných patrol).

4.2.2 Studený vtokový systém

Během průtoku studeným vtokovým systémem viskozita taveniny na vnějším povrchu prudce roste, nejnižší je uprostřed. Ztuhlá povrchová vrstva taveniny vytváří tepelnou izolaci vnitřnímu proudu taveniny. Za tohoto stavu se zaplní celá dutina. V okamžiku zaplnění vzroste prudce odpor a poklesne průtok. V dutině vstřikovací formy nastává postupné tuhnutí taveniny odvodem tepla do stěn. Další doplňování taveniny může nastat jen jejím elastickým stlačením. Ve vtokových ústích ještě v tomto okamžiku dochází k vývinu tepla vlivem tlaku a tím oddálení ztuhnutí taveniny. V případě, že již stroj není schopen překonat tlakové ztráty, dochází k poklesu rychlosti vstřiku a celkovému ochlazení polymeru ve vtokovém systému i v dutině vstřikovací formy

4.2.3 Vtoková ústí

Volba typu vtokových ústí a také samozřejmě jejich poloha má zásadní vliv na orientaci vláken u krátkovláknových kompozitních materiálů. V naprosté většině případů je vtokové ústí vytvořeno zúžením rozváděcího kanálu. Jen ve výjimečných případech dochází k použití plného nezúženého vtoku a to zejména u velkých výrobků pro potlačení lunkrů a propadlin.



Obr. 21. Typy vtokových ústí

Naopak zúžením vtokového ústí docílíme zvýšení teploty taveniny před vstupem do dutiny formy a omezí se strhávání chladných vrstev taveniny do dutiny formy, což by vedlo k vytváření povrchových vad výrobku. Základní typy vtokových ústí jsou uvedeny na obrázku. [4]

4.3 Řešení umístění vtokového ústí

Stejně jako typ použitého vtokového ústí má velký vliv na výsledné vlastnosti poloha vtokového ústí. Poloha ústí má rozhodující vliv na kvalitu a vzhled výrobku. Volba vtokového systému, vtokového ústí a jeho polohy má také zásadní vliv na složitost formy a tím

i na její cenu. Pro snížení nedostatků na výrobku je třeba respektovat několik základních zásad umístění ústí vtoků.

- Tavenina má téci vždy z místa většího průřezu do místa menšího průřezu, proto se vtokové ústí umísťuje do nejtlustšího místa výstřiku.
- Aby taveniny zatékala do všech míst rovnoměrně, je nutné umístit vtok do geometrického středu dutiny.
- U výstřiku se žebry má tavenina proudit ve směru jejich orientace mimo místa velkého namáhání nebo opticky činných ploch výstřiku.

- U obdélníkových tvarů je potřeba umístit ústí tak, aby byl zajištěn tok ve směru delší strany.
- U výstřiku s otvory se umísťuje ústí do těchto otvorů nebo v jejich blízkosti.

Dále je potřeba dbát na umístění studených spojů na místa, která nejsou na pohledové straně a nejsou mechanicky namáhána. Dále je nutné volit umístění vtoku tak, aby stopa vzniklá po odstranění vtoku nesnižovala estetickou kvalitu výrobku. [4]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem praktické části této diplomové práce je posoudit na základě mechanických zkoušek vliv krátkých vláken na mechanické vlastnosti. Na mechanické vlastnosti bude konkrétně zkoumán vliv orientace krátkých vláken a vliv objemového zastoupení krátkých vláken. Posuzovaný materiál je polypropylen plněný skleněnými vlákny.

Na zkušební vzorky budou aplikovány: tahová zkouška, 2D zkouška kruhové desky, tříbodový ohyb a zkouška vrubové houževnatosti. U tahové zkoušky budou porovnávány hodnoty meze pevnosti v tahu a moduly pružnosti v tahu. U 2D zkoušky kruhové desky budou porovnávány hodnoty tuhosti. U tříbodové zkoušky budou porovnávány hodnoty meze pevnosti v ohybu a moduly pružnosti v ohybu. A na rázové zkoušce v ohybu bude porovnávána vrubová houževnatost.

Na základě naměřených dat u 2D zkoušky kruhové desky a tříbodové ohybové zkoušky bude pro PP a PP 30% GF stanoveno Poissonovo číslo a porovnáno s tabulkovou hodnotou.

Pro názornost vstřikovacího cyklu budou vytvořeny tokové analýzy vstřikovací formy, a to v programu *Moldflow Plastic Insight 6.2*. Konkrétně bude posuzována doba plnění, orientace vláken na povrchu, orientace vláken ve střední ploše, tlak v dutině formy a místa výskytu studených spojů.

V poslední části bude podrobně zkoumána struktura zkušebních vzorků vyrobených filmovým vtokovým ústím. Pozorována bude zejména orientace vláken po tloušťce desky.

6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

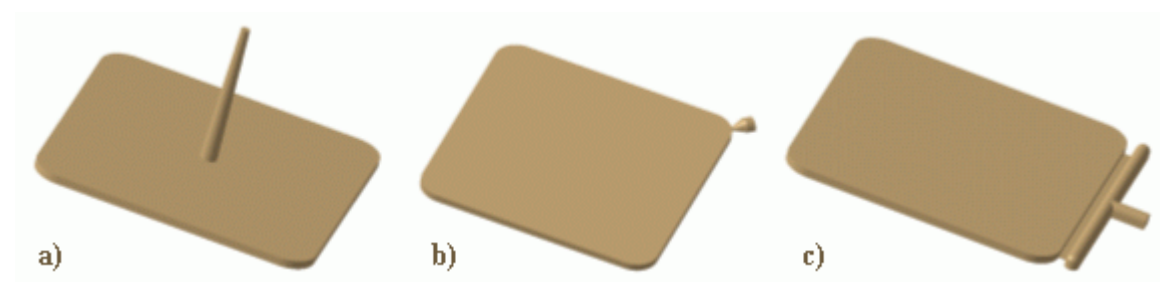
6.1 Materiál vzorků

Zkušební destičky byly vyrobeny z tří různých materiálů, a to z PP plněného 30% skleněných vláken – *PP 53 G 10-0*, PP plněného 15% skleněných vláken a PP neplněného – *DOW PP H777-25R*. Podrobné informace o použitých materiálech jsou uvedeny v materiálových listech (viz příloha I).

Pozn. PP 15% GF byl vyroben smícháním PP a PP 30% GF, a to v poměru 1:1.

6.2 Vstřikování vzorků – typy vtokových ústí

Hrubým výrobkem pro výrobu kruhových zkušebních destiček jsou destičky čtvercové. Tyto čtvercové destičky byly vyrobeny za použití tří různých vtokových ústí (viz obr. 22).



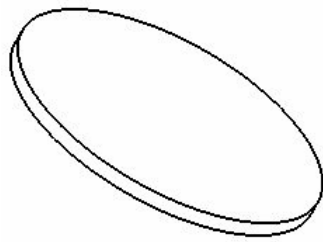
Obr. 22. Použitá vtoková ústí

a) kuželové b) bodové c) filmové

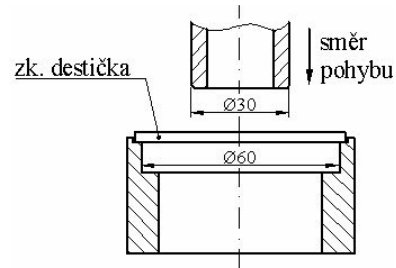
6.3 Zkušební vzorky

6.3.1 Kruhové destičky

Vzorky ve tvaru kruhových destiček slouží k měření tuhosti zkoušených materiálů. Tyto destičky mají průměr 64 mm a tloušťku 3 mm. Při zkoušce jsou vkládány do ohybnice (viz obr. 24).



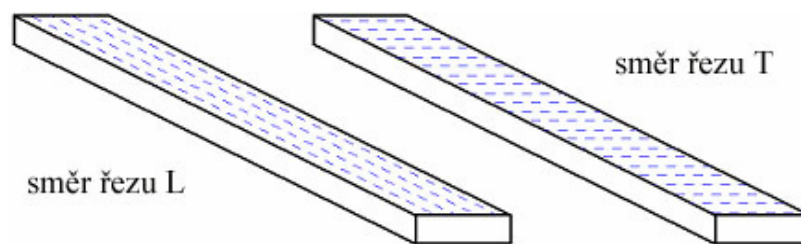
Obr. 23. Kruhová destička



Obr. 24. Ustavení destičky

6.3.2 Zkušební tyčinky

Zkušební tyčinky byly vyrobeny za účelem stanovení pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu, pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu zkoušených materiálů. Tyčinky byly zhotoveny pouze ze vzorků vstřikovaných filmovým vtokem a řezány ve dvou směrech (viz obr. 25). Směr L je rovnoběžný se směrem vláken, směr T je na vlákna kolmý. Rozměry zkušebních tyčinek jsou 10 x 3 x 100 mm.



Obr. 25. Směry řezání zkušebních tyčinek

6.4 Vstřikovací stroj

K výrobě zkušebních vzorků bylo použito vstřikovacího stroje **ARBURG 420 C Allrounder Advanced**. Tento stroj je vybaven řídicím systémem **SELOGICA**, který umožňuje jednoduše a bezpečně ovládat technologii vstřikování. Je předurčen pro univerzální řešení všech úkolů v oblasti vstřikování a lze ho také použít v oblastech speciálního zpracování plastů, jako je např. vícekomponentní vstřikování.

Tab. 1. Technické údaje stroje ARBURG 420 C

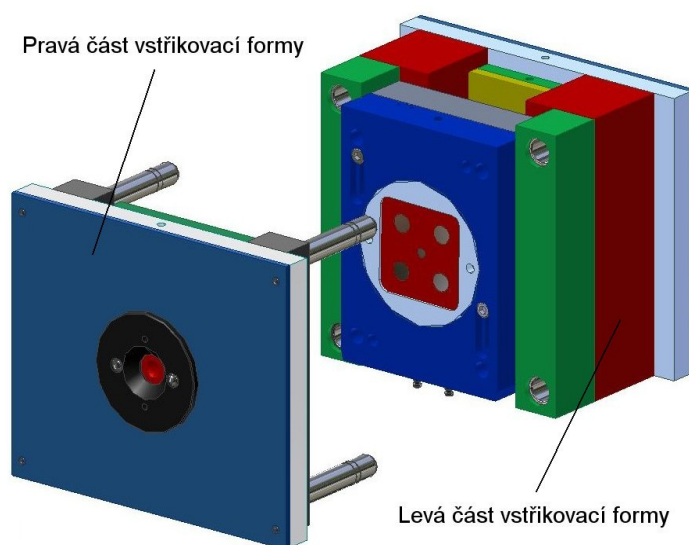
| | |
|-----------------------------|---------------------|
| Uzavírací síla | 1 000 kN |
| Maximální rozměr formy | 420 x 420 x 500 mm |
| Průměr šneku | 40 mm |
| Maximální vstřikovaný objem | 182 cm ³ |



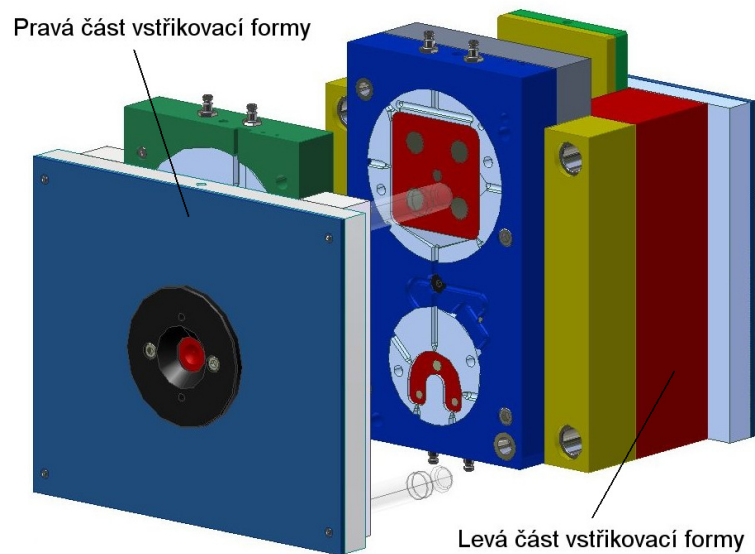
Obr. 26. Vstřikovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advanced

6.5 Vstřikovací forma

K výrobě vzorků byla použita vstřikovací forma s universálním rámem. Tato forma je konstruována tak, že má výměnou část, pomocí které lze vyrábět vzorky jak s centrálním vtokem (viz obr. 27), tak s vtokem filmovým nebo rohovým (viz obr. 28).



Obr. 27. Vstřikovací forma s centrálním vtokem [4]



Obr. 28. Vstříkovací forma s výměnnými vtoky [4]

6.6 Technologické podmínky vstříkování

Technologické podmínky vstříkování jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 2. Teplota vstříkovací formy

| Teplota vstříkovací formy [°C] | | |
|--------------------------------|-------------|-------------|
| PP neplněný | PP + 15% GF | PP + 15% GF |
| 40 | 40 | 40 |

Tab. 3. Teploty pásem šneku

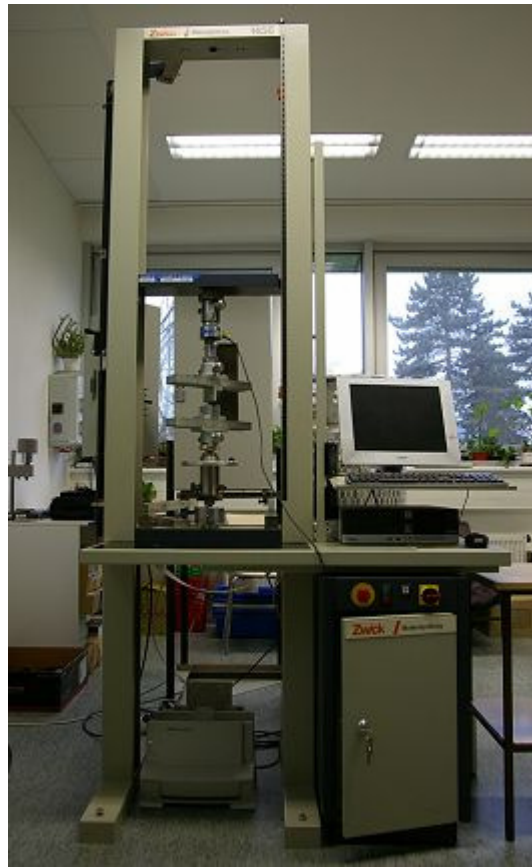
| Teploty pásem šneku [°C] | | | | |
|--------------------------|---------|------------|----------|---------|
| Tryska | Vstupní | Přechodové | Výstupní | Násypka |
| 240 | 215 | 225 | 235 | 40 |

Tab. 4. Časy vstříkovacího cyklu a podmínky vstříkování

| Čas cyklu [s] | Čas chlazení [s] | Čas dotlaku [s] |
|------------------------|------------------|---|
| 60 | 25 | 15 |
| Vstříkovací tlak [MPa] | Dotlak [MPa] | Vstříkovací rychlost [cm ³ s ⁻¹] |
| 170 | 100 | 50 |

7 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Z mechanických vlastností byla konkrétně měřena pevnost, tuhost a vrubová houževnatost. Zkoušky pro stanovení pevnosti a tuhosti byly provedeny na universální zkušebním stroji **ZWICK 1456** (viz obr. 29). Na tomto zkušebním stroji lze provádět statické zkoušky tahem, tlakem, ohybem i cyklické zkoušky míjivým zatížením. Při použití teplotní komory lze provádět mechanické zkoušky při teplotách -80 až 250 °C. Ke zpracování naměřených dat je využíváno programu *testExpert Master*.



Obr. 29. ZWICK 1456

Tab. 5. Technické údaje stroje ZWICK 1456

| | |
|---------------------------|---------------|
| Maximální posuv příčnicku | 800 mm/min |
| Snímače síly | 2,5 a 20 kN |
| Teplotní komora | -80 / +250 °C |
| TestExpert software | Tah/Ohyb/Tlak |

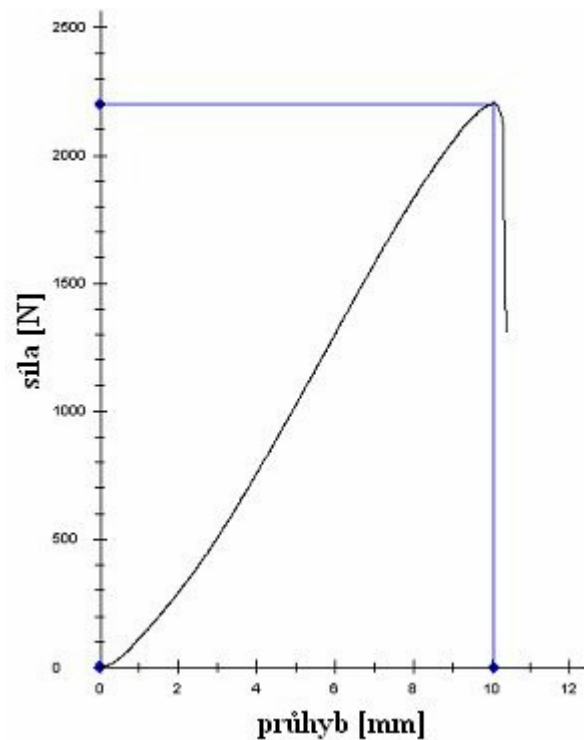
7.1 2D zkouška kruhové desky

7.1.1 Princip

Jde o nenormalizovanou zkoušku sloužící ke stanovení tuhosti vyrobených vzorků. V horní (pohyblivé) části stroje je upevněn trn tvaru dutého válce o vnějším průměru 30 mm. Na podstavci ve spodní části stroje je položena ohybnice s vnitřním průměrem 60 mm. Trn konstantní rychlostí 1 mm/min vtlačí materiál do ohybnice. Se zvyšujícím se průhybem narůstá síla až do okamžiku porušení vzorku. Vše je přitom na monitoru graficky zaznamenáváno (viz obr. 31).



Obr. 30. Princip 2D zkoušky



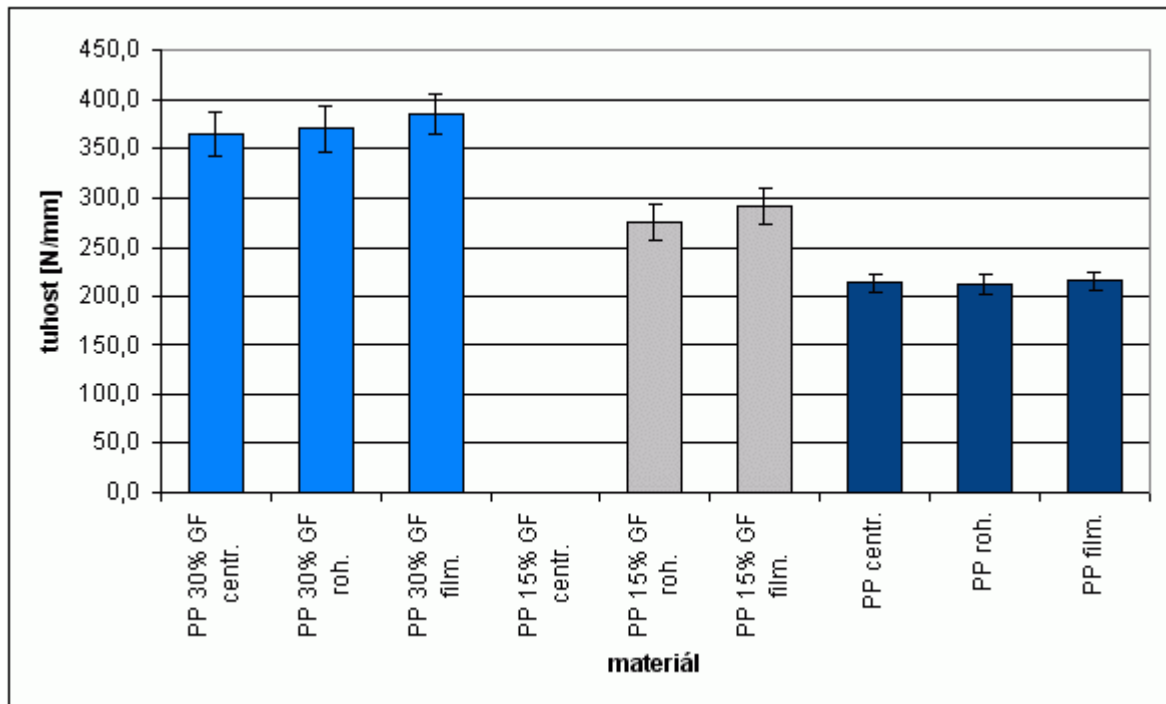
Obr. 31. Závislost síla – průhyb pro PP

7.1.2 Výsledky měření

Měření bylo provedeno pro každý materiál a každý typ vtokového ústí na 5ti vzorcích. Z naměřených hodnot se z poměru síly a průhybu stanovila výsledná tuhost. V následující tabulce jsou zaznamenány naměřené hodnoty průhybů při silách 1 000, 1 300 a 1 500 N. Dále je graficky znázorněna vypočtená hodnota tuhosti.

Tab. 6. Tabulka hodnot průhybů kruhových destiček v mm pro jednotlivé typy materiálů

| | <i>materiál</i> | <i>PP 30% GF</i> | | | <i>PP 15% GF</i> | | | <i>PP</i> | | |
|-----------|-------------------------|------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| | <i>umístění vtoku</i> | <i>centr.</i> | <i>roh.</i> | <i>film.</i> | <i>centr.</i> | <i>roh.</i> | <i>film.</i> | <i>centr.</i> | <i>roh.</i> | <i>film.</i> |
| F= 1000 N | měření č.1 | 2,80 | 2,85 | 2,70 | - | 4,10 | 3,50 | 4,75 | 4,85 | 4,90 |
| | měření č.2 | 2,85 | 2,80 | 2,75 | - | 4,05 | 3,70 | 5,20 | 4,95 | 4,85 |
| | měření č.3 | 3,15 | 2,85 | 2,80 | - | 3,90 | 3,75 | 4,90 | 5,10 | 4,85 |
| | měření č.4 | 3,00 | 2,80 | 2,75 | - | 3,70 | 3,70 | 4,80 | 4,90 | 4,80 |
| | měření č.5 | 2,90 | 2,80 | 2,75 | - | 3,85 | 3,70 | 4,90 | 4,90 | 4,85 |
| | tuhost [N/mm] | 340,1 | 354,6 | 363,6 | - | 255,1 | 272,5 | 203,7 | 202,4 | 206,2 |
| F= 1300 N | měření č.1 | 3,40 | 3,50 | 3,30 | - | 4,80 | 4,30 | 5,85 | 6,00 | 6,00 |
| | měření č.2 | 3,50 | 3,30 | 3,35 | - | 4,80 | 4,45 | 6,35 | 6,05 | 6,00 |
| | měření č.3 | 3,70 | 3,45 | 3,45 | - | 4,70 | 4,50 | 6,00 | 6,20 | 5,95 |
| | měření č.4 | 3,60 | 4,45 | 3,30 | - | 4,45 | 4,45 | 5,90 | 5,95 | 5,90 |
| | měření č.5 | 3,50 | 3,40 | 3,30 | - | 4,60 | 4,40 | 6,00 | 6,05 | 6,00 |
| | tuhost [N/mm] | 367,2 | 359,1 | 389,2 | - | 278,4 | 294,1 | 215,9 | 214,9 | 217,8 |
| F= 1600 N | měření č.1 | 3,95 | 4,10 | 3,90 | - | 5,60 | 5,05 | 7,00 | 7,15 | 7,15 |
| | měření č.2 | 4,15 | 4,00 | 3,95 | - | 5,55 | 5,20 | 7,50 | 7,20 | 7,15 |
| | měření č.3 | 4,30 | 4,05 | 4,05 | - | 5,50 | 5,30 | 7,20 | 7,25 | 7,10 |
| | měření č.4 | 4,20 | 4,05 | 3,95 | - | 5,30 | 5,20 | 7,05 | 7,15 | 7,10 |
| | měření č.5 | 4,20 | 3,95 | 3,95 | - | 5,40 | 5,20 | 7,20 | 7,15 | 7,15 |
| | tuhost [N/mm] | 384,6 | 397,0 | 404,0 | - | 292,5 | 308,3 | 222,5 | 222,8 | 224,4 |
| | Ø tuhost [N/mm] | 364,0 | 370,2 | 385,6 | - | 275,3 | 291,6 | 214,0 | 213,4 | 216,1 |
| | sm. odchylka | 18,3 | 19,0 | 16,7 | - | 15,4 | 14,7 | 7,8 | 8,4 | 7,5 |
| | výběr. sm. odch. | 22,4 | 23,3 | 20,4 | - | 18,9 | 18,0 | 9,6 | 10,3 | 9,2 |



Obr. 32. Hodnota tuhosti pro jednotlivé materiály a typy vtokových ústí

7.1.3 Závěr

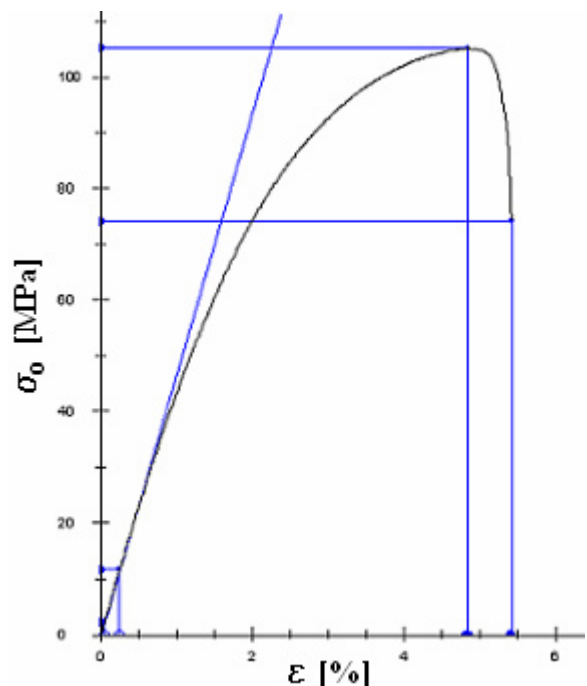
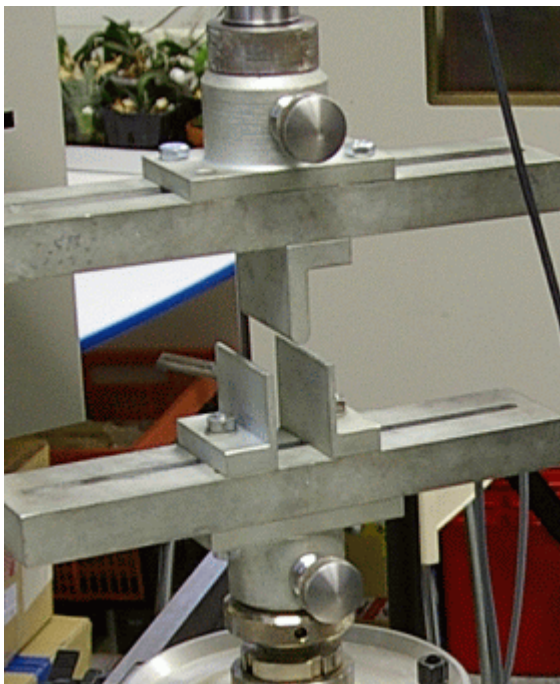
Z grafu je zřejmé, že podle očekávání nejvyšší tuhost vykázal PP 30% GF, dále pak PP 15% GF a nejméně tuhý byl neplněný PP. Dále lze z grafu vyčíst, že typ vtokového ústí má na výslednou tuhost jen malý vliv, a to takový, že u plněných materiálů je tuhost nejvyšší při použití filmového vtoku, dále bodového a nejnižší u kuželového, což je dáno uspořádáním vláken při vstřikování. Typ vtokového ústí u neplněných materiálů nemá na tuhost téměř žádný vliv.

Pozn. Hodnota tuhosti pro PP 15% GF (kuželové vtokové ústí) nebyla naměřena z důvodu deformace výstřiků (zkroucení).

7.2 Tříbodový ohyb

7.2.1 Princip

Zkušební tyčinka o rozměrech 10 x 3 x 100 mm je podepřena dvěma podpěrami vzdálenými od sebe 48 mm (16tinásobek tloušťky). V horní upínací hlavě je upevněn trn, který konstantní rychlostí 10 mm/min tyčinku prohýbá až do okamžiku jejího porušení. Poloměry podpěr jsou 2 mm a poloměr trnu je 5 mm.



Obr. 33. Princip tříbodové ohybové zkoušky Obr. 34. Závislost $\sigma_0 - \epsilon$ pro PP 30% GF - L

7.2.2 Výsledky měření

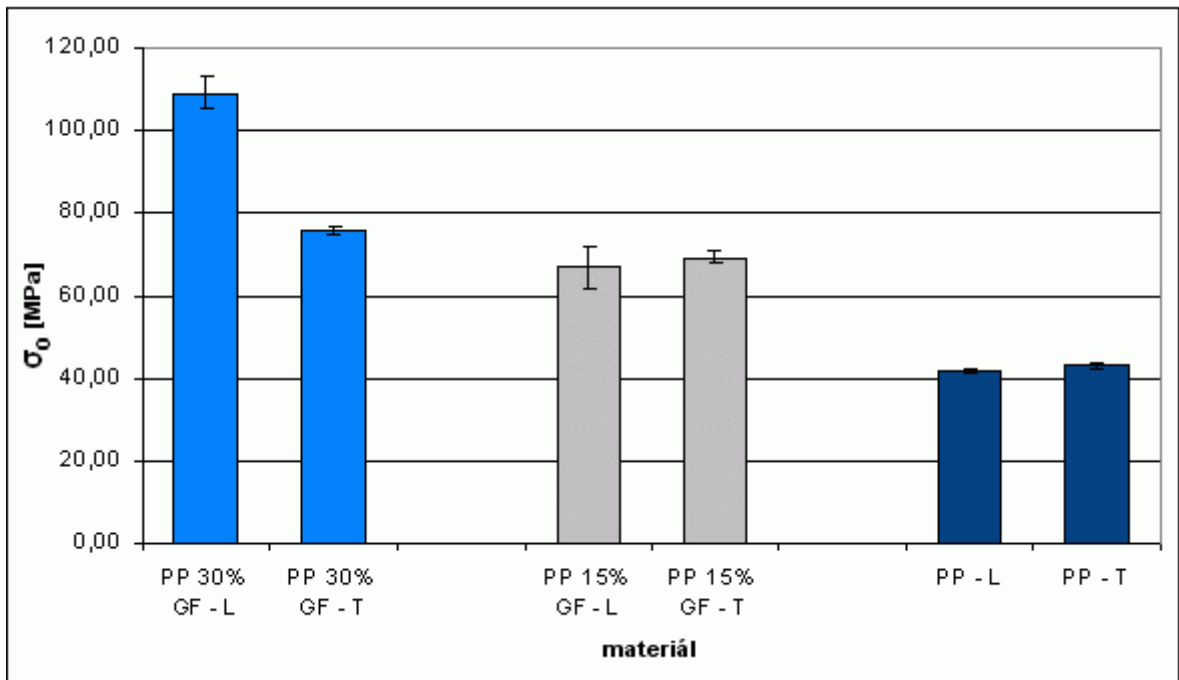
Měření bylo provedeno pouze na vzorcích vstříkovaných filmovým vtokovým ústím. Vzorky byly dále řezány na zkušební tyčinky, a to ve dvou směrech řezu. Jeden směr byl ve směru vláken (*směr L*) a druhý směr byl kolmý na směr vláken (*směr T*). Zkouška byla provedena pro každý materiál na 5ti vzorcích. Měřena byla pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v následujících tabulkách a dále graficky znázorněny.

Tab. 7. Tabulka hodnot pevnosti v ohybu v MPa pro jednotlivé typy materiálů

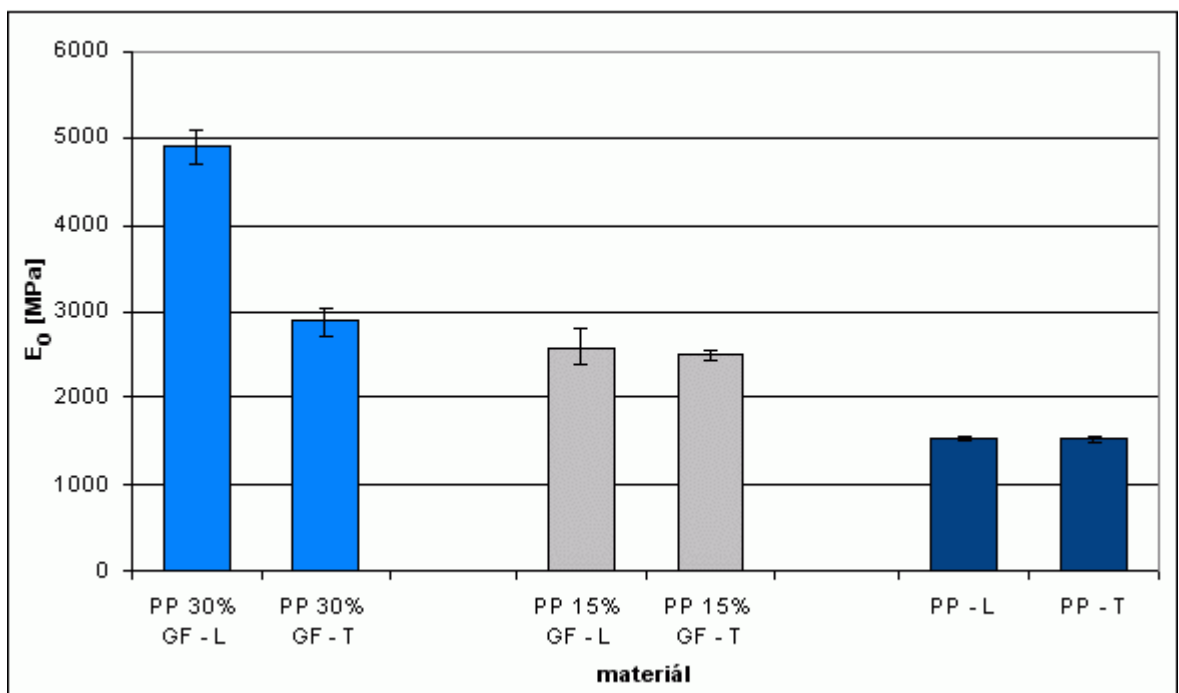
| <i>měř. č.</i> | <i>PP 30% GF směr L</i> | <i>PP 30% GF směr T</i> | <i>PP 15% GF směr L</i> | <i>PP 15% GF směr T</i> | <i>PP směr L</i> | <i>PP směr T</i> |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 114,54 | 76,96 | 64,47 | 68,24 | 42,61 | 43,54 |
| 2 | 108,40 | 74,03 | 73,89 | 68,25 | 42,05 | 43,59 |
| 3 | 105,11 | 75,00 | 69,50 | 69,67 | 41,18 | 41,76 |
| 4 | 111,77 | 76,08 | 61,28 | 71,72 | 41,44 | 42,35 |
| 5 | 105,72 | 75,72 | 63,48 | 67,82 | 41,51 | 43,36 |
| σ_o [MPa] | 109,11 | 75,56 | 66,52 | 69,14 | 41,76 | 42,92 |
| sm. odch. | 3,59 | 0,99 | 4,56 | 1,43 | 0,51 | 0,73 |
| výběr. s. o. | 4,02 | 1,11 | 5,10 | 1,60 | 0,57 | 0,82 |

Tab. 8. Tabulka hodnot modulu pružnosti v ohybu v MPa pro jednotlivé typy materiálů

| <i>měř. č.</i> | <i>PP 30% GF směr L</i> | <i>PP 30% GF směr T</i> | <i>PP 15% GF směr L</i> | <i>PP 15% GF směr T</i> | <i>PP směr L</i> | <i>PP směr T</i> |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 5184 | 3014 | 2536 | 2490 | 1568 | 1549 |
| 2 | 4849 | 2607 | 2894 | 2434 | 1553 | 1549 |
| 3 | 4683 | 2898 | 2717 | 2498 | 1501 | 1490 |
| 4 | 4979 | 2958 | 2372 | 2610 | 1508 | 1490 |
| 5 | 4776 | 2930 | 2433 | 2440 | 1518 | 1503 |
| E_o [MPa] | 4894 | 2881 | 2590 | 2494 | 1529 | 1516 |
| sm. odch. | 174 | 142 | 192 | 63 | 26 | 27 |
| výběr. s. o. | 195 | 159 | 214 | 71 | 29 | 30 |



Obr. 35. Hodnoty pevnosti v ohybu pro jednotlivé materiály a směry řezu



Obr. 36. Hodnoty modulu pružnosti v ohybu pro jednotlivé materiály a směry řezu

7.2.3 Závěr

Při této zkoušce byl posuzován vliv směru orientace vláken na pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu. Největší vliv byl podle očekávání u vzorků z PP 30% GF, kde v podélném směru vláken – L vzorky vykazaly mnohem vyšší hodnotu pevnosti v ohybu než

ve směru příčném – T. Naopak u vzorků z PP 15% GF a PP neměl směr řezu téměř žádný vliv.

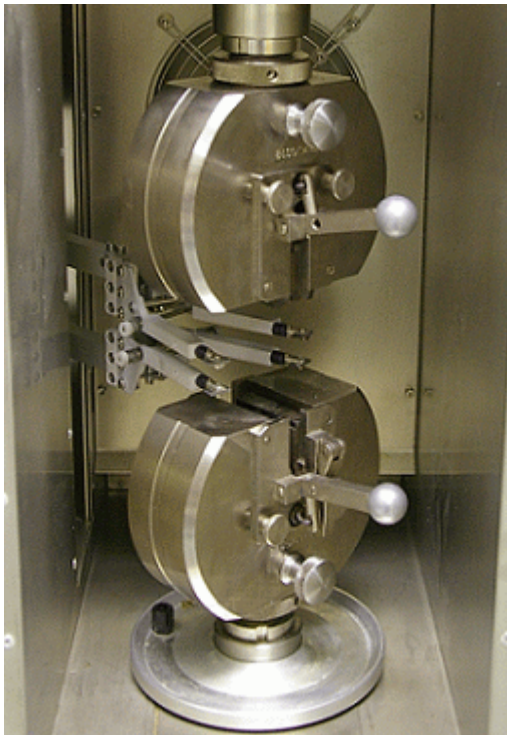
Podobné výsledky vyšly i při měření modulu pružnosti v ohybu. Nejvyšší vliv byl opět u PP 30% GF, kde ve směru L byly dosaženy mnohem vyšší hodnoty než ve směru T. U vzorků z PP 15% GF a PP se směry řezu na výsledcích téměř neprojevíly.

7.3 Tahová zkouška

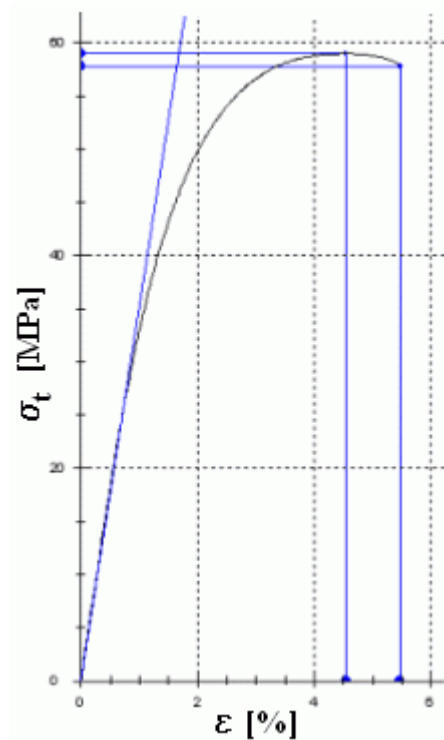
7.3.1 Princip

Zkušební tyčinka o rozměrech 10 x 3 x 100 mm je upnuta v čelistech universálního zkušebního stroje **ZWICK 1456**. Horní upínací čelist je pohyblivá a konstantní rychlostí 10 mm/min tyčinku natahuje. Se zvyšující se silou se tyčinka zužuje až do okamžiku jejího přetržení. Při průběhu tahové zkoušky je zároveň na monitoru vykreslován tahový diagram.

Tato zkouška díky své jednoduchosti patří k nejpoužívanějším zkouškám ke stanovení mechanických vlastností materiálu. Umožňuje zjistit modul pružnosti v tahu, pevnost v tahu a Poissonovo číslo.



Obr. 37. Princip tahové zkoušky



Obr. 38. Tahový diagram (PP 30% GF - L)

7.3.2 Výsledky měření

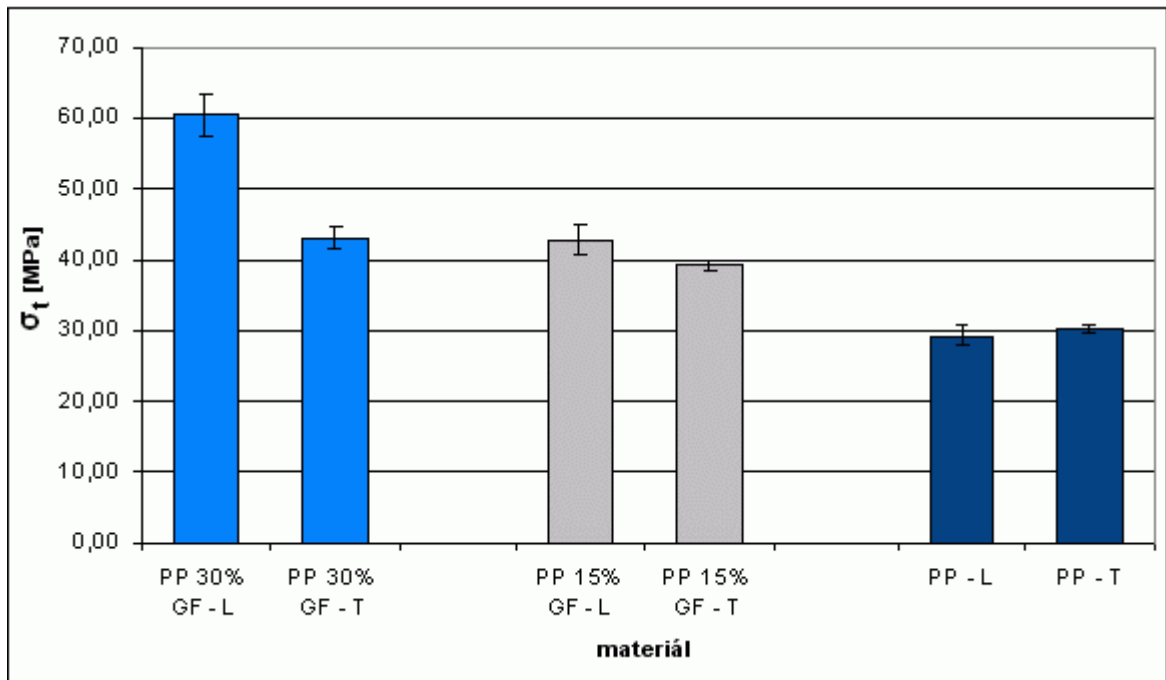
Měření bylo provedeno pouze na vzorcích vstříkovaných filmovým vtokovým ústím. Vzorky byly dále řezány na zkušební tyčinky, a to ve dvou směrech řezu. Jeden směr byl ve směru vláken (*směr L*) a druhý směr byl kolmý na směr vláken (*směr T*). Zkouška byla provedena pro každý materiál na 5ti vzorcích. Měřena byla pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v následujících tabulkách a dále graficky znázorněny.

Tab. 9. Tabulka hodnot pevnosti v tahu v MPa pro jednotlivé typy materiálů

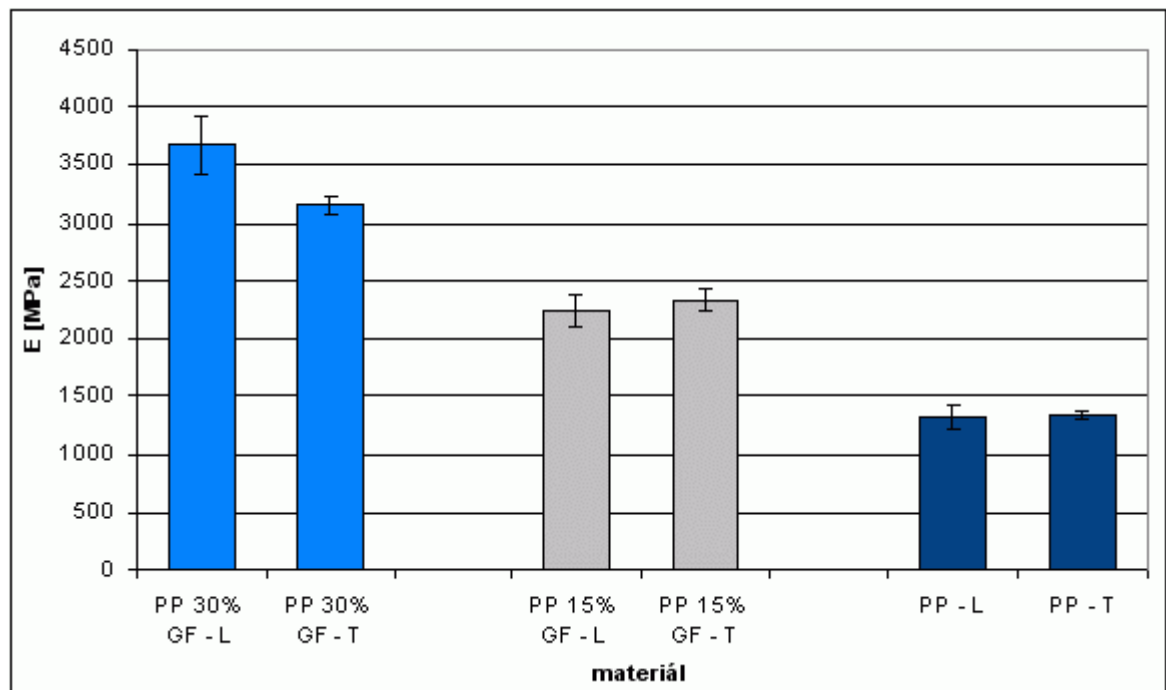
| <i>měř. č.</i> | <i>PP 30% GF směr L</i> | <i>PP 30% GF směr T</i> | <i>PP 15% GF směr L</i> | <i>PP 15% GF směr T</i> | <i>PP směr L</i> | <i>PP směr T</i> |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 65,67 | 43,14 | 41,56 | 38,59 | 31,01 | 30,65 |
| 2 | 57,75 | 42,20 | 41,93 | 38,75 | 27,87 | 29,67 |
| 3 | 60,12 | 42,37 | 40,96 | 39,75 | 29,04 | 29,82 |
| 4 | 60,56 | 42,26 | 46,08 | 40,11 | 28,18 | 30,70 |
| 5 | 58,98 | 45,56 | 43,06 | 38,56 | 30,46 | 30,69 |
| <i>σ [MPa]</i> | 60,62 | 43,11 | 42,72 | 39,15 | 29,31 | 30,31 |
| <i>sm. odch.</i> | 2,71 | 1,27 | 1,82 | 0,65 | 1,24 | 0,46 |
| <i>výběr. s. o.</i> | 3,03 | 1,42 | 2,03 | 0,73 | 1,38 | 0,52 |

Tab. 10. Tabulka hodnot modulu pružnosti v tahu v MPa pro jednotlivé typy materiálů

| <i>měř. č.</i> | <i>PP 30% GF směr L</i> | <i>PP 30% GF směr T</i> | <i>PP 15% GF směr L</i> | <i>PP 15% GF směr T</i> | <i>PP směr L</i> | <i>PP směr T</i> |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 3893 | 3064 | 2198 | 2228 | 1462 | 1336 |
| 2 | 3335 | 3155 | 2197 | 2489 | 1223 | 1289 |
| 3 | 3674 | 3248 | 2052 | 2322 | 1288 | 1362 |
| 4 | 3922 | 3187 | 2444 | 2331 | 1252 | 1376 |
| 5 | 3526 | 3116 | 2300 | 2265 | 1405 | 1365 |
| <i>E [MPa]</i> | 3670 | 3154 | 2238 | 2327 | 1326 | 1345 |
| <i>sm. odch.</i> | 222 | 63 | 130 | 89 | 92 | 31 |
| <i>výběr. s. o.</i> | 248 | 70 | 145 | 100 | 103 | 35 |



Obr. 39. Hodnoty pevnosti v tahu pro jednotlivé materiály a směry řezu



Obr. 40. Hodnoty modulu pružnosti v tahu pro jednotlivé materiály a směry řezu

7.3.3 Závěr

Při této zkoušce byl posuzován vliv směru orientace vláken na pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu. U hodnot pevnosti v tahu se vliv orientace nejvíce projevil u vzorků PP

30% GF, kde v podélném směru vláken – L vzorky vykázaly mnohem vyšší hodnotu pevnosti v tahu než ve směru příčném – T. Naopak u vzorků z PP 15% GF a PP neměl směr řezu téměř žádný vliv.

Podobné výsledky vyšly i při měření modulu pružnosti v tahu. Nejvyšší vliv byl opět u PP 30% GF, kde ve směru L byly dosaženy mnohem vyšší hodnoty než ve směru T. U vzorků z PP 15% GF a PP se směry řezu na výsledcích téměř neprojevíly.

7.4 Zkouška vrubové houževnatosti

7.4.1 Princip

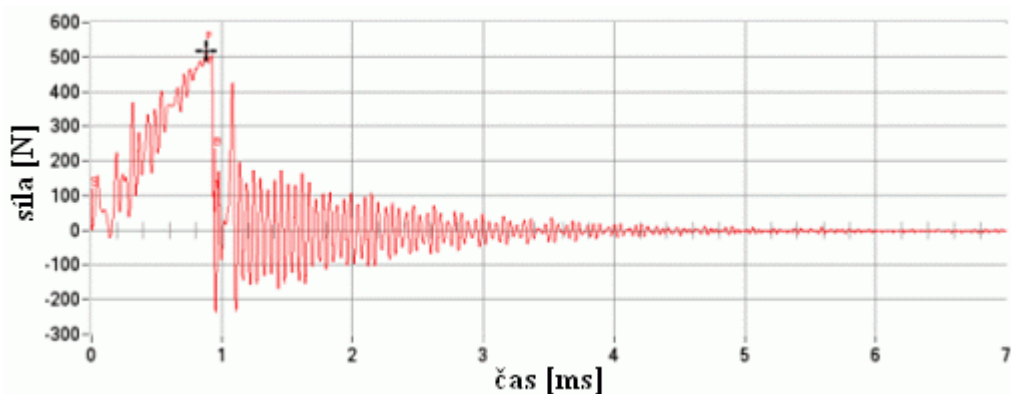
Jedná se o dynamickou zkoušku mechanických vlastností, která se provádí na tzv. *Charpyho kladivu* (viz obr. 42). Princip zkoušky spočívá v přeražení zkušební tyčinky (o rozměrech 10 x 3 x 100 mm) jedním rázem. Zkušební tyčinka, umístěná na podporách kladiva, je zeslabená o vrub tvaru V hloubky 2 mm. Kladivo o hmotnosti G na tyčinku dopadá z výšky h_1 a po jejím přeražení se vyhoupne do výšky h_2 . Odtud se pak nárazová práce spočítá ze vztahu

$$K = G \cdot (h_1 - h_2) \quad [J] \quad (16)$$

a vrubová houževnatost vztažená na průřez zeslabený o vrub pak ze vztahu

$$KCV = \frac{K}{S_0} \quad \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (17)$$

Zkouška byla provedena na zkušebním stroji **CEAST RESIL IMPACTOR junior**, který využívá ke zpracování naměřených dat programu *DAS8WIN Extended Version* © CEAST.



Obr. 41. Grafické vyhodnocení měření pro PP 30% GF – směr T



Obr. 42. CEAST RESIL IMPACTOR junior

Tab. 11. Technické údaje stroje CEAST RESIL IMPACTOR junior

| | |
|----------------------------------|------------|
| Hmotnost kladiva | 2,186 [kg] |
| Délka kladiva | 0,375 [m] |
| Počáteční úhel vychýlení kladiva | 50 [°] |
| Nárazová energie | 2,87 [J] |
| Nárazová rychlost | 1,62 [m/s] |

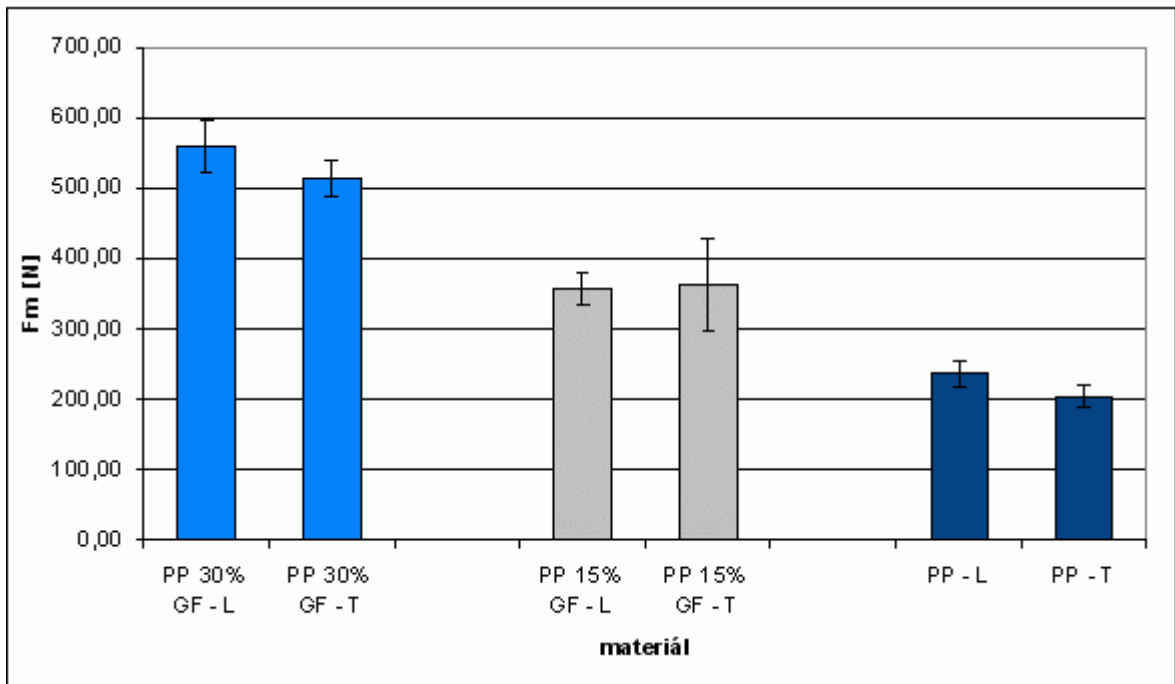
7.4.2 Výsledky měření

Tato zkouška byla provedena pouze na vzorcích vyrobených filmovým vtokovým ústím. Z těchto vzorků pak byly řezány zkušební tyčinky, a to ve směru vláken – *směr L* a ve směru příčném – *směr T*. Měření bylo provedeno pro každý materiál na 5ti vzorcích.

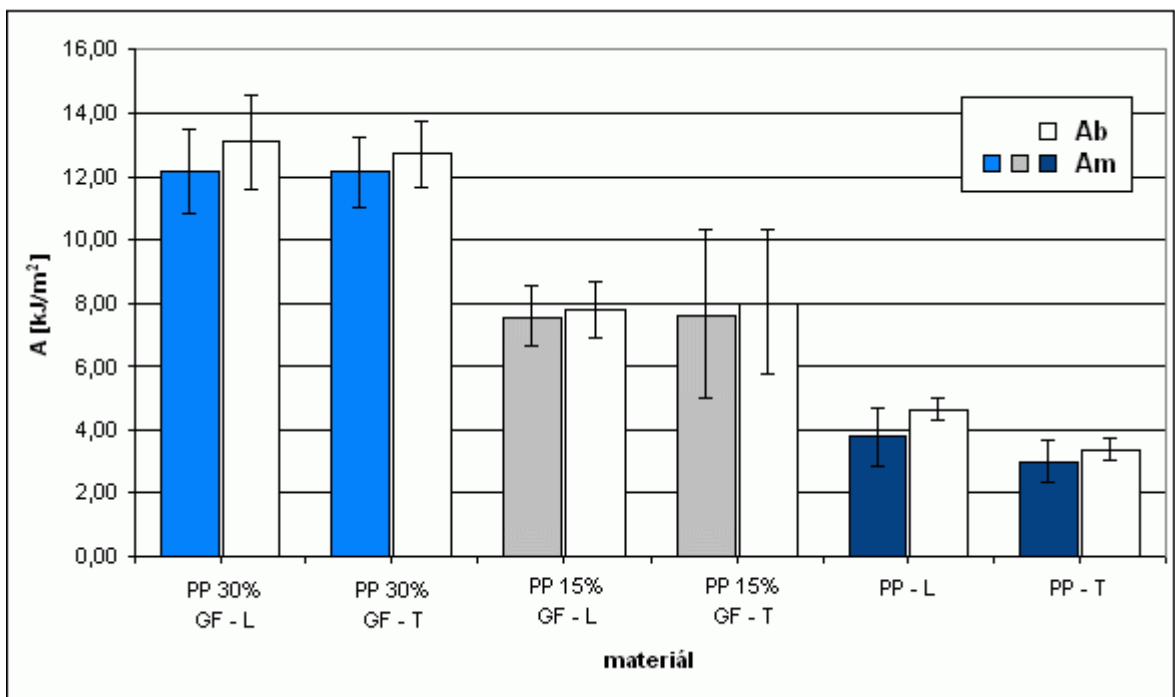
Tab. 12. Vrubová houževnatost jednotlivých materiálů

| | F_m [N] | A_m [kJ/m ²] | A_b [kJ/m ²] |
|------------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|
| PP 30% směr L | 599,47 | 13,08 | 13,92 |
| | 539,93 | 10,93 | 11,44 |
| | 590,00 | 14,04 | 15,14 |
| | 553,46 | 11,24 | 12,92 |
| | 511,51 | 11,49 | 12,02 |
| průměr | 558,87 | 12,16 | 13,09 |
| směr. odchylka | 32,40 | 1,20 | 1,33 |
| výběrová sm. o. | 36,22 | 1,34 | 1,48 |

| | | | |
|------------------------|---------------|--------------|--------------|
| PP 30% směr T | 515,57 | 11,24 | 12,51 |
| | 529,10 | 12,54 | 12,84 |
| | 516,92 | 12,60 | 13,04 |
| | 468,21 | 10,81 | 11,16 |
| | 535,87 | 13,53 | 14,03 |
| průměr | 513,13 | 12,14 | 12,72 |
| směr. odchylka | 23,71 | 0,99 | 0,93 |
| výběrová sm. o. | 26,51 | 1,10 | 1,04 |
| PP 15% směr L | 391,07 | 9,13 | 9,29 |
| | 342,36 | 7,22 | 7,40 |
| | 338,30 | 7,38 | 7,53 |
| | 339,65 | 6,46 | 6,93 |
| | 373,48 | 7,67 | 7,87 |
| průměr | 356,97 | 7,57 | 7,80 |
| směr. odchylka | 21,44 | 0,88 | 0,80 |
| výběrová sm. o. | 23,97 | 0,98 | 0,90 |
| PP 15% směr T | 391,07 | 9,25 | 9,41 |
| | 255,75 | 3,65 | 4,89 |
| | 419,49 | 10,77 | 10,92 |
| | 345,07 | 7,28 | 7,49 |
| | 403,25 | 7,22 | 7,41 |
| průměr | 362,93 | 7,63 | 8,02 |
| směr. odchylka | 59,03 | 2,39 | 2,04 |
| výběrová sm. o. | 66,00 | 2,67 | 2,28 |
| PP směr L | 232,75 | 2,68 | 4,81 |
| | 219,22 | 3,93 | 4,04 |
| | 263,87 | 4,78 | 4,91 |
| | 219,22 | 4,48 | 4,62 |
| | 243,58 | 2,93 | 4,71 |
| průměr | 235,73 | 3,76 | 4,62 |
| směr. odchylka | 16,78 | 0,83 | 0,30 |
| výběrová sm. o. | 18,76 | 0,93 | 0,34 |
| PP směr T | 178,62 | 2,90 | 3,01 |
| | 204,33 | 3,23 | 3,59 |
| | 217,87 | 1,85 | 3,02 |
| | 207,04 | 3,44 | 3,72 |
| | 213,81 | 3,42 | 3,51 |
| průměr | 204,33 | 2,97 | 3,37 |
| směr. odchylka | 13,72 | 0,59 | 0,30 |
| výběrová sm. o. | 15,34 | 0,66 | 0,33 |



Obr. 43. Hodnota maximální síly pro vrubovou houževnatost jednotlivých materiálů



Obr. 44. Hodnota maximální vrubové houževnatosti a vrubové houževnatosti při síle F_m

7.4.3 Závěr

Při zkoušce vrubové houževnatosti se dospělo k závěru, že nejvyšší vrubovou houževnatost mají vzorky plněné 30% GF, dále pak plněné 15% GF a nejmenší vrubovou houževnatost

mají vzorky z neplněného PP. Z grafu je dále zřejmé, že orientace vláken nemá na hodnotu vrubové houževnatosti téměř žádný vliv.

Obdobné výsledky vyšly i u maximální síly vykonané při přeražení tyčinky. Nejvyšší maximální síla byla vykonána u vzorků z PP 30% GF, dále pak PP 15% GF a nejnižší u neplněného PP. Zde se však už nepatrně podepsal vliv orientace vláken. Vzorky, s vlákny uspořádanými ve směru L, vykazovaly vyšší hodnotu maximální síly F_m než vzorky s vlákny uspořádanými ve směru T.

8 VÝPOČET POISSONOVA ČÍSLA

Na základě naměřených hodnot z 2D zkoušky kruhové desky a tříbodové ohybové zkoušky bylo stanoveno Poissonovo číslo a porovnáno s tabulkovou hodnotou.

8.1 Princip biaxiálního ohybového testu

Princip zkoušky ohybové tuhosti desky při biaxiálním ohybu je znázorněn na *obr. 45*. Zkušební prvek tvoří kruhová deska, po obvodu prostě podepřená. Na rozdíl od standardního jednoosého ohybového testu je nutno realizovat podepření na vnějším obvodu, tj. bez přečnívajících okrajů. Přečnívající okraje by totiž na rozdíl od 1D zkoušky nebyly bez napětí. Ke splnění této okrajové podmínky slouží kuželový tvar dosedací plochy zkušební přípravku.

Z mechanického hlediska je daný případ rotačně symetrickým biaxiálním ohybem kruhové desky. Lineárně elastické chování těchto případů vyjadřuje diferenciální rovnice (Eulerova), kterou lze sestavit ve tvaru

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r\psi) \right] = \frac{t(r)}{D} . \quad (18)$$

Její integrací lze při daných okrajových podmínkách určit deformaci ve formě funkce natočení (původně válcových) obvodových řezů $\psi(r)$, a tím i ohybové momenty m_φ , m_r a průhyb desky. Pro konkrétní případ kruhové desky nutno nejdříve určit z rovnováhy svislých sil části desky, vydělené obvodovým řezem o poloměru r , rozdělení příčných sil v obvodových průřezech desky $t(r)$.

Integrační konstanty jsou pak dány příslušnými okrajovými podmínkami. Podmínka pro $r=0$ je společná všem případům, neboť v důsledku symetrie vždy $\psi=0$. Středová část vymezená průměrem zkušebního trnu představuje případ kruhové desky zatížené ohybovým momentem rovnoměrně rozloženým po obvodu. Příčná síla t v obvodových řezech desky je v této oblasti zřejmě nulová. Integrací rovnice (18) tak pro $t=0$ obdržíme funkci ψ ve tvaru

$$\psi(r) = C_1 r + \frac{C_2}{r} . \quad (19)$$

Integrační konstanty vyplynou z okrajových podmínek:

- 1) pro $r=0$ je $\psi=0$
- 2) pro $r=R$ je $m_r=m$.

Z první podmínky je $C_2=0$, takže $\psi(r)=C_1r$ a křivosti střední plochy desky v obvodovém a radiálním směru jsou

$$\frac{\psi}{r} = C_1, \quad \frac{d\psi}{dr} = C_1$$

Deformační plocha střednice desky je tak plocha kulová. Zřejmě je tak

$$m_r(R) = m = DC_1(1+\nu), \quad C_1 = \frac{1}{\rho} = \frac{m}{E^*j}.$$

Natočení na obvodu desky činí

$$\psi(r) = C_1R = \frac{mR}{E^*j}$$

a pro obvodové a radiální ohybové momenty v desce vyplývá

$$m_\varphi = m_r = DC_1(1+\nu) = m.$$

Hodnota m je v oblasti lineární elasticity přímoúměrná zatěžující síle F . Pro hodnotu maximálního průhybu uprostřed desky lze odvodit vztah

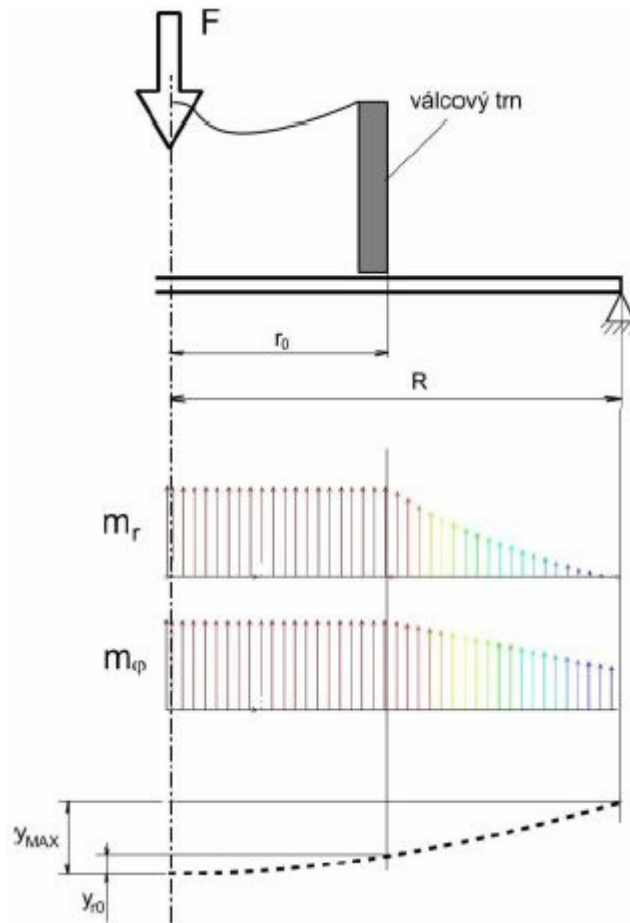
$$y_{\max} = \frac{Fr_0^2}{E^*j} K_2, \quad (20)$$

$$\text{kde} \quad K_2 = \frac{1}{16\pi} \left[(3+\nu) \left(\frac{R^2}{r_0^2} - 1 \right) - 2(1+\nu) \ln \frac{R}{r_0} \right].$$

Jak je znázorněno na *obr. 45*, průhyb snímaný posuvem zkušebního trnu je menší o hodnotu y_{r0} , pro kterou platí

$$y_{r0} = \frac{Fr_0^2}{E^*j} K_1, \quad (21)$$

$$\text{kde} \quad K_1 = \frac{1}{254\pi} \left[2(1+\nu) \ln \frac{R}{r_0} + (1-\nu) \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) \right].$$



Obr. 45. Princip rotačně symetrické biaxiální zkoušky ohybem kruhové desky

Hodnota průhybu pod zkušebním trnem je dána rozdílem

$$y = y_{\max} - y_{r_0} , \quad (22)$$

který je vyjádřen vztahy (20) a (21). Odtud pak již vyplývá hodnota sférického modulu pružnosti v ohybu dané struktury E^* , který je dán vztahem

$$E^* = E / (1 - \nu) .$$

Porovnáním s výsledky jednoosé ohybové zkoušky odtud vyplývá efektivní hodnota Poissonova poměru v ohybu

$$\nu = 1 - \frac{E}{E^*} . \quad (23)$$

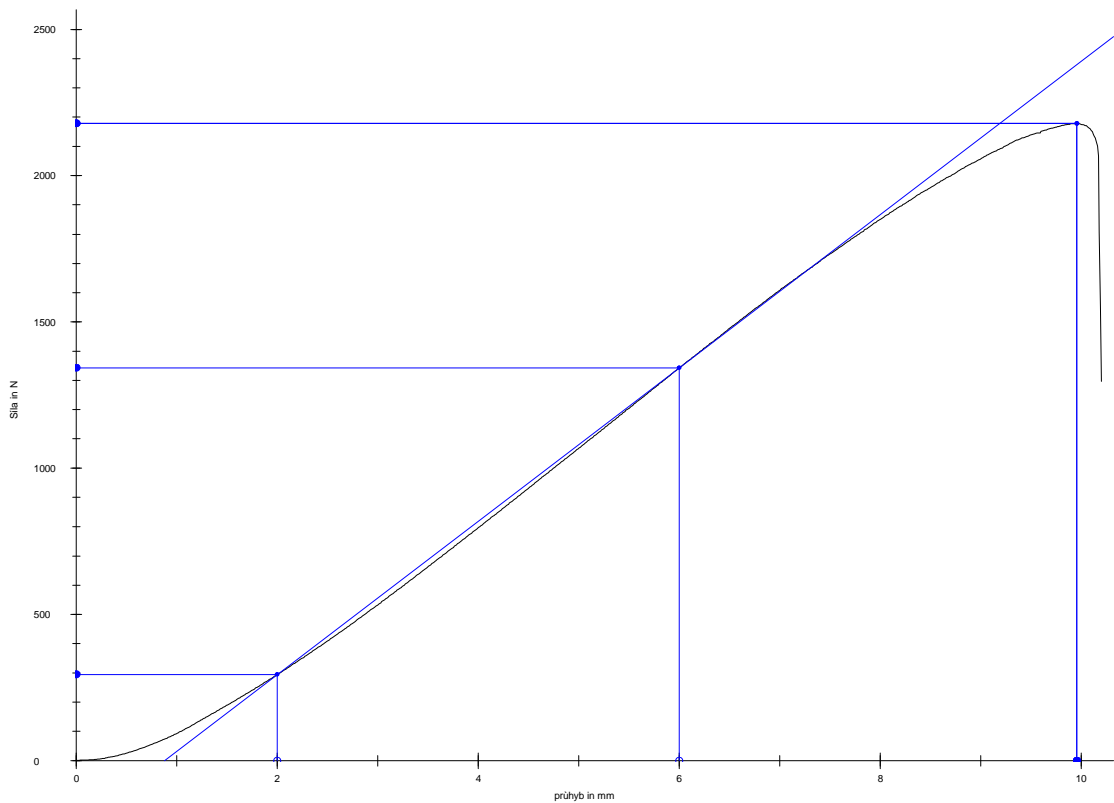
[21]

8.2 Výpočet Poissonova čísla pro PP

Hodnota průhybu pod zkušebním trnem je dána vztahem:

$$y = \frac{F \cdot r_0^2}{E^* \cdot j} \cdot K, \text{ kde } K = K_2 - K_1.$$

Z oblasti lineární elasticity byla pro průhyb $y = 6 \text{ mm}$ odečtena síla $F = 1340 \text{ N}$ (viz obr. 46).



Obr. 46. Závislost síla – průhyb z 2D zkoušky kruhové desky pro PP

$$E^* = \frac{F \cdot r_0^2}{y \cdot j} \cdot K, \text{ kde } K = 0,1168, r_0 = 15 \text{ mm}, j = s^3/12 \text{ mm}^3$$

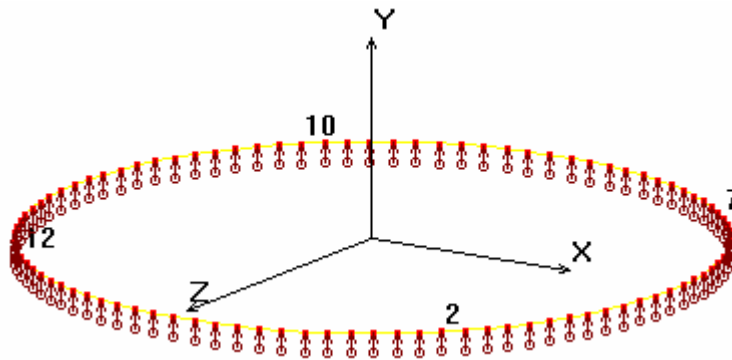
$$E^* = \frac{F \cdot r_0^2}{y \cdot j} \cdot K = \frac{1340 \cdot 15^2}{6 \cdot \frac{3^3}{12}} \cdot 0,1168 = 2609 \text{ MPa}$$

$$\nu = 1 - \frac{E_o}{E^*} = 1 - \frac{1529}{2609} = \underline{\underline{0,41}}$$

Konstanta K byla určena z modelu desky (viz obr. 47) sestaveného v konečně prvkovém programu *COSMOS/M*[®] tak, že pro různé odhadované hodnoty ν' byly při síle $1\,340\text{ N}$ odečítány hodnoty průhybů y' , na základě kterých byla hodnota K stanovena. Hledaná hodnota K byla taková, při které nastala rovnost $\nu' = \nu$.

$$K = \frac{E^* \cdot j \cdot y'}{F \cdot r_0} \quad E^* = \frac{E_o}{1 - \nu'} = \frac{1529}{1 - 0,4} = 2548 \text{ MPa}$$

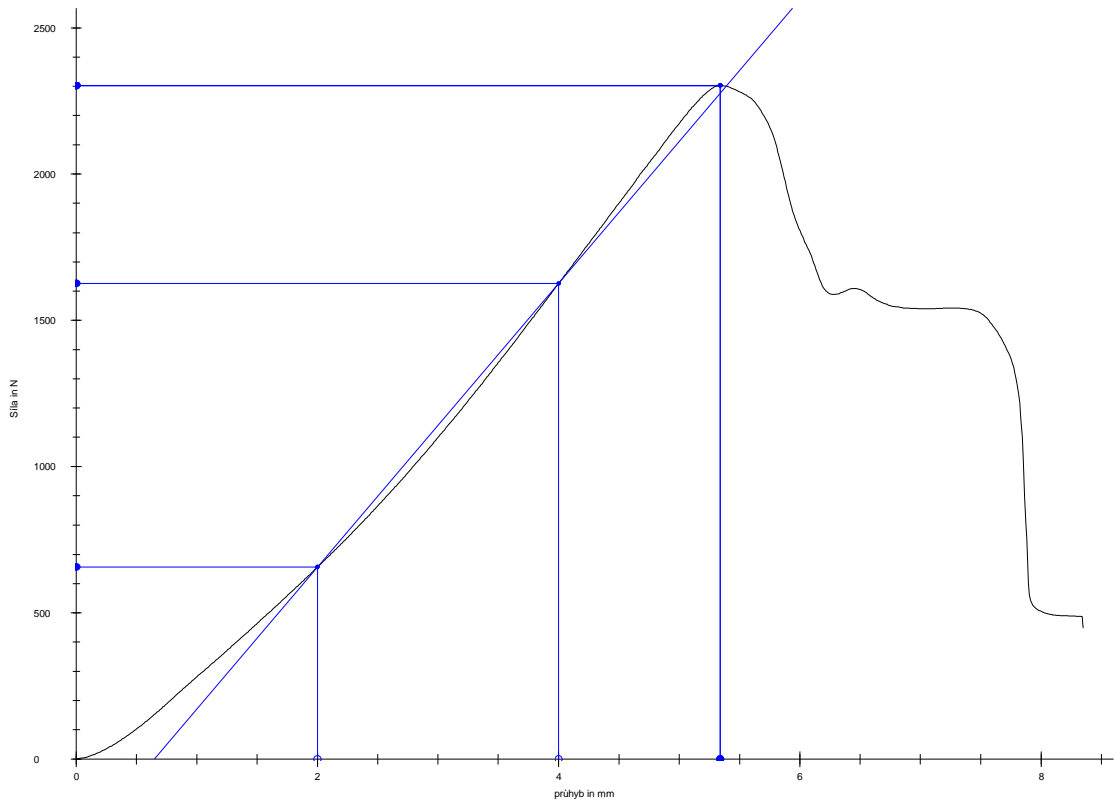
$$K = \frac{E^* \cdot j \cdot y'}{F \cdot r_0^2} = \frac{2548 \cdot \frac{3^3}{12} \cdot 6,14185}{1340 \cdot 15^2} = 0,1168$$



Obr. 47. Model desky sestavený v *COSMOS/M*[®]

8.3 Výpočet Poissonova čísla pro PP 30% GF

Z oblasti lineární elasticity byla pro průhyb $y = 4 \text{ mm}$ odečtena síla $F = 1\,625 \text{ N}$ (viz obr. 48).



Obr. 48. Závislost síla – průhyb z 2D zkoušky kruhové desky pro PP 30% GF

$$E^* = \frac{F \cdot r_0^2}{y \cdot j} \cdot K, \text{ kde } K = 0,1462, r_0 = 15 \text{ mm}, j = \frac{s^3}{12} \text{ mm}^3$$

$$E^* = \frac{F \cdot r_0^2}{y \cdot j} \cdot K = \frac{1625 \cdot 15^2}{4 \cdot \frac{3^3}{12}} \cdot 0,1462 = 5939 \text{ MPa}$$

$$\nu = 1 - \frac{E_o}{E^*} = 1 - \frac{3900}{5939} = \underline{\underline{0,34}}$$

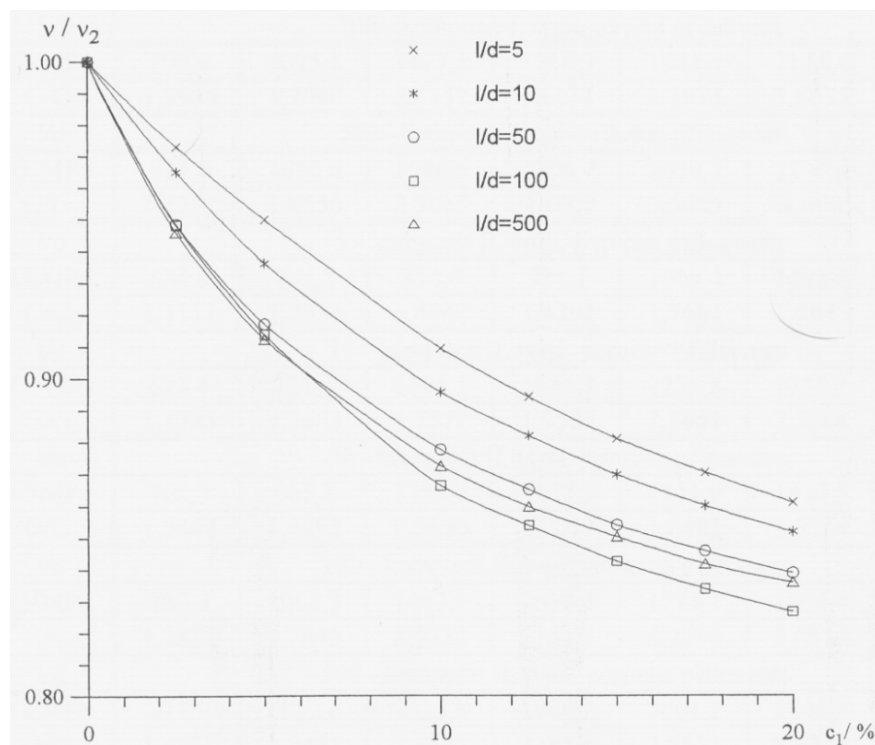
Konstanta K byla určena z modelu desky sestaveného v konečně prvkovém programu *COSMOS/M*[®] tak, že pro různé odhadované hodnoty ν' byly při síle $1\,625 \text{ N}$ odečítány hodnoty průhybů y' , na základě kterých byla hodnota K stanovena. Hledaná hodnota K byla taková, při které nastala rovnost $\nu' = \nu$.

$$K = \frac{E^* \cdot j \cdot y'}{F \cdot r_0} \quad E^* = \frac{E_o}{1 - \nu'} = \frac{3900}{1 - 0,35} = 6000 \text{ MPa}$$

$$K = \frac{E^* \cdot j \cdot y'}{F \cdot r_0^2} = \frac{6000 \cdot \frac{3^3}{12} \cdot 3,95908}{1625 \cdot 15^2} = 0,1462$$

8.4 Závěr

Hodnota Poissonova čísla stanovená na základě biaxiálního ohybového testu vyšla v případě neplněného PP $\nu = 0,41$ a pro PP 30% GF $\nu = 0,34$. Tabulkové hodnoty, z literatury [16], jsou: $\nu_{PP} = 0,40$ a $\nu_{PP30} = 0,34$. Z výsledků je zřejmé, že obě hodnoty se shodují s hodnotami tabulkovými. V následujícím grafu je znázorněna závislost Poissonova čísla neusměrněného kompozitu, uvažovaného jako izotropní materiál, na objemové koncentraci vláken.



Obr. 49. Závislost Poissonova čísla na objemové koncentraci vláken

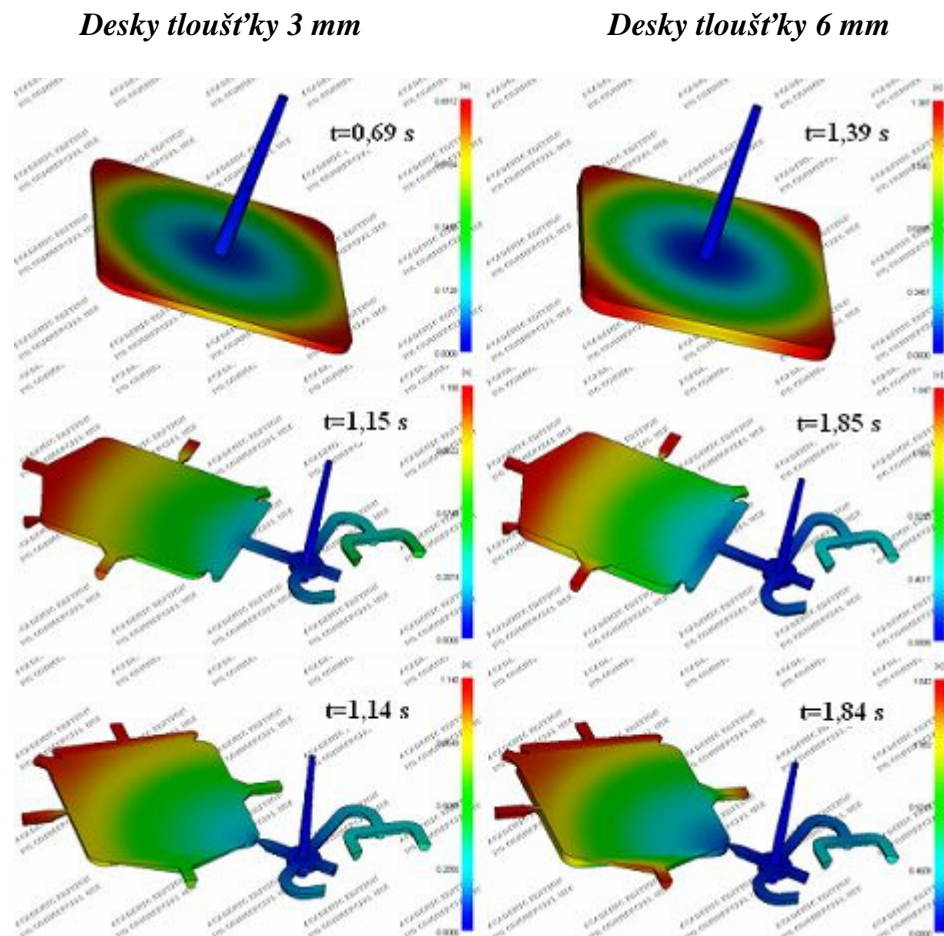
9 TOKOVÉ ANALÝZY VSTŘIKOVACÍ FORMY

Pro názornost vstřikovacího cyklu byly vytvořeny tokové analýzy vstřikovací formy, na kterých je znázorněno plnění vstřikovací formy, orientace vláken ve střední ploše, orientace vláken na povrchu, tlak ve vstřikovací formě a místa vzniku studených spojů. Při simulaci vstřikovacího procesu byly použity totožné parametry jako při vstřikování reálných zkušebních těles.

Simulace vstřikovacího procesu byla vytvořena v programu *Moldflow Plastic Insight 6.2*. Pro srovnání byly vytvořeny také analýzy pro vstřikování desek o tloušťce 6 mm.

9.1 Doba plnění

Jde o analýzu, která zobrazuje postupné zaplňování dutiny formy taveninou. Červeně jsou označena místa, která se zaplní jako poslední.



Obr. 50. Doba plnění pro jednotlivé typy vtokových ústí a tloušťky desek

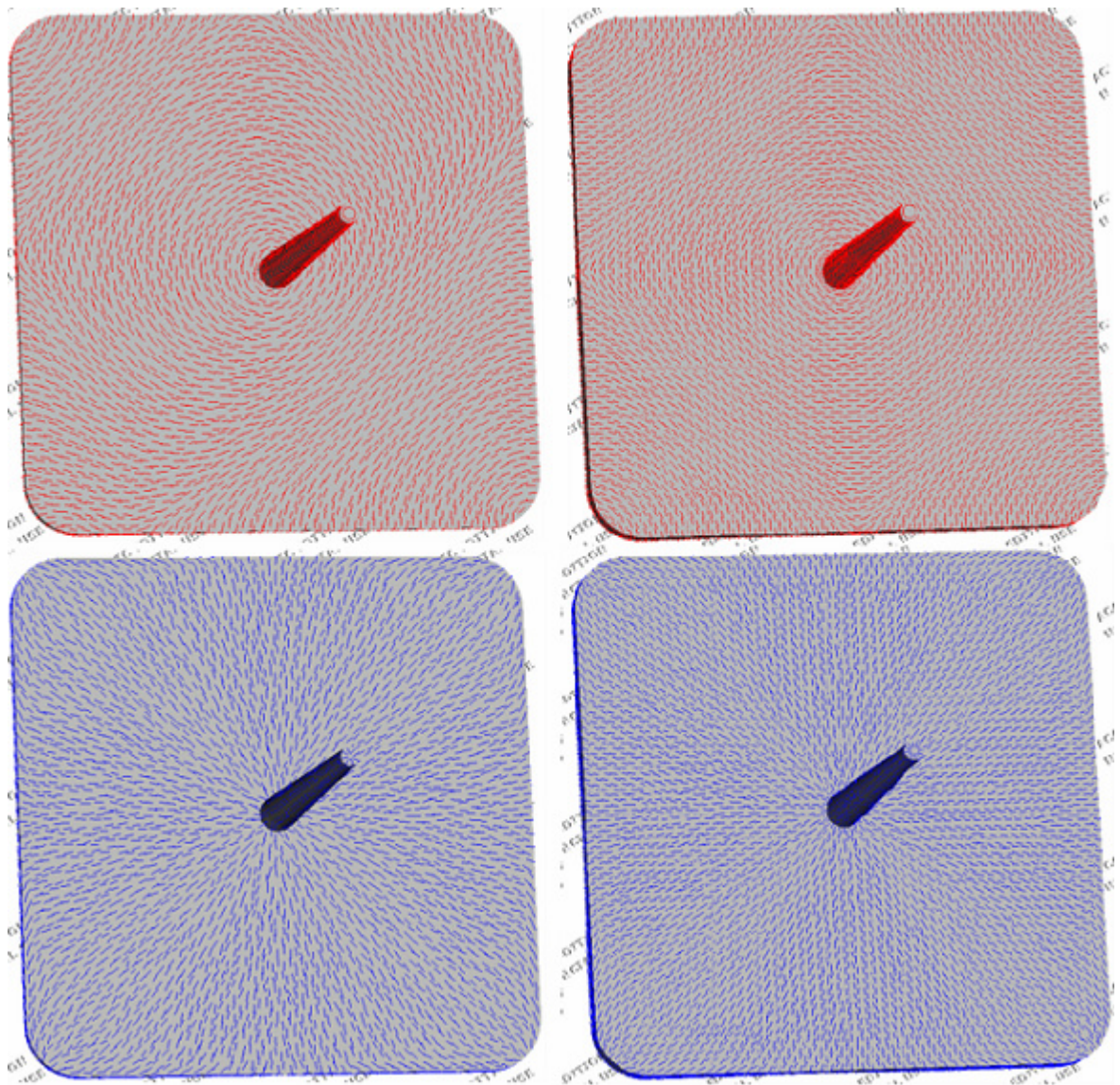
9.2 Orientace vláken

Jedná se o dvě analýzy, které nám zobrazují orientaci vláken na povrchu součásti a orientaci vláken ve střední ploše. Červeně je vyznačena orientace vláken ve střední ploše a modře orientace na povrchu.

9.2.1 Kuželové vtokové ústí

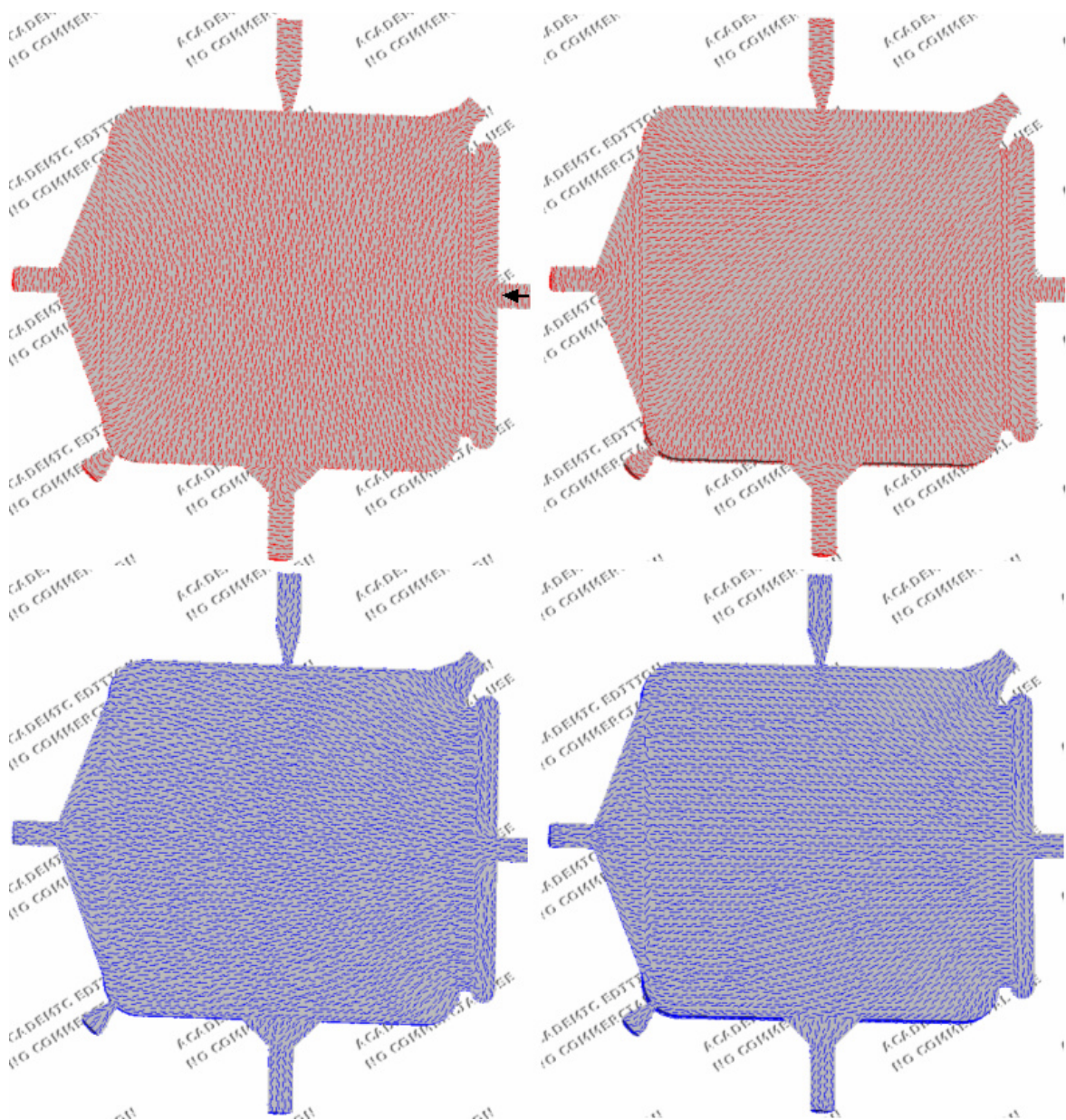
Desky tloušťky 3 mm

Desky tloušťky 6 mm



Obr. 51. Orientace vláken ve střední ploše (červeně) a na povrchu (modře)

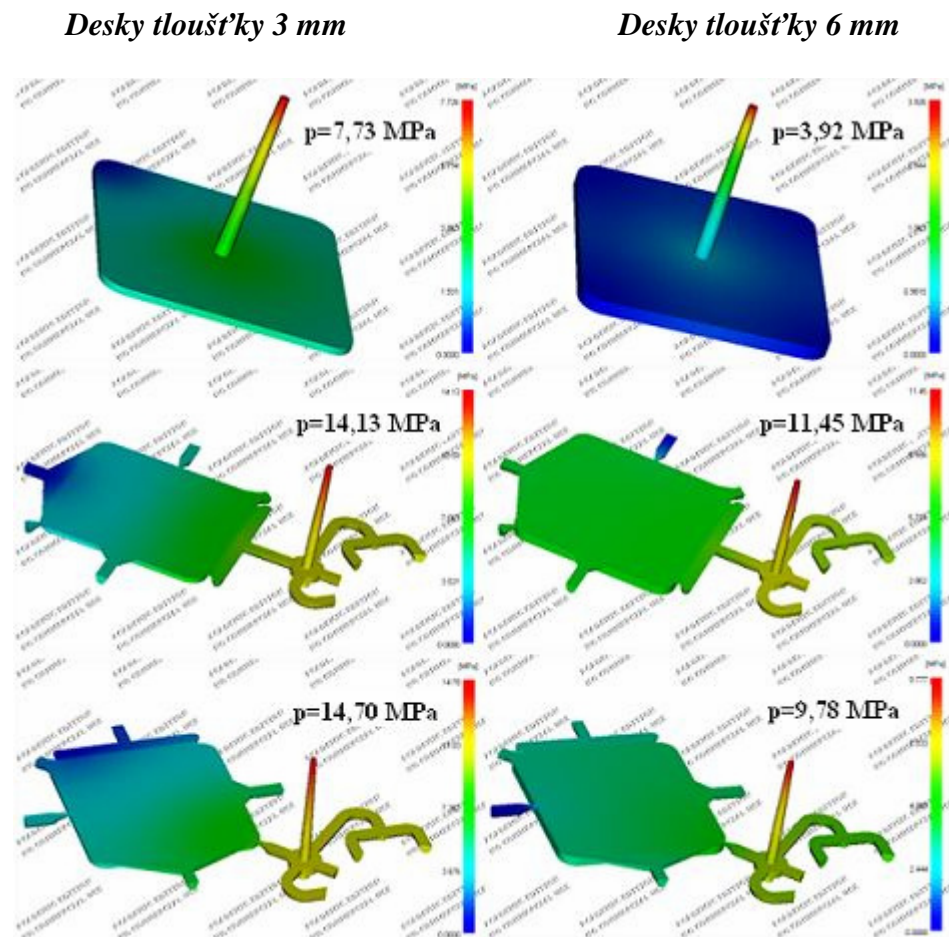
9.2.2 Filmové vtokové ústí

*Desky tloušťky 3 mm**Desky tloušťky 6 mm*

Obr. 52. Orientace vláken ve střední ploše (červeně) a na povrchu (modře)

9.3 Tlak ve vstřikovací formě

Jde o analýzu, která nám zobrazuje velikost tlaku v dutině formy při jejím zaplnění. Červeně jsou označena místa s nejvyšším tlakem a modře místa s tlakem nejnižším.



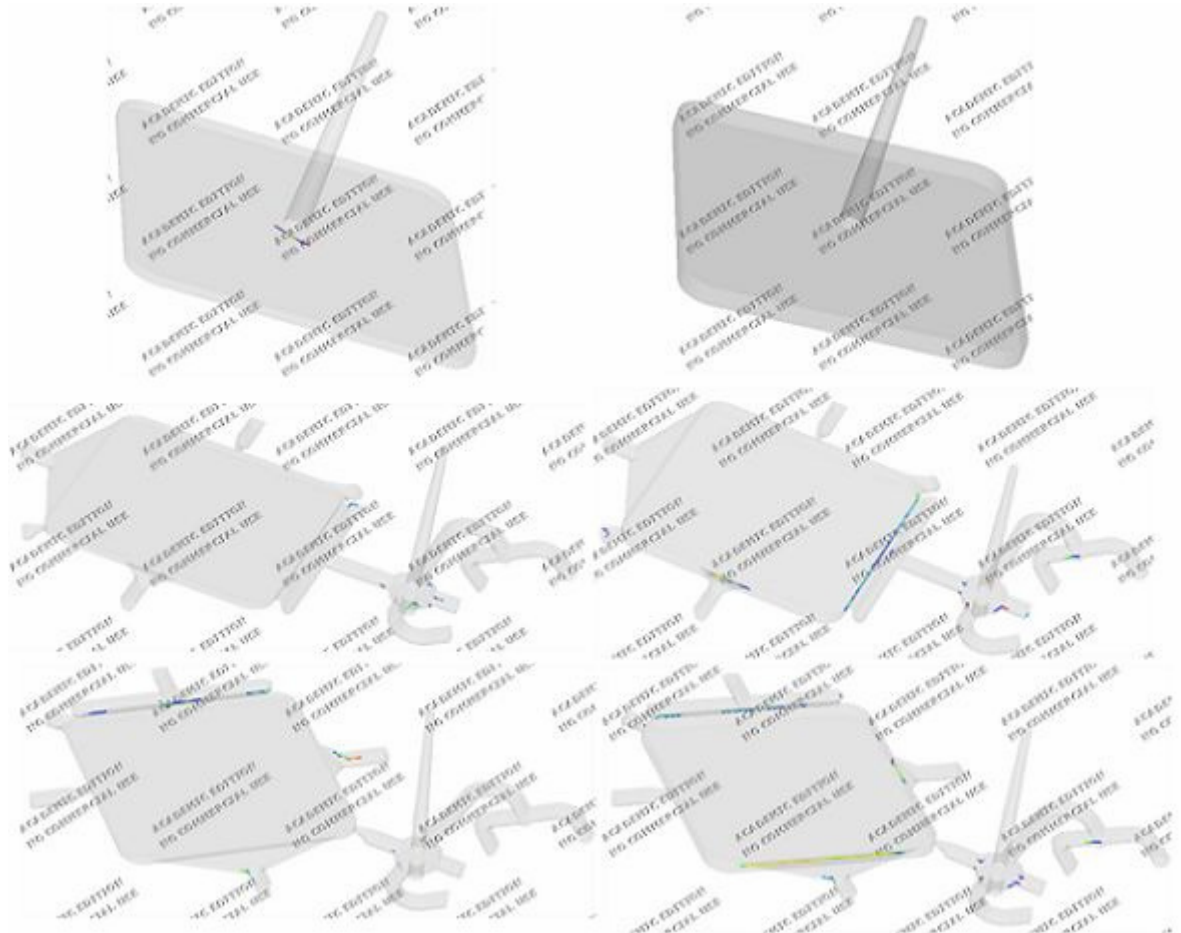
Obr. 54. Tlak v dutině formy pro jednotlivé typy vtokových ústí a tloušťky desek

9.4 Studené spoje

Jde o analýzu zobrazující místa, ve kterých může dojít ke vzniku studených spojů.

Desky tloušťky 3 mm

Desky tloušťky 6 mm



Obr. 55. Místa výskytu studených spojů pro jednotlivé ústí vtoku a tloušťky desek

9.5 Závěr

U analýzy doba plnění vyšly nejdelší časy při použití filmového a bodového vtokového ústí, a to 1,1 s. Při použití kuželového vtokového ústí se dutina formy naplní za 0,7 s. Pro desky o tloušťce 6 mm byly časy přibližně 2x delší.

U analýzy zobrazující orientaci vláken na povrchu desky byly výsledky takové, že u kuželového vtokového ústí se vlákna orientovala kolmo na vtokový kužel, u filmového vtokového ústí byla vlákna orientována převážně ve směru plnění a u bodového vtokového ústí byla vlákna orientována směrem od vtoku umístěného v rohu desky. Vlákna ve střední ploše měla orientaci kolmou na vlákna povrchová. Tloušťka desky neměla na orientaci vláken výraznější vliv.

U analýzy tlak ve vstřikovací formě bylo dosaženo nejvyšších tlaků u filmového a bodového vtokového ústí, a to přibližně 14 MPa . Při použití kuželového vtokového ústí byl tlak $7,7 \text{ MPa}$. U desek o tloušťce 6 mm byl nejvyšší tlak ve vstřikovací formě s použitím filmového vtokového ústí ($p = 11 \text{ MPa}$), dále bodového vtokového ústí ($p = 10 \text{ MPa}$) a nejnižší u kuželového vtokového ústí ($p = 4 \text{ MPa}$).

Poslední analýza nám zobrazuje potenciální místa výskytu studených spojů. Z obrázků je zřejmé, že studené spoje se budou pravděpodobně vyskytovat kolem vtokového kuželu a dále ve zúžených místech výstřiku. Podstatné je, že u žádného vtokového ústí by neměly studené spoje vzniknout v samotné desce.

10 ZKOUMÁNÍ STRUKTURY

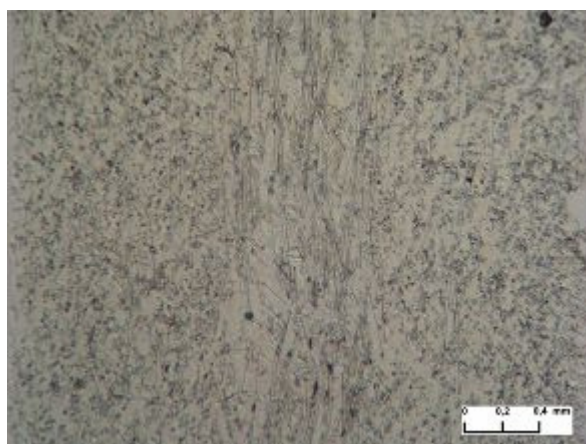
10.1 Mikroskopická zkouška

Pro vzorky vyrobené filmovým vtokovým ústím byly pomocí optického mikroskopu *Zeiss NU* (viz obr. 56) a digitálního fotoaparátu *Sony F-717* pořízeny snímky struktury zkušebních těles s 50ti-násobným zvětšením pro potvrzení představy o orientaci krátkých skleněných vláken u plošných tenkostěnných vstřikovaných výrobků.



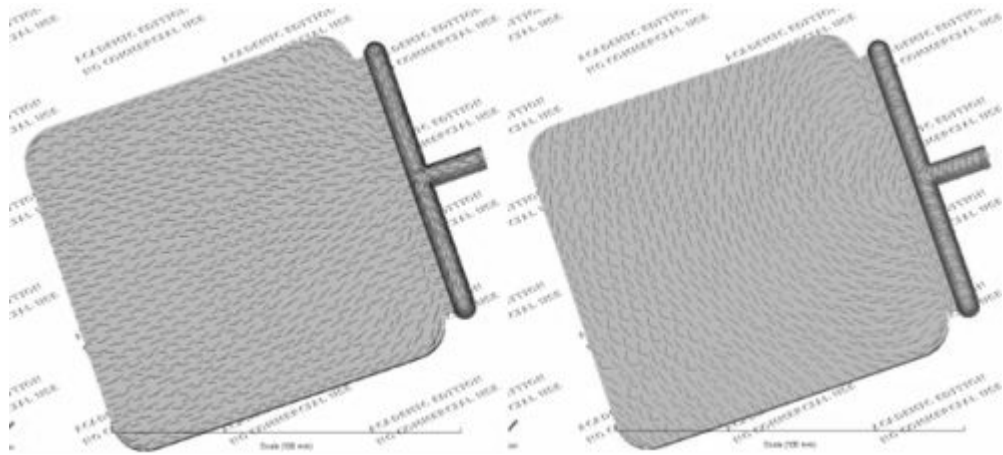
Obr. 56. Optický mikroskop Zeiss NU

U zkušebních těles plněných krátkými skleněnými vlákny byly značné odchylky od orientace ve střední části. Na snímku zobrazeném na obr. 57 je jasně patrná třívrstvá struktura. Z obrázku je také zřejmé, že vlákna ve střední vrstvě mají orientaci potočenou o úhel 90° , tedy orientaci kolmou na směr toku taveniny.



Obr. 57. Orientace vláken po tloušťce stěny

Tento jev nám potvrzují také modely zkušebních vzorků vytvořené v programu *Moldflow Plastic Insight 6.2*. Na *obr. 58* můžeme pozorovat orientaci vláken v povrchové vrstvě a ve střední ploše.

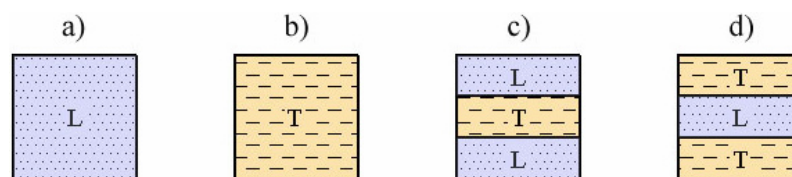


Obr. 58. Orientace vláken v povrchové vrstvě (vlevo) a střední ploše (vpravo)

10.2 Predikce chování struktur na základě strukturních modelů

10.2.1 Modul pružnosti v tahu

K výpočtu efektivních modulů byly sestaveny modely základních struktur (*viz obr. 59*). První dvě struktury *a*, *b* jsou jednoduché modely plně usměrněných struktur. Model *a* má vlákna usměrněná ve směru *L*, model *b* má vlákna usměrněná ve směru *T*.



Obr. 59. Modely struktur

Hodnoty efektivních modulů vypočtené na základě tohoto modelu je třeba brát jako určité hranice, ve kterých se budou pohybovat hodnoty skutečných struktur. Vypočtené hodnoty efektivních modulů budou porovnány s hodnotami zjištěnými experimentálně. Pro porovnání byl vybrán zkušební vzorek vyrobený při použití filmového vtokového ústí. U takto vyrobené desky se předpokládá, že se bude nejvíce blížit idealizované struktuře.

Pozn. Značení efektivních vypočtených modulů je $E_{x/y}$, kde index x udává počet vrstev s orientací vláken ve směru L a index y udává počet vrstev s orientací vláken ve směru T .

Hodnoty zjištěné experimentálně jsou označeny $E_{x/y \text{ exp}}$.

Efektivní modul plně usměrněných struktur a, b

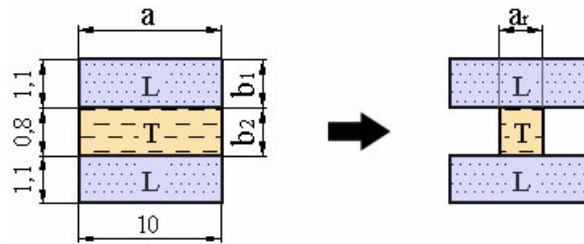
Hodnoty modulů těchto struktur byly zjištěny experimentálně a slouží pro výpočet efektivních modulů dalších struktur.

Hodnoty modulů: $E_L = 7\,320 \text{ MPa}$

$E_T = 1\,773 \text{ MPa}$

Efektivní modul vrstevnatých struktur c, d

Jak již bylo zmíněno, předpokládá se struktura o třech vrstvách (viz obr. 60). V prvním případě jde o model struktury vzorku odebraného ve směru toku taveniny (směr L). Proto mají povrchové vrstvy převažující orientaci vláken ve směru toku a střední vrstva má převažující orientaci vláken kolmou na tok. Poměr tlouštěk je z obr. 57 přibližně 2,2:0,8.

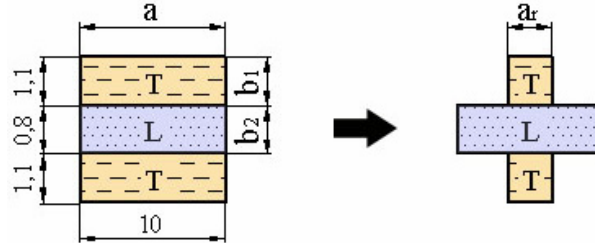


Obr. 60. Redukce šířek modelu c

U takto sestaveného modelu byla potřeba provést redukci šířek a spočítat redukovanou plochu S_r . V tomto případě jde o redukci na modul E_L .

$$a_r = \frac{E_T}{E_L} \cdot a \quad S_r = 2(a \cdot b_1) + a_r \cdot b_2 \quad E_{2/1} = \frac{E_L \cdot S_r}{S}$$

V druhém případě jde o model struktury vzorku odebraného ve směru kolmém na směr toku taveniny (směr T). Proto je orientace vláken v jednotlivých vrstvách opačná než v prvním případě (viz obr. 61).



Obr. 61. Redukce šířek modelu d

Postup výpočtu byl stejný jako pro model c , rozdíl je pouze v redukované ploše S_r .

$$a_r = \frac{E_T}{E_L} \cdot a \quad S_r = 2(a_r \cdot b_1) + a \cdot b_2 \quad E_{1/2} = \frac{E_L \cdot S_r}{S}$$

Výpočet

$$a_r = \frac{E_T}{E_L} \cdot a = \frac{1773}{7320} \cdot 10 = 2,42 \text{ mm}$$

$$S_r = 2(a \cdot b_1) + a_r \cdot b_2 = 2(10 \cdot 1,1) + 2,42 \cdot 0,8 = 23,94 \text{ mm}^2$$

$$S_r = 2(a_r \cdot b_1) + a \cdot b_2 = 2(2,42 \cdot 1,1) + 10 \cdot 0,8 = 13,32 \text{ mm}^2$$

$$E_{2/1} = \frac{E_L \cdot S_r}{S} = \frac{7320 \cdot 23,94}{30} = 5841 \text{ MPa}$$

$$E_{1/2} = \frac{E_L \cdot S_r}{S} = \frac{7320 \cdot 13,32}{30} = 3250 \text{ MPa}$$

Efektivní modul struktury $E_{2/1} = 5\ 841 \text{ MPa}$ a struktury $E_{1/2} = 3\ 250 \text{ MPa}$.

Experimentálně získané moduly

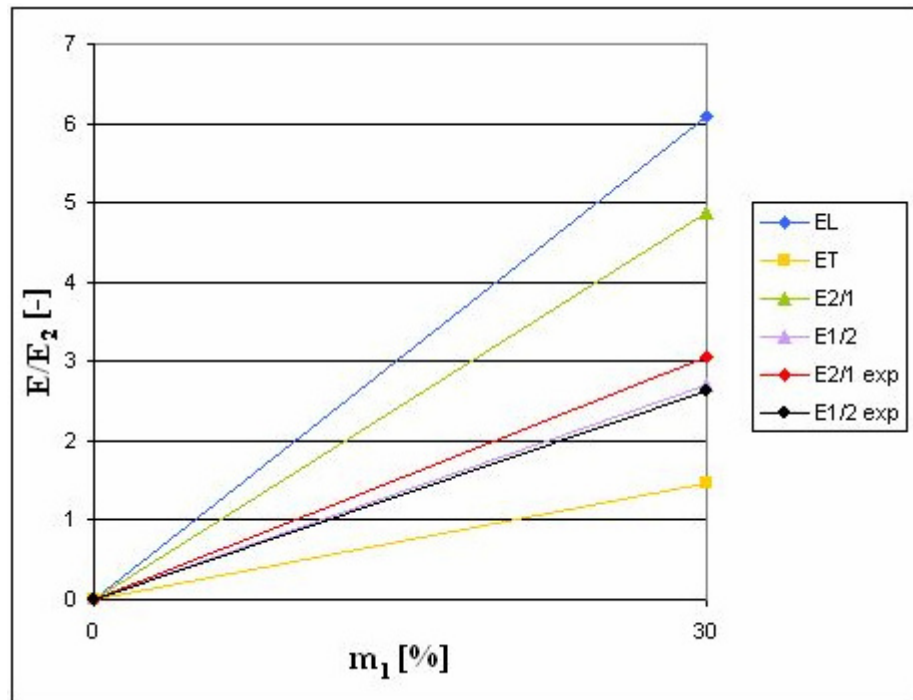
Hodnoty byly získány ze středních hodnot modulů naměřených při tahové zkoušce.

Hodnoty modulů: $E_{2/1 \text{ exp}} = 3\ 670 \text{ MPa}$

$E_{1/2 \text{ exp}} = 3\ 154 \text{ MPa}$

Srovnání efektivních modulů

Pro přehlednost je porovnání uvedeno na *obr. 60*. Hodnoty modulů jsou zobrazeny v závislosti E/E_2 (poměr modulu k modulu matrice, $E_2 = 1200$ MPa) na hmotnostním zastoupení vláken ve struktuře c_1 . Vypočtené hodnoty pro oba modely vrstevnaté struktury byly porovnány s experimentálně získanými hodnotami pro plně usměrněnou strukturu a s experimentálně získanými hodnotami modulů vrstevnaté struktury.



Obr. 62. Srovnání modulů pružnosti v tahu

10.2.2 Modul pružnosti v ohybu

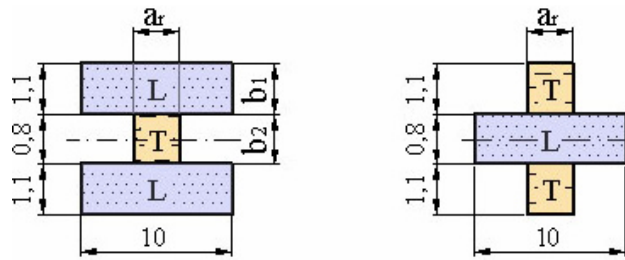
Pro výpočet ohybové tuhosti struktury je použito stejných modelů jako pro výpočet tahové tuhosti. Jedná se o modely *a*, *b* s plně usměrněnou strukturou a modely *c*, *d* s vrstevnatou strukturou. Vypočtené hodnoty budou porovnány s hodnotami zjištěnými experimentálně.

Efektivní modul plně usměrněných struktur a,b

Hodnoty modulů těchto struktur byly zjištěny experimentálně a slouží pro výpočet efektivních modulů dalších struktur.

Hodnoty modulů: $E_L = 7\,320$ MPa

$E_T = 1\,773$ MPa

Efektivní modul vrstevnatých struktur c, d

Obr. 63. Redukce šířek modelů c, d

U takto sestavených modelů je třeba provést redukci šířek a spočítat redukované momenty J_r , $J_{r2/1}$ a $J_{r1/2}$.

$$J_r = \frac{1}{12} \cdot a \cdot h^3$$

$$J_{r2/1} = \frac{1}{12} \cdot a_r \cdot b_2^3 + 2 \left(\frac{1}{12} \cdot a \cdot b_1^3 + y^2 \cdot a \cdot b_1 \right)$$

$$J_{r1/2} = \frac{1}{12} \cdot a \cdot b_2^3 + 2 \left(\frac{1}{12} \cdot a_r \cdot b_1^3 + y^2 \cdot a_r \cdot b_1 \right)$$

Postup výpočtu efektivních modulů těchto struktur je obdobný jako pro předcházející modely.

$$E_{2/1} = \frac{E_L \cdot J_{r2/1}}{J_r}$$

$$E_{1/2} = \frac{E_L \cdot J_{r1/2}}{J_r}$$

Výpočet

$$J_r = \frac{1}{12} \cdot a \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 3^3 = 22,5 \text{ mm}^4$$

$$J_{r2/1} = \frac{1}{12} \cdot a_r \cdot b_2^3 + 2 \left(\frac{1}{12} \cdot a \cdot b_1^3 + y^2 \cdot a \cdot b_1 \right) = \frac{1}{12} \cdot 2,42 \cdot 0,8^3 + 2 \left(\frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 1,1^3 + 0,95^2 \cdot 10 \cdot 1,1 \right) = 22,18 \text{ mm}^4$$

$$J_{r1/2} = \frac{1}{12} \cdot a \cdot b_2^3 + 2 \left(\frac{1}{12} \cdot a_r \cdot b_1^3 + y^2 \cdot a_r \cdot b_1 \right) = \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 0,8^3 + 2 \left(\frac{1}{12} \cdot 2,42 \cdot 1,1^3 + 0,95^2 \cdot 2,42 \cdot 1,1 \right) = 5,77 \text{ mm}^4$$

$$E_{2/1} = \frac{E_L \cdot J_{r2/1}}{J_r} = \frac{7320 \cdot 22,18}{22,5} = 7215 \text{ MPa}$$

$$E_{1/2} = \frac{E_L \cdot J_{r1/2}}{J_r} = \frac{7320 \cdot 5,77}{22,5} = 1877 \text{ MPa}$$

Efektivní modul struktury $E_{2/1} = 7\ 215 \text{ MPa}$ a struktury $E_{1/2} = 1\ 877 \text{ MPa}$.

Experimentálně získané moduly

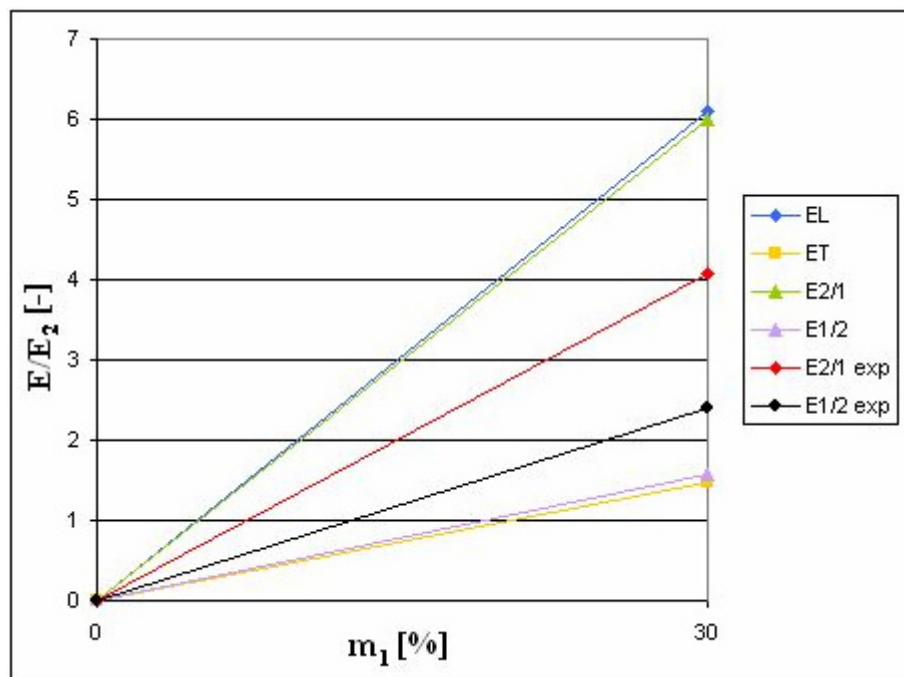
Hodnoty byly získány ze středních hodnot modulů naměřených při tříbodové ohybové zkoušce.

Hodnoty modulů: $E_{2/1 \text{ exp}} = 4\,894 \text{ MPa}$

$E_{1/2 \text{ exp}} = 2\,881 \text{ MPa}$

Srovnání efektivních modulů

Pro přehlednost je porovnání uvedeno na obr. 62. Hodnoty modulů jsou zobrazeny v závislosti E/E_2 (poměr modulu k modulu matrice, $E_2 = 1200 \text{ MPa}$) na hmotnostním zastoupení vláken ve struktuře c_1 . Vypočtené hodnoty pro oba modely vrstevnaté struktury byly porovnány s experimentálně získanými hodnotami pro plně usměrněnou strukturu a s experimentálně získanými hodnotami modulů vrstevnaté struktury.



Obr. 64. Srovnání modulů pružnosti v ohybu

10.2.3 Závěr

Porovnáním hodnot modulů pružnosti na základě zjednodušených strukturních modelů nám byla poskytnuta představa o mechanických vlastnostech vstříkovaných plošných prvků plněných krátkými vlákny. Hodnoty vypočtené však lze brát jen jako určité hranice, mezi nimiž se pohybují hodnoty skutečné.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala studiem chování krátkovláknových kompozitů. Konkrétně pak vlivem orientace a objemového zastoupení skleněných vláken na mechanické vlastnosti.

Pro predikci chování zkoumaných materiálů (*PP 30% GF*, *PP 15% GF a PP*) bylo použito čtyř zkoušek mechanických vlastností, a to tahová zkouška, 2D zkouška kruhové desky, tříbodová zkouška a zkouška vrubové houževnatosti. Po provedení těchto zkoušek se dospělo k závěru, že pokud jsou vlákna přednostně orientována jedním směrem, chovají se krátkovláknové kompozity jako materiály anizotropní. Vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti je pak takový, že ve směru orientace vláken dosahuje kompozit mnohem lepších vlastností než ve směru kolmém na vlákna. Tento jev se nejvíce prokázal u PP plněného 30% skleněných vláken. U materiálů s menším objemovým zastoupením skleněných vláken byl vliv orientace velmi malý nebo žádný.

Vezmeme-li v úvahu výsledky tahové a tříbodové ohybové zkoušky a porovnáme-li hodnoty pevnosti v tahu a v ohybu, můžeme potvrdit fakt, že hodnota meze pevnosti v ohybu je v průměru více jak 1,5krát vyšší, než mez pevnosti v tahu. Tento výsledek nám potvrzuje teorii, že při dosažení meze pevnosti při ohybové zkoušce se začínají při dalším zatěžování v centrálním řezu a jeho okolí tvořit plastické zóny.

S použitím hodnot naměřených z 2D zkoušky kruhové desky a tříbodové ohybové zkoušky bylo stanoveno Poissonovo číslo pro PP a PP 30% GF. V případě neplněného PP i PP 30% GF se hodnota vypočtená shodovala s tabulkovou.

Dále byly v programu *Moldflow Plastic Insight 6.2* vytvořeny tokové analýzy vstřikovací formy, které nám simulují vstřikovací proces. Konkrétně byla posuzována: doba plnění, orientace vláken na povrchu, orientace vláken ve střední ploše, tlak ve vstřikovací formě a místa vzniku studených spojů.

Poslední část se zabývala strukturou zkušebních destiček vyrobených filmovým vtokovým ústím. Pomocí optického mikroskopu a tokových analýz bylo zjištěno, že se jedná o třívrstvou strukturu. Na základě představy o třívrstvé struktuře pak byly dle strukturních modelů vypočteny hodnoty efektivních modulů pružnosti v tahu a ohybu, které byly porovnány s hodnotami naměřenými experimentálně.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAREŠ, T.; VÝVODA, L. *Kompozity* [online]. [cit. 2008-11-03]. Dostupný z [www: http://drone.fsid.cvut.cz/student/LudekVyvoda/d1.pdf](http://drone.fsid.cvut.cz/student/LudekVyvoda/d1.pdf)
- [2] ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*. 1. vyd. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005. ISBN 80-7318-287-4.
- [3] BOTLÍK, R. *Nástroje pro tváření polymerů*. Disertační práce. Brno: FSI VUT, 2004.
- [4] NEDOMA, M. *Studium vlivu umístění ústí vtoku na mechanické chování stěn vyztužených krátkými vlákny*. Diplomová práce. Zlín: FT UTB, 2007.
- [5] LUTONSKÝ, Z. *Vliv teploty na mechanické chování polymerů a kompozitů*. Diplomová práce. Zlín: FT UTB, 2007.
- [6] *Mechanické vlastnosti polymerů* [online]. [cit. 2008-01-10]. Dostupný z [www: http://www.beltplast.cz](http://www.beltplast.cz)
- [7] JARUŠEK, J. *Metody zkoumání polymerů*. VŠCHT Pardubice, 1984.
- [8] Technická norma: ČSN EN ISO 178 (64 0607)
- [9] *Kompozitní materiály* [online]. BIBUS s.r.o., [cit. 2009-01-15]. Dostupný z [www: http://new.bibus.cz/pdf/Comat/Kompozitni_materialy_COMAT.pdf](http://new.bibus.cz/pdf/Comat/Kompozitni_materialy_COMAT.pdf)
- [10] PLUHARŮ, J. *Nauka o materiálech*. Praha : SNTL, 1989. 552 s.
- [11] CHARRIER, J. M., DOSHI, S. R. *Structure-property relationships for short fiber-reinforced thermoplastics*. Antec, 1985.
- [12] HORÁČEK, J. *Nauka o materiálu*. Praha : ČZU v Praze, 2000. 71 s.
- [13] HOLT, R. *Composite Materials* [online]. Queen's University, [cit. 2009-01-12]. Dostupný z [www: http://me.queensu.ca/courses/mech270/documents/Lecture25CompositeMaterials.pdf](http://me.queensu.ca/courses/mech270/documents/Lecture25CompositeMaterials.pdf)
- [14] KRATOCHVÍL, B.; ŠVORČÍK, V.; VOJTĚCH, D. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Praha : VŠCHT v Praze, 190 p.

- [15] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů*. ÚCHM FCH VUT Brno, 1999.
- [16] ŽALUDEK, M. *Modelování a studium mechanického a termomechanického chování kompozitních struktur na bázi vstříkované polymerní matrice*. Disertační práce. Zlín: UTB, 2002.
- [17] LOUGHLIN, P. T., CHEN, CH., TUCKER, CH., L. *Properties of short fiber reinforced polymers*. Urbana: University of Illinois, 1981.
- [18] PTÁČEK, L a kolektiv. *Nauka o materiálu I a II*. Brno : CERM, 2001. 854 s.
- [19] HORÁKOVÁ, J. *Distribuce směrů a délek v kompozitech s krátkými vlákny*. Diplomová práce. Zlín: UTB, 1995.
- [20] FOLKES, M. J. *Short fibre reinforced thermoplastics*. Uxbridge: Brunel University, 1982. ISBN 0 471 10209 1.
- [21] ŠUBA, O.; ŽALUDEK, M.; BOTLÍK, R. (eds.). *Zkoušky dvouosé ohybové napjatosti kvaziizotropních laminátových struktur*. 2009.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-----------------------|---|
| F | Síla [N] |
| σ_t | Napětí na mezi pevnosti v tahu [MPa] |
| σ_o | Napětí na mezi pevnosti v ohybu [MPa] |
| E | Modul pružnosti v tahu [MPa] |
| E_o | Modul pružnosti v ohybu [MPa] |
| F_m | Maximální síla při přeražení zkušební tyčinky [N] |
| A_m | Hodnota vrubové houževnatosti při maximální síle F_m [kJ/m ²] |
| A_b | Vrubová houževnatost [kJ/m ²] |
| ν | Poissonovo číslo [-] |
| p | Tlak ve vstřikovací formě [MPa] |
| t | Doba plnění [s] |
| r_0 | Vnější poloměr trnu [mm] |
| R | Vnitřní poloměr ohybnice [mm] |
| E^* | Sférický modul pružnosti [MPa] |
| j | Kvadratický moment průřezu na jednotkovou šířku [mm ³] |
| a | Šířka vzorku [mm] |
| a_r | Redukovaná šířka [mm] |
| S_r | Redukovaná plocha [mm ²] |
| J_r | Redukovaný kvadratický moment průřezu [mm ⁴] |
| E_L, E_T | Modul plně usměrněné struktury s vlákny ve směru L a T [MPa] |
| $E_{1/2}$ | Modul vypočtený pro vrstevnatou strukturu [MPa] |
| $E_{2/1}$ | Modul vypočtený pro vrstevnatou strukturu [MPa] |
| $E_{2/1 \text{ exp}}$ | Experimentálně získaný modul ve směru L [MPa] |
| $E_{1/2 \text{ exp}}$ | Experimentálně získaný modul ve směru T [MPa] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| <i>Obr. 1. Příklady kompozitních výrobků</i> | 11 |
| <i>Obr. 2. Porovnání mechanických vlastností kovových a kompozitních materiálů</i> | 13 |
| <i>Obr. 3. Rozdělení kompozitních materiálů</i> | 14 |
| <i>Obr. 4. Brzdový disk (Al + SiC)</i> | 15 |
| <i>Obr. 5. Vláknové kompozity</i> | 16 |
| <i>Obr. 6. Typy vláknových kompozitů</i> | 16 |
| <i>Obr. 7. Sendvičové panely</i> | 17 |
| <i>Obr. 8. Laminátové kompozity</i> | 18 |
| <i>Obr. 9. Svazek skleněného vlákna</i> | 22 |
| <i>Obr. 10. Schématické znázornění fontánového toku</i> | 24 |
| <i>Obr. 11. Vliv polohy vtoku na směr vláken</i> | 25 |
| <i>Obr. 12. Postup zaplňování dutiny formy</i> | 26 |
| <i>Obr. 13. Obecná křivka „síla – prodloužení“</i> | 30 |
| <i>Obr. 14. Charakteristické křivky různých materiálů</i> | 33 |
| <i>Obr. 15. Závislost síly na rychlosti deformace u polypropylenu (1 - 2,6 mm/min, 2 - 15 mm/min, 3 - 52mm/min, 4 – 300mm/min)</i> | 34 |
| <i>Obr. 16. Závislost „napětí – poměrné prodloužení“ , počáteční oblast</i> | 35 |
| <i>Obr. 17. Schéma třibodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu</i> | 36 |
| <i>Obr. 18. Schéma čtyřbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu</i> | 36 |
| <i>Obr. 19. Efekt koncentrace napětí u vzorků rozlišené tloušťky</i> | 37 |
| <i>Obr. 20. Schematické znázornění vstřikovacího stroje</i> | 40 |
| <i>Obr. 21. Typy vtokových ústí</i> | 42 |
| <i>Obr. 22. Použitá vtoková ústí</i> | 46 |
| <i>Obr. 23. Kruhová destička</i> | 47 |
| <i>Obr. 24. Ustavení destičky</i> | 47 |
| <i>Obr. 25. Směry řezání zkušebních tyčinek</i> | 47 |
| <i>Obr. 26. Vstřikovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advanced</i> | 48 |
| <i>Obr. 27. Vstřikovací forma s centrálním vtokem [4]</i> | 48 |
| <i>Obr. 28. Vstřikovací forma s výměnnými vtoky [4]</i> | 49 |

| | |
|--|----|
| Obr. 29. ZWICK 1456..... | 50 |
| Obr. 30. Princip 2D zkoušky..... | 51 |
| Obr. 31. Závislost síla – průhyb pro PP..... | 51 |
| Obr. 32. Hodnota tuhosti pro jednotlivé materiály a typy vtokových ústí..... | 52 |
| Obr. 33. Princip tříbodové ohybové zkoušky..... | 53 |
| Obr. 34. Závislost $\sigma_o - \varepsilon$ pro PP 30% GF - L..... | 53 |
| Obr. 35. Hodnoty pevnosti v ohybu pro jednotlivé materiály a směry řezu..... | 55 |
| Obr. 36. Hodnoty modulu pružnosti v ohybu pro jednotlivé materiály a směry řezu..... | 55 |
| Obr. 37. Princip tahové zkoušky..... | 56 |
| Obr. 38. Tahový diagram (PP 30% GF - L)..... | 56 |
| Obr. 39. Hodnoty pevnosti v tahu pro jednotlivé materiály a směry řezu..... | 58 |
| Obr. 40. Hodnoty modulu pružnosti v tahu pro jednotlivé materiály a směry řezu..... | 58 |
| Obr. 41. Grafické vyhodnocení měření pro PP 30% GF – směr T..... | 59 |
| Obr. 42. CEAST RESIL IMPACTOR junior..... | 60 |
| Obr. 43. Hodnota maximální síly pro vrubovou houževnatost jednotlivých materiálů..... | 62 |
| Obr. 44. Hodnota maximální vrubové houževnatosti a vrubové houževnatosti při síle F_m | 62 |
| Obr. 45. Princip rotačně symetrické biaxiální zkoušky ohybem kruhové desky..... | 66 |
| Obr. 46. Závislost síla – průhyb z 2D zkoušky kruhové desky pro PP..... | 67 |
| Obr. 47. Model desky sestavený v COSMOS/M®..... | 68 |
| Obr. 48. Závislost síla – průhyb z 2D zkoušky kruhové desky pro PP 30% GF..... | 69 |
| Obr. 49. Závislost Poissonova čísla na objemové koncentraci vláken..... | 70 |
| Obr. 50. Doba plnění pro jednotlivé typy vtokových ústí a tloušťky desek..... | 71 |
| Obr. 51. Orientace vláken ve střední ploše (červeně) a na povrchu (modře)..... | 72 |
| Obr. 52. Orientace vláken ve střední ploše (červeně) a na povrchu (modře)..... | 73 |
| Obr. 53. Orientace vláken ve střední ploše (červeně) a na povrchu (modře)..... | 74 |
| Obr. 54. Tlak v dutině formy pro jednotlivé typy vtokových ústí a tloušťky desek..... | 75 |
| Obr. 55. Místa výskytu studených spojů pro jednotlivé ústí vtoku a tloušťky desek..... | 76 |
| Obr. 56. Optický mikroskop Zeiss NU..... | 78 |
| Obr. 57. Orientace vláken po tloušťce stěny..... | 78 |
| Obr. 58. Orientace vláken v povrchové vrstvě (vlevo) a střední ploše (vpravo)..... | 79 |
| Obr. 59. Modely struktur..... | 79 |
| Obr. 60. Redukce šířek modelu c..... | 80 |

| | |
|---|----|
| <i>Obr. 61. Redukce šířek modelu d</i> | 81 |
| <i>Obr. 62. Srovnání modulů pružnosti v tahu</i> | 82 |
| <i>Obr. 63. Redukce šířek modelů c, d</i> | 83 |
| <i>Obr. 64. Srovnání modulů pružnosti v ohybu</i> | 84 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| <i>Tab. 1. Technické údaje stroje ARBURG 420 C</i> | 47 |
| <i>Tab. 2. Teplota vstřikovací formy</i> | 49 |
| <i>Tab. 3. Teploty pásem šneku</i> | 49 |
| <i>Tab. 4. Časy vstřikovacího cyklu a podmínky vstřikování</i> | 49 |
| <i>Tab. 5. Technické údaje stroje ZWICK 1456</i> | 50 |
| <i>Tab. 6. Tabulka hodnot průhybů kruhových destiček v mm pro jednotlivé typy materiálů</i> | 52 |
| <i>Tab. 7. Tabulka hodnot pevnosti v ohybu v MPa pro jednotlivé typy materiálů</i> | 54 |
| <i>Tab. 8. Tabulka hodnot modulu pružnosti v ohybu v MPa pro jednotlivé typy materiálů</i> | 54 |
| <i>Tab. 9. Tabulka hodnot pevnosti v tahu v MPa pro jednotlivé typy materiálů</i> | 57 |
| <i>Tab. 10. Tabulka hodnot modulu pružnosti v tahu v MPa pro jednotlivé typy materiálů</i> | 57 |
| <i>Tab. 11. Technické údaje stroje CEAST RESIL IMPACTOR junior</i> | 60 |
| <i>Tab. 12. Vrubová houževnatost jednotlivých materiálů</i> | 60 |

SEZNAM PŘÍLOH

P I Materiálové listy

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÉ LISTY

MATERIÁLOVÝ LIST

výrobce:
RP COMPOUNDS

SCOLEFIN PP 53G10-0

Charakteristika:

PP homopolymer s 30% skl. vláken vhodný pro vstřikování (ideální pro tenkostěnné díly);
v natural odstínu.

Tento typ se vyznačuje:

- vysokou tekutostí
- vysokou tepel. odolností
- vysokou rázovou pevností i při nižších teplotách
- vysokou pevností v tahu

Aplikace:

Mezi hlavní aplikace patří např. tenkostěnné mechanické díly či díly pro automobilový průmysl.

| VLASTNOSTI | | NORMA | JEDNOTKA | HODNOTA |
|------------------------------|---------------|----------------|-------------------|------------|
| Hustota | | ISO 1183B | g/cm ³ | 1,12 |
| Index toku taveniny | 230°C/2,16 kg | ISO 1133 | g/10 min | 15 |
| Popel | 625°C | DIN EN 60 | % | 30 |
| Mechanické | | | | |
| Pevnost v tahu | 5 mm/min | ISO 527 | MPa | 90 |
| Modul pružnosti v tahu | | ISO 527 | MPa | 6800 |
| Tvrdość vtlačováním kuličky | | DIN ISO 2039/1 | MPa | 115 |
| Rázová houževnatost Charpy | +23°C | ISO 179 | kJ/m ² | 42 |
| Vrubová houževnatost Charpy | +23°C | ISO 179/1eA | kJ/m ² | 10 |
| Tepelné | | | | |
| Teplota průhybu při zatížení | 1,82 MPa | DIN EN ISO 75 | °C | 145 |
| Zpracovatelské | | | | |
| Teplota taveniny | | | °C | 200-240 |
| Teplota formy | | | °C | 40-60 |
| Sušení | | | °C | není nutné |

Poznámka:

Tyto hodnoty jsou prezentovány jako průměrné laboratorně změřené hodnoty materiálu. Jsou určeny pouze jako informativní hodnoty a ne jako prodejní specifikace. Nedílnou součástí tohoto překladu materiálového listu je originální materiálový list firmy RP Compounds (výrobce PP compounds SCOLEFIN*), který je v případě odlišností směrodatný.

* Obchodní značka RP Compounds GmbH



H777-25R**PP****Charakteristika:**

DOW PP H777-25R je homopolymer polypropylenu vyvinutý pro vstřikování hlavně tenkostěnných vylisků.

Vyznačuje se snadnou zatékavostí do formy či dobrou vyvážeností fyzikálních vlastností.

Aplikace:

- tenkostěnné obaly
- domácí potřeby
- hračky

| VLASTNOSTI | | NORMA | JEDNOTKA | HODNOTA |
|------------------------------|-----------------|-------------|-------------------|---------|
| Fyzikální | | | | |
| Index toku taveniny | 230°C / 2,16 kg | ISO 1133 | g/10 m in | 25 |
| Hustota | | ISO 1183 | g/cm ³ | 0,9 |
| Mechanické | | | | |
| Pevnost v tahu na mezi kluzu | 50 mm/min | ISO 527 | MPa | 33 |
| Prodloužení na mezi kluzu | 50 mm/min | ISO 527 | % | 10 |
| Modul pružnosti v ohybu | | ISO 178 | MPa | 1400 |
| Vrubová houževnatost CHARPY | +23°C | ISO 179/1eA | kJ/m ² | 3,0 |
| Tepelné | | | | |
| Teplota průhybu při zatížení | 0,46 MPa | ISO 75B | °C | 80 |
| Teplota měknutí Vicat | 10 N | ISO 306A | °C | 150 |

Poznámka:

Tyto hodnoty jsou prezentovány jako průměrné laboratorně změřené hodnoty materiálu. Jsou určeny pouze jako informativní hodnoty a ne jako prodejní specifikace. Nedílnou součástí tohoto překladu materiálového listu je originální materiálový list firmy Dow, který je v případě odlišností směrodatný.

Zdravotní nezávadnost:

Tento materiál splňuje požadavky pro styk s potravinami EU a jejich členských států stejně jako normu FDA, jsou-li dodrženy standardní zpracovatelské podmínky a materiál není zpracovatelem modifikován. Prosíme kontaktujte prodejce tohoto materiálu pro získání certifikátu o zdravotní nezávadnosti.

* Obchodní značka The Dow Chemical Company

