

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Houževnatost polymerních materiálů

Toughness of polymeric materials

Obor: Chemie a technologie materiálů

Vedoucí práce: Ing. Petr Elisek, Ph.D.

Rok: 2008

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal PTÁČEK**
Studijní program: **B 2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**

Téma práce: **Houževnatost polymerních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat literární rešerši na dané téma s ohledem na poslední poznatky dané problematiky.
2. Výhody instrumentace Charpyho kladiva a využití principů lineární elastické lomové mechaniky resp. elasticko-plastické lomové mechaniky při rázových zkouškách.
3. Moderní metody simulace průběhu zkoušky na vrubovaném tělísku pomocí metody konečných prvků

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. AGARWAL B.D., BROUTMAN L.J.: Vlákenné kompozity, Praha: SNTL, 1987.
2. JANČÁŘ, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů, Brno: VUT, 2003.
3. PTÁČEK, L.: Nauka o materiálu I, Brno: CERM, 2002.
4. PTÁČEK, L.: Nauka o materiálu II, Brno: CERM, 2002.
5. MEISSNER, B., ZILVAR, V.: Fyzika polymerů -- Struktura a vlastnosti polymerních materiálů, SNTL/ALFA, 1987.
6. LAPČÍK, L., RAAB M.: Nauka o materiálech II, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2000, skripta.
7. POKLUDA, J., KROUPA, F., OBDRŽÁLEK, L.: Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek, Brno: PC-DIR spol. s r. o., 1994.
8. ELISEK, P.: Houževnatost polymerních materiálů na bázi izotaktického polypropylenu Toughness of polymeric materials derived from isotactic polypropylene, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2006, Disertační práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Elisek, Ph.D.**
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **11. února 2008**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. srpna 2008**

Ve Zlíně dne 29. července 2008


doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




prof. Ing. Josef Janča, DrSc.
vedoucí katedry

ABSTRACT

Toughness of polymeric materials

Toughness of composites with isotactic polypropylene matrix was examined as a function of short glass fibres reinforcement ratio (from 0 to 30 wt. % of short GF, step being 10 %) and temperature. All specimens were prepared by injection moulding using DEMAG ERGOtech machine and half of them were notched by slow pushing of razor blade. The depth of notches was used 4 mm. An Instrumented Charpy pendulum was used for experimental and contemporary approach of linear elastic and elastic plastic fracture mechanic was used for data analysis. For each material the measurement was repeated 5 times for determination of dynamic modulus of elasticity res. dynamic yield strength and 5 times for determination of J-integral and stress intensity factor K_{Id} res. K_{Jd} . The results indicate high dependence of fracture toughness on reinforcement ratio of short glass fibres in isotactic polypropylene matrix.

ABSTRAKT

Houževnatost polymerních materiálů

U série polymerních kompozitních materiálů na bázi izotaktického polypropylenu byla sledována závislost houževnatosti materiálu ve vztahu k různému stupni plnění a teplotě. Zkušební tělíska byla vyrobena metodou vstřikování na vstřikovacím lisu DEMAG ERGOtech a polovina z nich byla posléze navrubována pomocí metody pomalého vtlačování ostří žiletky do materiálu vrubem o hloubce 4 mm. Pro experimentální hodnocení materiálů bylo využito instrumentované Charpyho kladivo a principy soudobé lineárně elastické resp. elasticko plastické lomové mechaniky. Každé měření bylo opakováno pětkrát pro každý typ materiálu při určování dynamického modulu elasticity a dynamické meze kluzu a pětkrát pro určení J-integrálu a součinitele intenzity napětí. Výsledky potvrdily velmi výrazný vliv stupně plnění materiálu krátkými skleněnými vlákny na jeho lomově mechanické vlastnosti.

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. P.Eliskovi, Ph.D. za všestranné obětavé vedení v průběhu celé práce, cenné rady a připomínky při výběru, průběhu a vyhodnocení experimentů.

Dále bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. L. Lapčíkovi, PhD., za vytvoření výborných podmínek na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství, FT UTB ve Zlíně po celý průběh mého studia.

Rád bych také poděkoval pracovníkům Ústavu materiálových věd a inženýrství, Odboru kovových materiálů na FSI VUT Brno, a to především paní Ing. Evě Mollikové, Ph.D., Paed IGIP, za umožnění experimentální části práce v laboratořích zkoušení mechanických vlastností.

OBSAH

ÚVOD	7
CÍLE PRÁCE	8
I. TEORETICKÁ ČÁST	9
1.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	10
1.1.1 Rozdělení kompozitů dle geometrie výztuže	12
1.2 POLYPROPYLEN	12
1.3 LOMOVÉ DĚJE V POLYMERECH	14
1.3.1 Rozdělení lomové mechaniky	15
1.4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	21
II. PRAKTICKÁ ČÁST	27
2.1 POUŽITÉ MATERIÁLY	28
2.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	28
2.2.1 Vrubování zkušebních tělísek	29
2.3 EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	29
2.4 MATEMATICKÝ APARÁT	36
2.5 VÝSLEDKY A DISKUSE	38
2.5.1. Určení dynamického modulu pružnosti E_d a dynamické meze kluzu σ_d	38
2.5.2. Stanovení lomové houževnatosti.....	40
2.5.3. Teplotní závislost křivek síla – průhyb pro jednotlivé materiály a vybraná zkušební tělíska	44
2.6 ZÁVĚR.....	50
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	53
SEZNAM OBRÁZKŮ	55

ÚVOD

V současnosti představují polymerní materiály, pokud jsou hodnoceny na základě objemu výroby a spotřeby, jeden z nejvýznamnějších segmentů na trhu materiálů. V konkurenci s klasickými konstrukčními materiály, jako jsou například kovy, se polymery prosadily především svojí snadnou zpracovatelností, nízkou měrnou hmotností a obecně výhodným poměrem mezi užitnými vlastnostmi a cenou.

Polymerní směsi a vícefázové systémy na bázi izotaktického polypropylenu se vyznačují mnohotvárností struktury a širokým spektrem mechanických vlastností, vedoucích na jedné straně k selhání výrazně křehkého charakteru a na straně druhé až k selhání v důsledku plastického kolapsu. Z těchto důvodů nabývají tyto materiály na významu jak z hlediska průmyslových aplikací, tak i z hlediska vědeckého zkoumání.

Konstrukční aplikace polymerních materiálů vyžadují často zvýšenou odolnost proti rázovému namáhání, tedy vysokou houževnatost. Na základě potřeb a požadavků konstruktérů byly pro určení houževnatosti materiálu a jeho následné vhodnosti pro danou aplikaci vytvořeny normalizované zkoušky. Jednou z nejznámějších a celosvětově využívaných zkoušek je rázová zkouška na Charpyho kladivu. Avšak až po následné instrumentaci Charpyho kladiva a současně vytvoření a využití principů a zásad lomové mechaniky, dokázali materiáloví inženýři objasnit zákonitosti chování materiálu během rázového zatížení a stanovit lomově mechanické charakteristiky materiálu, jako je například lomová houževnatost.[1, 2, 14].

CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce je určení mechanických vlastností kompozitů s matricí z izotaktického polypropylenu vyztužených různým stupněm plnění krátkými skleněnými vlákny. Při experimentu bude využito instrumentované Charpyho kladivo PSW 300 E/MFL vyhovující požadavkům mezinárodních standardů. Při vyhodnocování experimentů bude využito zákonů lineární elastické lomové mechaniky resp. elasticko-plastické lomové mechaniky. Získané výsledky budou diskutovány a na základě diskuse budou následně vysloveny závěry.

Jedná se především o experimentální zjištění:

- vlivu modifikace kompozitu různým stupněm plnění krátkými skleněnými vlákny na jeho lomovou houževnatost,
- teplotních závislostí dynamického modulu pružnosti E_d ,
- teplotních závislostí dynamické meze kluzu σ_d ,
- teplotních závislostí lomové houževnatosti K_{Id} resp. K_{Jd} ,
- teplotních závislostí J_{Id} -integrálu

I. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Kompozitní materiály

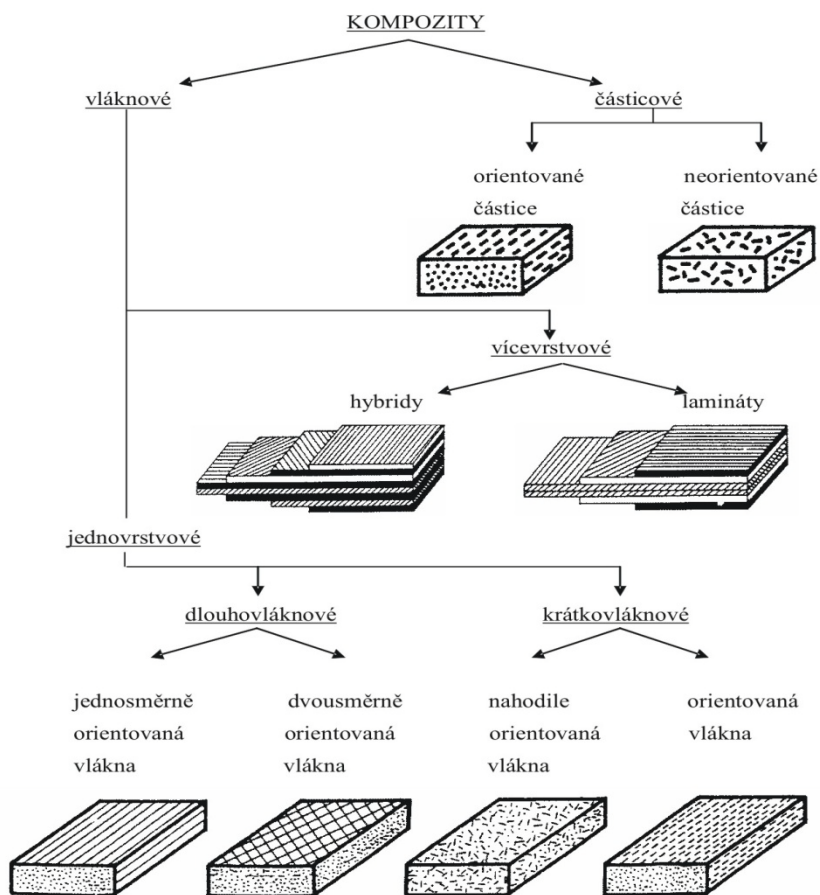
Slovo *kompozitní* znamená „vytvořený či skládající se ze dvou nebo více odlišných částí“. Materiál mající dvě nebo více odlišných materiálových složek neboli fází je podle toho tedy složeným materiálem. Avšak jen tehdy, když mají vytvářející fáze značně rozdílné fyzikální vlastnosti, a tudíž i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně odlišné od jeho složek, označujeme takový materiál jako *kompozit*.

Například běžné kovy obsahují vždy nežádoucí nečistoty, příměsi nebo slitinové prvky; také plasty obsahují malá množství plniv, apretur, pohlcovačů ultrafialového záření a jiných aditiv. Tyto technologicky homogenní materiály se však nepokládají za kompozity. Pro kompozity platí, že se jejich význačné vlastnosti objevují jako výsledek kombinace složek; tyto změny budou zvláště patrné, bude-li jedna z fází v destičkové nebo vlákně podobě a objemový podíl jedné ze složek větší než 10 % a její vlastnosti mnohem výraznější (≥ 5 krát) než druhé [3, 14].

Kompozity se také často definují pomocí synergického účinku vlastností výztuže a matrice, protože výsledné vlastnosti výrobku by měly být takové, které nelze dosáhnout kteroukoli složkou kompozitu samostatně ani prostou sumací [3, 4, 14].

Kompozity tvoří jedna nebo více nespojitých fází, ponořených ve spojitě fázi. Diskontinuitní fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se vyztužení nebo vyztužovací materiál, zatímco spojitá fáze se nazývá matrice. Výjimkou z tohoto pravidla jsou polymery modifikované kaučukem, skládající se z tuhé polymerní matrice plněné kaučukovými částicemi.

Většina dosud vyvinutých kompozitních materiálů je vyráběna pro zlepšení mechanických vlastností, jako je pevnost, tuhost, tažnost, vysokoteplotní odolnost. Je pak přirozené, že se společně studují kompozity, které mají společný mechanismus pevnostního chování. Tento mechanismus je silně závislý na geometrii vyztužení. Proto je vhodné rozřadit materiály na základě geometrie reprezentativní jednotky vyztužení. Obrázek 1 představuje obecně přijaté klasifikační schéma pro kompozitní materiály [3, 14].



Obr. 1 Obecné schéma pro rozdělení kompozitních materiálů. [3, 4, 5, 14]

V této klasifikaci je rozlišovací charakteristikou částic v podstatě to, zda je vláknová, nebo částicová. Částice mohou být kulové, krychlové, čtyřstěnové, destičkové nebo jiného pravidelného či nepravidelného tvaru. Vlákno je charakterizováno svou délkou, která je mnohem větší v porovnání s jeho průřezem. Kompozity vyztužené částicemi jsou někdy označovány jako partikulové kompozity. Kompozity vyztužené vlákny se pak pochopitelně nazývají vláknové kompozity .

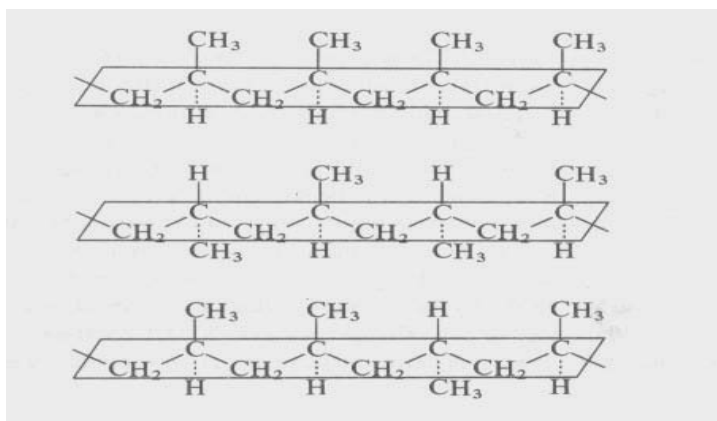
1.1.1 Rozdělení kompozitů dle geometrie výztuže

Podle geometrie výztuže dělíme kompozity na dvě základní skupiny:

- částicové kompozity,
- vláknové kompozity.

1.2 Polypropylen

Tři základní typy polypropylenu podle molekulární architektury, totiž izotaktický, syndiotaktický a ataktický, mají sice stejné chemické složení, ale ve skutečnosti se jedná o tři zcela odlišné materiály.



Obr. 2 Stereoizomery polypropylenu

a - izotaktický, b – syndiotaktický, c – ataktický [1, 6, 7, 14]

To je zřejmé z tabulky vlastností:

Vlastnost	Izotaktický	Syndiotaktický	Ataktický
Hustota, g/cm ³	0,92–0,94	0,8–0,91	0,85–0,90
Bod tání, °C	165	135	–
Rozpustnost v uhlovodíku při 20°C	nerozpouští se	střední	vysoká
Pevnost	vysoká	střední	velmi nízká

Tab. 1.: Srovnání vlastností jednotlivých stereoizomerů polypropylenu [1, 6, 7, 14]

Z praktického hlediska má v současné době rozhodující význam izotaktický polypropylen. Jeho makroskopické vlastnosti vyplývají z molekulární a krystalické struktury, ale závisejí ovšem na teplotě, na čase i na působení vnějšího prostředí.

Polypropylen má za obvyklých podmínek použití jak dobrou pevnost, tak i uspokojivou houževnatost, pokud teplota neklesne do záporných hodnot. Z tepelných vlastností je pozoruhodný vysoký bod tání ($165\text{ }^{\circ}\text{C}$) a poměrně vysoká teplota použití (až $135\text{ }^{\circ}\text{C}$). Polypropylen je nepolární a má proto výborné elektroizolační vlastnosti v široké oblasti frekvencí. Za normální teploty je izotaktický polypropylen nerozpustný ve všech organických rozpouštědlech, teprve při $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ se rozpouští v aromatických a chlorovaných uhlovodících. Botná v ketonech, uhlovodících a esterech. Minerální a rostlinné oleje jsou jím absorbovány jen nepatrně a jeho vlastnosti se tím nemění. Podobně jako vysokohustotní polyethylen, je i izotaktický polypropylen zranitelný současným působením tenzoaktivních látek a mechanického napětí. To vyvolává korozi pod napětím, jinými slovy vznik puklin.

Izotaktický polypropylen je polymorfní. V teplotním intervalu mezi teplotou skelného přechodu T_g a teplotou tání T_m může krystalizovat ve třech krystalografických modifikacích:

α - monoklinické

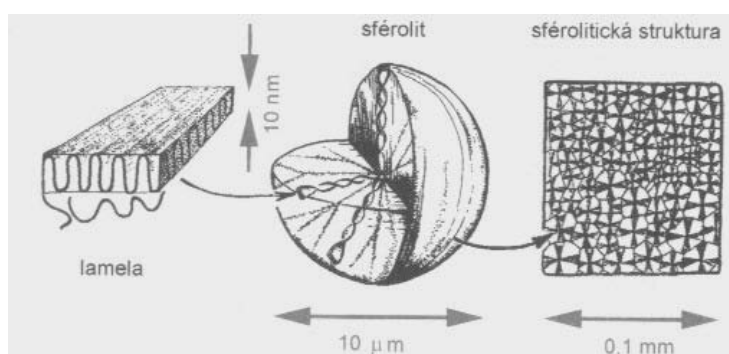
β - trigonální

γ - triklinické

Nejstabilnější je modifikace α . Předpokládá se, že v její základní krystalické buňce jsou sousední řetězce uloženy vždy s opačným smyslem šroubovice. V krystalech modifikace β , vznikajících zejména při velkém podchlazení, působením výrazných smykových polí, nebo za přítomnosti specifických nukleačních činidel, jsou sousední segmenty řetězců uspořádány se stejným smyslem šroubovic. Původně se u této modifikace předpokládalo hexagonální uspořádání. Přesnější analýza však nedávno prokázala, že jde o trigonální strukturu. Podle některých představ jsou krystalické oblasti modifikace β složeny z krátkých úseků protažených řetězců, které se nepřekládají, ale procházejí postupně mnoha krystality. Konečně modifikace γ je tvořena nízkomolekulárními podíly, které sice krystalizují, ale nevytvářejí už vyšší krystalické útvary (sférolity). Ta se tvoří při

krystalizaci za vyšších tlaků a byla také pozorována u degradovaných vzorků. Poslední dvě modifikace β , γ jsou nestabilní a při teplotě přecházejí v modifikaci α [1, 7, 8, 14].

V polymeru, který tuhne z taveniny dostatečně pozvolna a bez působení mechanického napětí, se vytvářejí složitější středově souměrné útvary – *sférolity* (obr.3). Předpokládá se, že jsou tvořeny seskupením mnoha krystalických lamel, které vyrůstají jako stuhly z jednoho centra všemi směry a často se i větví.



Obr. 3 Strukturální hierarchie izotaktického polypropylenu (lamela, sférolit, sférolitická struktura) [1, 7, 8]

1.3 Lomové děje v polymerech

Namáhání materiálů v provozních podmínkách je často velmi složité a variabilní a může vézt až k lomu. Porušování a lom může být zkoumán z různých hledisek. V současné době lze rozlišit zejména dva základní fyzikální pohledy:

Mechanika kontinua – lomová mechanika

Zkoumá makroskopické zákonitosti procesu porušování a stability trhliny a stanovuje napěťově-deformační a energiová kritéria lomu.

Fyzika pevné fáze – materiálové vědy

Vyšetřuje mikromechanismy porušování a souvislosti mezi strukturálními a mechanickými charakteristikami lomových procesů.

Základními kritériálními pojmy lomové mechaniky jsou stabilní lom (šíření trhliny může být řízeno změnou vnějšího zatížení) a nestabilní lom (šíření trhliny má nekontrolovatelný, náhlý průběh).

Základními typy lomových procesů z fyzikálně-materiálového hlediska jsou: tvárný lom, křehký lom, lom koroze pod napětím, únavový lom a creepový lom [9, 14].

1.3.1 Rozdělení lomové mechaniky

Lomová mechanika vznikla po druhé světové válce a od té doby zažila značný rozvoj. Toto odvětví vědy umožňuje stanovit vztah mezi vlastnostmi materiálu, velikostí přiloženého napětí, přítomností vad v materiálu a mechanismem rozvoje a růstu trhlín.

V současné době existují v této oblasti dvě základní koncepce:

- *Lineární elastická lomová mechanika* – platí zde lineární vztah mezi napětím a deformací (Hookův zákon, pružná deformace)
- *Elasticko-plastická lomová mechanika* – popisuje napětově deformační mezní stav při existenci rozsáhlé plastické zóny u čela trhliny, případně po úplném zplastizování průřezu s trhlínkou [9, 14].

Rozdělení lomové mechaniky i s příslušnými charakteristickými veličinami je na obr.4.

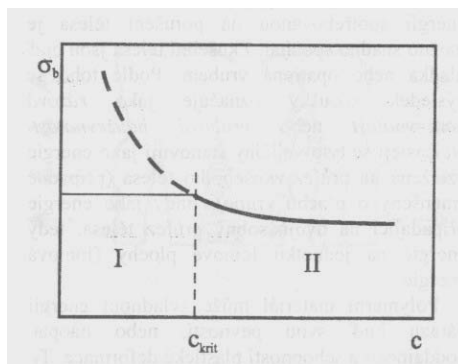
MATERIÁLOVÉ CHOVÁNÍ	LOMOVÉ MECHANICKÉ CHARAKTERISTIKY		
	Koncepce lomové mechaniky	<ul style="list-style-type: none"> Velikost zatížení Charakterizace pole napjatosti deformace v okolí trhliny 	Obsah, výpověď
	<p>→ LOMOVÁ HOUŽEVNATOST JAKO ODPOR PROTI NESTABILNÍMU ŠÍŘENÍ TRHLINY</p>		
	<p>1) LEFM 2) LEFM s malou plastickou zónou</p>	<p>Součinitel intenzity napětí $K_{Ic}, K_{IId}, (K_{II}, K_{III})$</p>	<p>Určení lomové síly</p>
	<p>3) FBM</p>	<p>Otevření v kořeni trhliny CTOD δ_{Ic}, δ_{Id}</p>	<p>Určení deformace</p>
		<p>J - Integrál $J_{Ic}, J_{Id}, (J_{II}, J_{III})$</p>	<p>Určení energie</p>
	<p>→ LOMOVÁ HOUŽEVNATOST JAKO ODPOR PROTI STABILNÍMU ŠÍŘENÍ TRHLINY</p>		
	<p>R - Křivka</p>	<p>J_i a $T_j, J_i \cdot T_j$ $(\delta_i$ a $T_\sigma), \delta_i \cdot T_\sigma$</p>	<p>J - kontroluje stabilní růst deformace určuje plastickou nestabilitu</p>

Obr. 4 Lomově mechanické charakteristiky [10, 14]

kde: LEFM – Lineární elastická lomová mechanika

FBM – Elasticko-plastická lomová mechanika

Velké množství materiálů (včetně polymerních) vykazuje typickou závislost pevnosti na velikosti trhliny podle obr. 5.



Obr. 5 Vliv délky trhliny c na pevnost v tahu σ_b [1, 14]

V oblasti I ($c < c_{krit}$) je pevnost na přítomnost vrubu necitlivá

V oblasti II ($c > c_{krit}$) pevnost klesá úměrně s \sqrt{c}

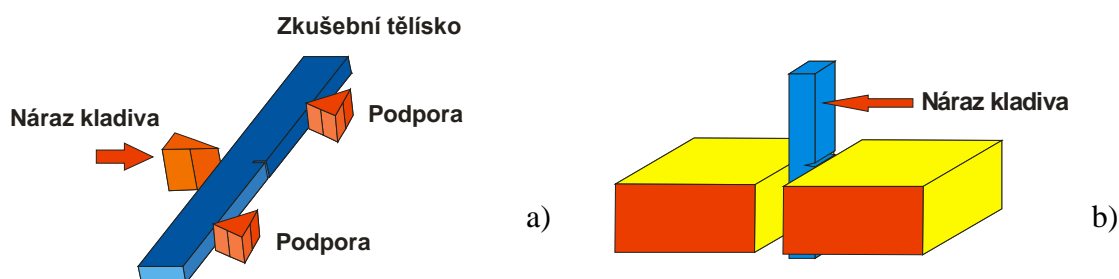
Vada, která je větší než kritická hodnota c_{krit} , vyvolá vždy konečný lom. V této oblasti (oblast II na obr. 5) klesá pevnost úměrně s odmocninou z délky trhliny. Právě analýza takového chování je předmětem lomové mechaniky. Naopak pevnost materiálu je prakticky necitlivá na uměle zavedené vady menší než c_{krit} . Materiál se chová tak, jako by vady velikost c_{krit} už obsahoval předem a proto se této hodnotě říká *rozměr vrozené vady*. Oblastí I se zabývá klasická mechanika „bezdefektního“ materiálu. I malá vada však působí jako koncentrátor napětí a v napjatém tělese může podkritickým růstem časem dosáhnout nebezpečné kritické velikosti.

Jednou z nejdůležitějších lomově-mechanických charakteristik materiálu je houževnatost. Pojem houževnatosti je ovšem složitější než je představa pevnosti. Spíše než jediná vlastnost je to celý soubor vlastností, které vyjadřují schopnost materiálu přestát příliv mechanické energie zvenčí a bránit se šíření trhliny. Jednoduchou mírou houževnatosti je deformační práce do lomu, kterou udává plocha pod křivkou napětí-deformace. Nejčastěji se však houževnatost chápe jako vlastnost protikladná ke křehkosti, tedy jako odolnost materiálu proti křehkému lomu. Z toho vyplývá souvislost mezi houževnatostí a „velikostí“ nárazu, neboli množstvím mechanické energie, kterou materiál při nárazu absorbuje, než se poruší.

Množství energie potřebné k přeražení zkušebního tělesa při rychlé zkoušce přímo stanoví rázové kladivo.

Klasická rázová zkouška je obvyklá ve dvojitým uspořádání :

- *Metoda Charpy* – tříbodový, popř. čtyřbodový ohyb,
- *Metoda Dynstat* (podle normy ČSN), popř. *metoda Izod* – těleso je namáháno na ohyb jako jednostranně vetknutý nosník.



Obr. 6 Rázová zkouška Charpy (a) a Izod (Dynstat) (b) [14]

Zkušební tělesa jsou buď hladká a nebo vrubovaná, jejich rozměry, velikost a geometrii vrubu stanoví příslušná norma [11, 12, 14].

U klasického pojetí rázových zkoušek se používá především pojmů rázová a vrubová houževnatost.

Rázová houževnatost je podíl energie spotřebované na porušení zkušebního tělesa a průřezu zkušebního tělesa za předepsaných podmínek (v tahu nebo v ohybu).

Vrubová houževnatost je podíl energie spotřebované na porušení zkušebního tělesa opatřeného vrubem a plochy kritického průřezu v místě vrubu za předepsaných podmínek (v tahu nebo v ohybu) [1, 9, 10, 14].

Křehký a tvárný lom

I když polymerní materiály nabízejí uživatelům řadu výhod, například snadnou zpracovatelnost, nízkou hustotu a korozní odolnost, jejich slabinou je nedostatečná houževnatost. V mnoha konstrukčních aplikacích proto jen obtížně konkurují kovovým materiálům, zejména ocelím, které mají podstatně vyšší tuhost, pevnost i mnohem příznivější charakteristiky houževnatosti a odolnosti proti únavě.

Většina polymerních materiálů se může porušit buď křehce nebo tvárně (viz. obr. 7) v závislosti na vnějších podmínkách nebo procesech ve struktuře materiálu.

Nejnebezpečnější porušení každého materiálu je *křehký lom*. Tento lom nastává bez větší plastické deformace, pod makroskopickou mezí kluzu materiálu. Veškerá dostupná energie přicházející z vnějšku se soustředí do jediného ostrého vrcholu rostoucí trhliny. Ta pak proběhne nestabilně a s vysokou rychlostí celým průřezem tělesa.

Ke zvýšení meze kluzu a tím i k výskytu křehkého lomu dochází snížením teploty. Plastické deformace smykového typu jsou u polymerů způsobeny vzájemným skluzem segmentů makromolekul. Tento proces je tepelně aktivován, proto je mez kluzu značně závislá na teplotě. Matematické vyjádření uvedené závislosti dostaneme, když v Eyringově rovnici (přepsané pro tahové napětí σ a tahovou deformaci e) položíme $d\sigma/dt = 0$:

$$\frac{\sigma_y}{T} = \frac{1}{A} \sinh^{-1} \left\{ \frac{B}{T} \frac{de}{dt} \exp \left(\frac{\delta F}{kT} \right) \right\} \quad (1.1)$$

Kde A , B jsou materiálové konstanty a δF aktivační volná energie porušení mezimolekulární vazby. V tomto vztahu je zahrnuta i závislost meze kluzu na rychlosti deformace. S rostoucí rychlostí deformace dochází u plastů k růstu meze kluzu a k přechodu na křehký způsob porušování.

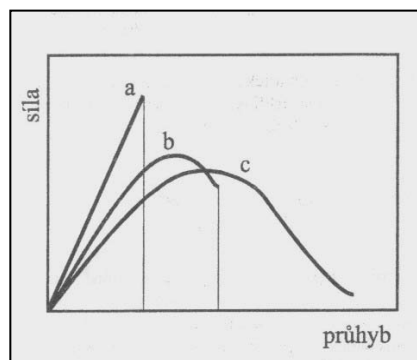
Při měření doby do lomu polymerních materiálů, které se při malých zatíženích porušují křehce, bylo zjištěno, že platí vztah:

$$t_b = t_0 \exp \left(\frac{E - v_0 \sigma}{kT} \right) \quad (1.2)$$

Kde σ je tahové napětí, t_b doba do lomu, t_0 , v_0 jsou materiálové konstanty. Platnost vztahu byla potvrzena i pro případ proměnných napětí, kdy bylo zjištěno, že porušování má kumulativní charakter a pro příslušnou dobu do lomu t_f platí:

$$\int_0^{t_f} \frac{1}{t[\sigma(x)]} dx = 1 \quad (1.3)$$

Kde doba t je zde vyjádřena jako funkce napětí, které je proměnné s časem x .



Obr. 7 Schematické znázornění závislosti síla-průhyb při rázové zkoušce, které odpovídají nestabilnímu (a), částečně stabilnímu (b) a zcela stabilnímu lomu (c) [1, 14]

Tvárný lom je předcházen a doprovázen rozsáhlými plastickými deformacemi. Na tahové křivce pozorujeme před okamžikem vlastního porušení její zakřivení nebo dokonce i pokles. U tohoto typu lomu se trhлина po své iniciaci šíří stabilně nebo alespoň částečně stabilně, protože plastická nebo viskoelastická deformace před vrcholem postupující trhliny odnímá trhlíně část energie a reguluje tím její postup.

Jednoduchou teorii o tom, kdy nastane lom křehký a kdy tvárný vytvořil již v roce 1926 Ludwik. Jeho teorie je založena na tom, že každý materiál má specifickou hodnotu meze kluzu a specifickou hodnotu pevnosti. Jestliže je za daných podmínek mez pevnosti nižší než mez kluzu, dochází ke křehkému lomu, v opačném případě k tvárnému lomu.

Přechod mezi tvárným a křehkým lomem může záviset na mnoha faktorech, například:

- teplota – teplotní oblasti dvou odlišných mechanismů odděluje teplota křehnutí; ta leží vždy pod teplotou skelného přechodu T_g ,
- deformační rychlost – rozdíl v zatěžovacích rychlostech musí být řádový,
- dlouhodobé statické namáhání pod mezí kluzu,
- chemické působení.

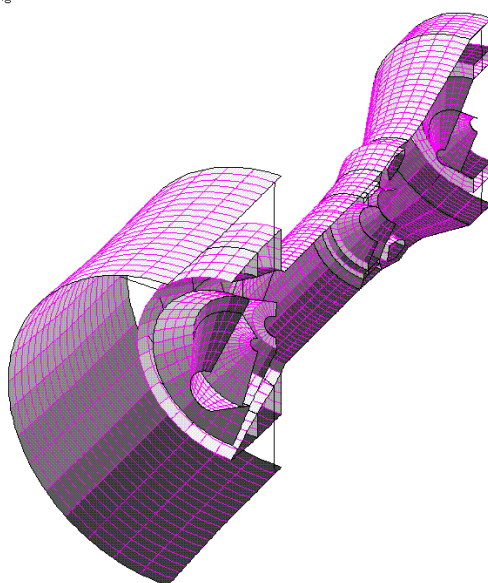
1.4 Metoda konečných prvků

Základní principy

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda, jejímž matematickým základem je diskretizace úlohy. Ta spočívá v rozdělení zkoumané spojité oblasti na konečný počet podoblastí, stručně nazývané konečnými prvky. Jednotlivé konečné prvky jsou spolu spojeny v uzlových bodech. V současné době je to nejrozšířenější a nejpoužívanější metoda pro řešení úloh mechaniky kontinua [5, 14, 17, 21].

SAMCEF-BACON: casing

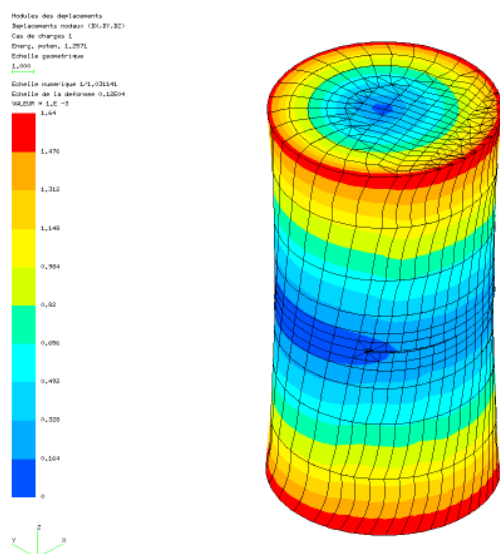
19 DEC 1996 13:41:21



Obr. 8 Analýza struktury anizotropického rotoru [14, 17]

Parametry lomové mechaniky

Pro popis rozvíjející se trhliny v materiálu je nutné aplikovat vhodné kritérium lomové mechaniky. V případě materiálu vykazujícího „hookovské“ elastické chování s malou plastickou zónou na špičce trhliny dochází k porušení křehkým lomem. Křehký lom bude pak simulován s využitím součinitele intenzity napětí K nebo hnací síly trhliny G . Pokud ovšem dojde k velkému rozvoji plastické deformace v okolí čela trhliny, tak tyto parametry užít nelze. Následně se tak při charakterizaci houževnatých materiálů vykazujících částečně tvárný lom využívá metodiky J-integrálu.



Obr. 9 Analýza válcového tělesa s trhlinou zatíženého v krutu [17]

Součinitel intenzity napětí

Trhlina v tělesech může být zatížena napětím ve třech směrech.

Pole posunutí okolo vrcholu trhliny může být popsáno pomocí součinitele intenzity napětí K_I , K_{II} , K_{III} a numerické funkce s využitím parametrů r a θ ve válcových polárních souřadnicích ve vztahu k vrcholu trhliny.

Parametry u , v , w jsou komponenty deformace zkoumaného bodu a určí se jako:

$$u = \frac{K_I}{4\mu} \left\{ \frac{2r}{\pi} \right\}^{1/2} \left[(\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} + \sin \theta \sin \frac{\theta}{2} \right] + \frac{K_{II}}{\mu} \left\{ \frac{2r}{\pi} \right\}^{1/2} \left[(\kappa + 1) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (1.4)$$

$$v = \frac{K_I}{4\mu} \left\{ \frac{2r}{\pi} \right\}^{1/2} \left[(\kappa + 1) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \theta \sin \frac{\theta}{2} \right] + \frac{K_{II}}{\mu} \left\{ \frac{2r}{\pi} \right\}^{1/2} \left[(-\kappa + 1) \cos \frac{\theta}{2} + \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (1.5)$$

$$w = \frac{K_{III}}{\mu} \left\{ \frac{2r}{\pi} \right\}^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \quad (1.6)$$

Kde:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{modul pružnosti ve smyku; kde parametr } \kappa \text{ je roven:}$$

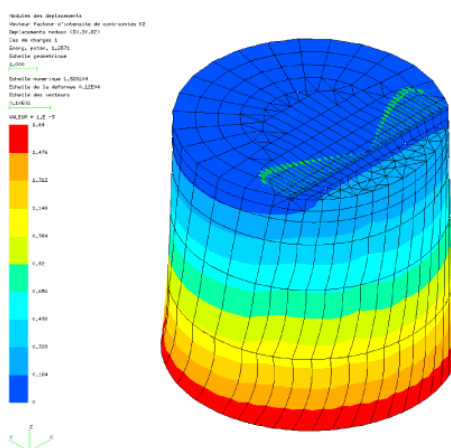
$$\kappa = 3 - 4\nu \quad \text{pro rovinnou deformaci;}$$

$$\kappa = \frac{3 - \nu}{1 + \nu} \quad \text{pro rovinnou napjatost;}$$

E je Youngův modul pružnosti a ν Poissonovo číslo.

Stejným způsobem může být napětí v okolí vrcholu trhliny vyjádřeno jako funkce součinitele intenzity napětí a numerické funkce s parametry r a θ :

$$\sigma_{ij} = [K_I \cdot f_I^{ij}(\theta) + K_{II} \cdot f_{II}^{ij}(\theta) + K_{III} \cdot f_{III}^{ij}(\theta)] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \quad (1.7)$$



Obr. 10 Analýza válcového tělesa s trhlinou zatíženého v krutu, - součinitel intenzity napětí K_{II} [17]

Součinitele intenzity napětí K_I , K_{II} , K_{III} popisují pouze intenzitu pole napětí, nejsou funkcí vzdálenosti r od vrcholu trhliny ani úhlové polohy θ . Nepopisuje tedy distribuci napětí v okolí vrcholu lomu.

Součinitel intenzity napětí může být určen pomocí dvou postupů využívajících metod konečných prvků. První metodika, která se nazývá „Local methods“ – „lokální metody“, využívá lokální posunutí nebo napětí v blízkosti vrcholu trhliny. Druhou cestou, která bývá nazývána „Global methods“ – „celkové, souhrnné metody“ je integrace veličin přes celý objem nebo povrch obklopující trhlinu [14, 17].

Lokální metody

Tato metoda srovnává pole deformací pro úhel $\theta = 180^\circ$ (pole deformací na čele trhliny). Výsledkem jsou přímo hodnoty K_I , K_{II} a K_{III} , , které jsou platné pro podmínky rovinné deformace:

$$K_I = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left[\frac{2\pi}{L_1} \right]^{1/2} \tilde{F}(v_i) \quad (1.8)$$

$$K_{II} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left[\frac{2\pi}{L_1} \right]^{1/2} \tilde{F}(u_i) \quad (1.9)$$

$$K_{III} = \frac{E}{4(1+\nu)} \left[\frac{2\pi}{L_I} \right]^{1/2} \tilde{F}(w_i) \quad (1.10)$$

zde:

E je Youngův modul pružnosti, ν je Poissonovo číslo, L_I je délka elementu v blízkosti trhliny, a u_i , v_i , w_i jsou komponenty deformace bodu i . V případě podmínek rovinné deformace hodnoty K_I a K_{II} musí být násobeny výrazem $(1 - \nu^2)$. Hodnoty K_{III} se nemění. Přesnost výpočtu závisí na jemnosti rozlišení v okolí trhliny a na použitém typu elementu.

Globální metody

Tato metoda využívá hodnoty J_I , J_{II} s J_{III} nebo G_I , G_{II} a G_{III} pro určení K_I , K_{II} , K_{III} .

Za předpokladu, že lom splňuje podmínky lineární elastické lomové mechaniky, součinitelé intenzity napětí mohou být jednoduše získány z následujících vztahů:

$$K_{I,II} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8G}{\kappa+1}} \left(\sqrt{G_I - G_{II} - G_{III}} \pm \sqrt{G_I + G_{II} - G_{III}} \right) \quad (1.11)$$

$$K_{III} = \sqrt{2GG_{III}} \quad (1.12)$$

kde

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \quad \text{a pro parametr } \kappa \text{ platí:}$$

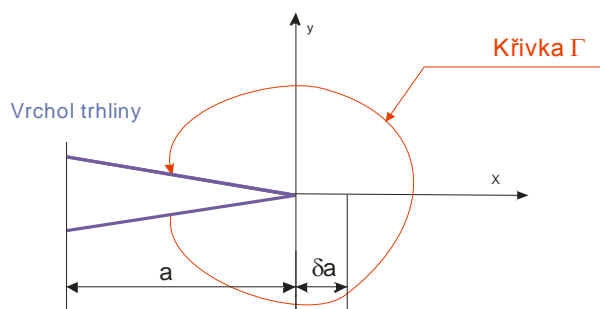
$$\kappa = 3 - 4\nu \quad \text{pro rovinnou deformaci}$$

$$\kappa = \frac{(3-\nu)}{1+\nu} \quad \text{pro rovinnou napjatost}$$

V programu SAMCEF[®] je tato metoda využívána pro dvojdimenzionální úlohu [17].

J -Integrál

Použití J-integrálu jako parametru lomové mechaniky je spojeno s elastoplastickou analýzou pro určení strukturních vlastností. Lineární elastická mechanika (LEFM) byla vyvinuta pro popis lomového chování materiálu vykazujícího striktně elastické chování. Později bylo prokázáno, že LEFM, dokáže charakterizovat i materiály s určitou plastickou zónou v oblasti vrcholu trhliny. Mnoho materiálů však vykazuje příliš výrazné plastické chování, než aby mohlo být použito LEFM pro jejich popis. Z tohoto důvodu byly vyvinuty principy elasto-plastické lomové mechaniky.



Obr. 11 Integrační křivka

První koncept, který byl vyvinut pro elasto-plastickou lomovou mechaniku a je všeobecně přijímán, je J-integrál. Byl poprvé formulován Ricem v roce 1968 jako křivkový integrál sloužící k popisu velikosti napětí a deformace v nelineárním elastickém materiálu. Je definován jako úbytek velikosti potenciální energie na přírůstek délky trhliny da

$$J = -\frac{dU_p}{da} \quad (1.13)$$

také může být určen jako křivkový integrál podél spojité křivky obklopující vrchol trhliny (obr. 11).

$$J_k = \int_{\Gamma} (w_{pk} - T_i u_{ik}) d\Gamma \quad (1.14)$$

kde:

w deformační energie určená ze vztahu:

$$w = \int_0^E \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (1.15)$$

T je vektor hnací síly a n je normálový vektor ke křivce $\Gamma [T_i = \sigma_{ij} n_j]$, u vektor posunutí a σ a ε reprezentují tenzory napětí a deformace.

Dráhová nezávislost J-integrálu umožňuje výpočty podél křivky vzdálené od vrcholu trhliny. Také dráha integrace může být zvolena mimo plastickou zónu k určení pouze elastické složky zatížení a deformace. Rychlost uvolňování elasticko-plastické energie lze určit z výpočtů podél křivek, kde je známo napětí a deformace.

Jelikož J-integrál může být považován za rychlost uvolňování elasticko-plastické energie, lze uvažovat jeho kritickou velikost J_c , která znamená počátek šíření trhliny. Je to analogie s G_c v metodice LFM.

Určení J-integrálu metodou konečných prvků je možné dvěma způsoby:

První metoda pro dvojdimenzionální úlohy, využívá klasické formulace Riceho [18]. Výpočet je možné provádět pro různé křivky okolo vrcholu trhliny. K výpočtu slouží následující vzorec:

$$J_k = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} - \int_{\Omega - \Omega_\varepsilon} \left[w \cdot n_k - \sigma_{ij} \frac{\partial w_i}{\partial x_k} n_j \right] p d\Omega \quad (1.16)$$

$$k = 1, 2$$

$$G_{III} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} - \int_{\Omega - \Omega_\varepsilon} \left[w^{III} \cdot n_1 - \sigma_{3j} \frac{\partial w_3}{\partial x_1} n_j \right] p d\Omega \quad (1.17)$$

kde:

$$w^{III} = \sigma_{31} \cdot \varepsilon_{31} + \sigma_{32} \cdot \varepsilon_{32} \quad (1.18)$$

Druhá metoda Nikhishkov-Atluri [19, 20] určuje J-integrál pomocí integrace přes rozšířenou oblast integrace (Extended Domain Integral, EDI). Ekvivalentní definice J-integrálu J_k na čele trhliny je získána z následujícího vztahu [17]:

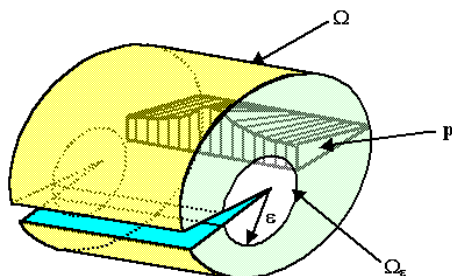
$$J_k \cdot f = \int_{V - V_\varepsilon}^- \left[w \cdot \frac{\partial p}{\partial x_k} - \sigma_{ij} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_j} \right] dV \quad (1.19)$$

$$G_{III} \cdot f = \int_{V - V_\varepsilon}^- \left[w^{III} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_1} - \sigma_{3j} \cdot \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_j} \right] dV \quad (1.20)$$

$$w^{III} = \sigma_{31} \cdot \varepsilon_{31} + \sigma_{32} \cdot \varepsilon_{32} \quad (1.21)$$

kde w deformační práce, Ω a Ω_ε povrchy válců jak je ukázáno na obr. 12, p zatěžovací funkce používaná v VCE metodách pro třídímní lom, V a V_ε objem válců a f plocha pod p funkcí.

Hlavním rozdílem je použití objemového integrálu místo křivkového, užívaného v klasickém pojetí [17].



Obr. 12 Definice zatěžovací funkce p [17].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Použité materiály

Jako výchozí homopolymer byl použit Tatren TI 924 (výrobce Slovnaft, SR). Materiál má základní tepelnou stabilizaci. Je určený na výrobu vláken, která se vyznačují malým dodatečným smrštěním.

Zkušební tělesa s obsahem 30 hm. % krátkých skleněných vláken byla vyrobena z materiálu SLOVALEN PH 61 GF 30, což je modifikovaný izotaktický polypropylén: matrice Tatren TI 924 plněná 30 hm. % chemicky vázaných krátkých skleněných vláken povrchově upravených aminosilanem (Distributor – Amida, s.r.o., ČR).

Zkušební tělesa z PP obsahující 10 a 20 hm. % krátkých skleněných vláken byla připravena smícháním těchto dvou výše uvedených materiálů v poměru 2:1 a 1:2 (Tatren TI 924 : Slovalen PH 61 GF 30).

2.2 Příprava zkušebních tělísek

Série zkušebních tělísek byla připravena ve spolupráci s Ústavem výrobního inženýrství UTB ve Zlíně metodou vstřikování na vstřikovacím lisu DEMAG ERGOtech 50 – 200 System.



Obr. 13 Vstřikovací lis DEMAG ERGOtech 50 – 200 systém

2.2.1 Vrubování zkušebních tělísek

Pro určení lomově mechanických vlastností byly připraveny dva typy zkušebních těles pro každý typ materiálu:

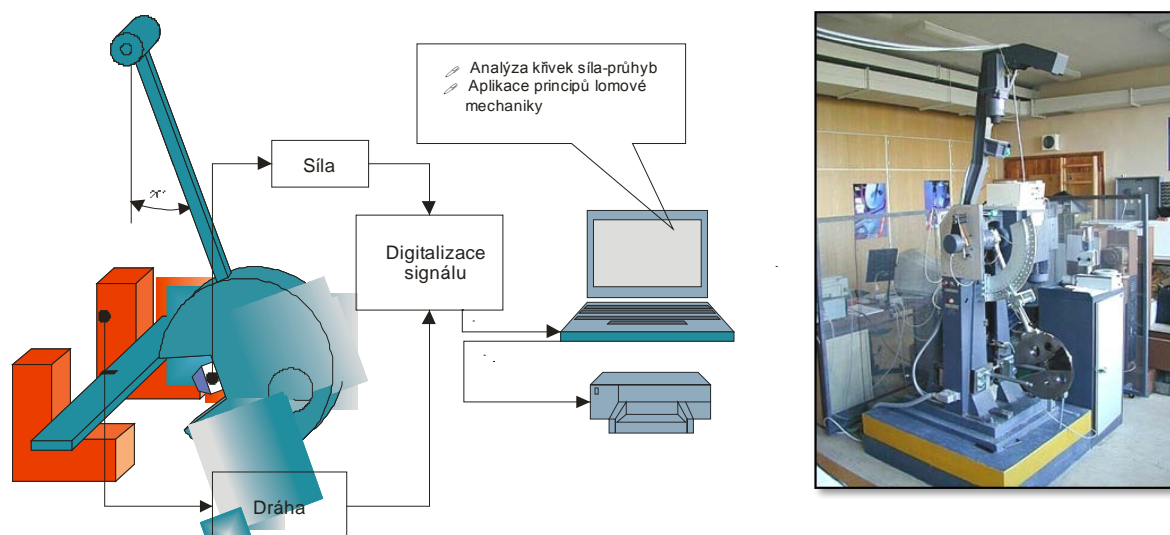
- *nevrubovaná* (pro určení dynamické meze kluzu a dynamického modulu elasticity)
- *vrubovaná* (pro určení součinitele intenzity napětí K_{Id} resp. K_{Jd} a J-integrálu J_{Id}).

„I“ vrub o hloubce 4 mm byl vytvořen pomalým vtláčováním žiletky do zkušebního tělíska pomocí speciálně zkonstruovaného přípravku.

2.3 Experimentální metodika a zpracování výsledků

Rázové zkoušky byly uskutečněny v laboratořích zkoušení mechanických vlastností Fakulty strojního inženýrství VUT Brno. Laboratoře jsou certifikovány INIQ&M podle ČSN ISO 9003/EN29003.

V rámci práce bylo použito instrumentované rázové Charpyho kladivo PSW 300 E/MFL o celkové energii 150 J, které bylo upravené tak, aby vyhovovalo požadavkům mezinárodních standardů. Beran kladiva při zkouškách dopadal na vzorky z výchylky 20°, čemuž odpovídala nárazová rychlost 0,971 m/s.

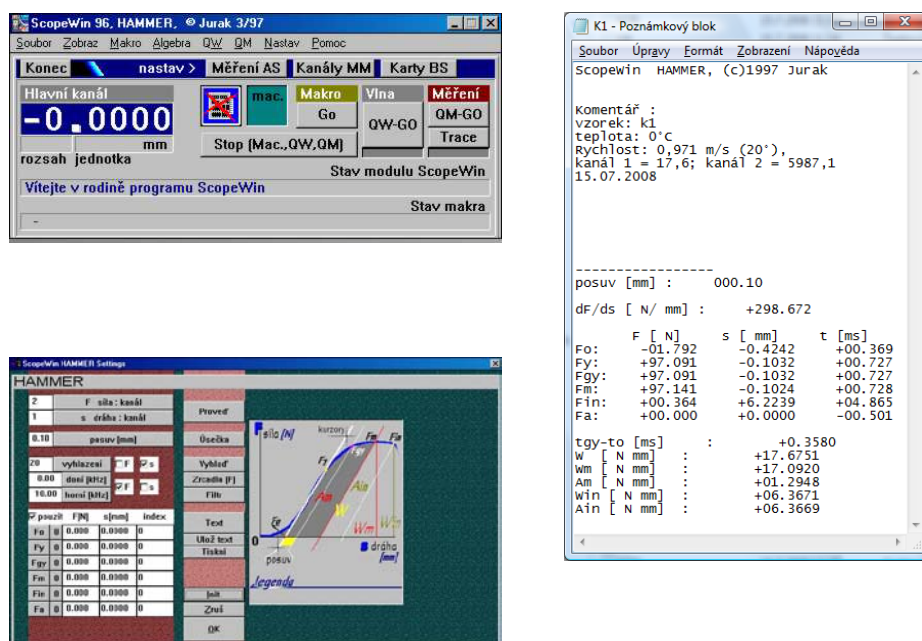


Obr. 14 Schéma měřící aparatury, Instrumentované Charpyho kladivo

Princip instrumentace spočívá v použití břitu s tenzometry, které snímají průběh síly na čase a snímače průhybu vzorků (indukční nebo optický), který snímá polohu beranu v závislosti na čase.

Vyloučením časové osy získáme závislost síla-průhyb vzorku. Integrací plochy pod křivkou zjistíme velikost práce potřebné na přeražení vzorku.

Závislost síly na průhybu při rázové zkoušce byla zpracována pomocí programu ScopeWin[®] [15].

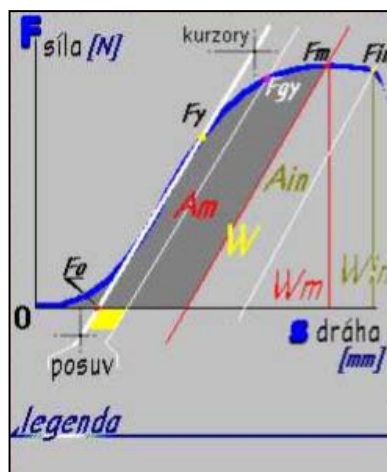


Obr. 15 Ukázka software ScopeWin[®] (hlavní okno modulu, okno pro měření síly a průhybu, výsledky rázové zkoušky Charpy ve formě textového souboru)

Pomocí software ScopeWin[®] lze stanovit následující charakteristiky:

- F_{gy} (*general yield*) síla na mezi makroplastických deformací. Síla v bodu přechodu z lineárně vzrůstající části křivky síla – průhyb do zakřivené části .
- F_m maximální síla - určí se jako maximální hodnota na křivce síla - průhyb.
- F_{iu} síla potřebná na iniciaci trhliny. Síla v bodě prudkého poklesu křivky síla - průhyb. Je-li prudký pokles shodný s maximální registrovanou silou, potom
$$F_{iu} = F_m .$$
- F_a síla při zastavení trhliny. Síla v průsečíku prudce klesající části křivky síla - průhyb s následnou pozvolnou částí křivky síla-průhyb.
- s_{gy} průhyb při dosažení meze makroplastických deformací - je to průhyb odpovídající síle F_{gy} .
- s_m průhyb při dosažení maximální síly - je to průhyb odpovídající maximální síle F_m .
- s_{iu} průhyb při iniciaci trhliny - je to průhyb odpovídající iniciaci trhliny, tzn. síle F_{iu} .
- s_a průhyb při zastavení trhliny - je to průhyb odpovídající síle F_a .
- s_t celkový průhyb.
- W_m práce do maxima síly - určí se vyhodnocením plochy pod křivkou síla – průhyb v intervalu průhybu $\langle 0; s_m \rangle$.
- W_{iu} práce na iniciaci trhliny - určí se vyhodnocením plochy pod křivkou síla – průhyb v intervalu $\langle 0; s_{iu} \rangle$.
- W_a práce na zastavení trhliny - určí se vyhodnocením plochy pod křivkou síla – průhyb v intervalu $\langle 0; s_a \rangle$.

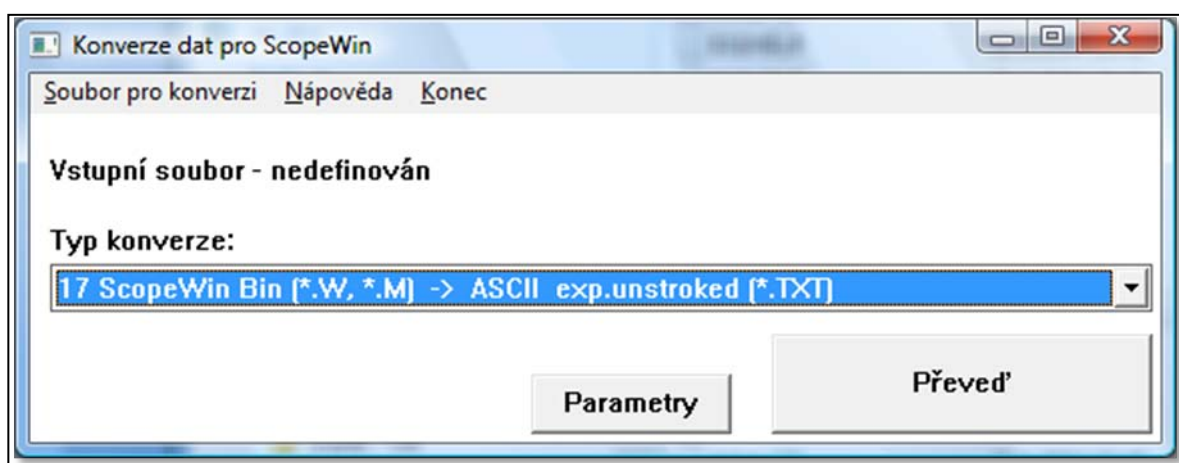
- W_t celková nárazová práce - určí se vyhodnocením plochy pod křivkou síla – průhyb v intervalu $< 0; s_t > [15, 16]$.



Obr. 16 ScopeWin® jednotlivé charakteristiky – grafická ukázka

Způsob převedení křivek z programu ScopeWin do Microsoft Office:

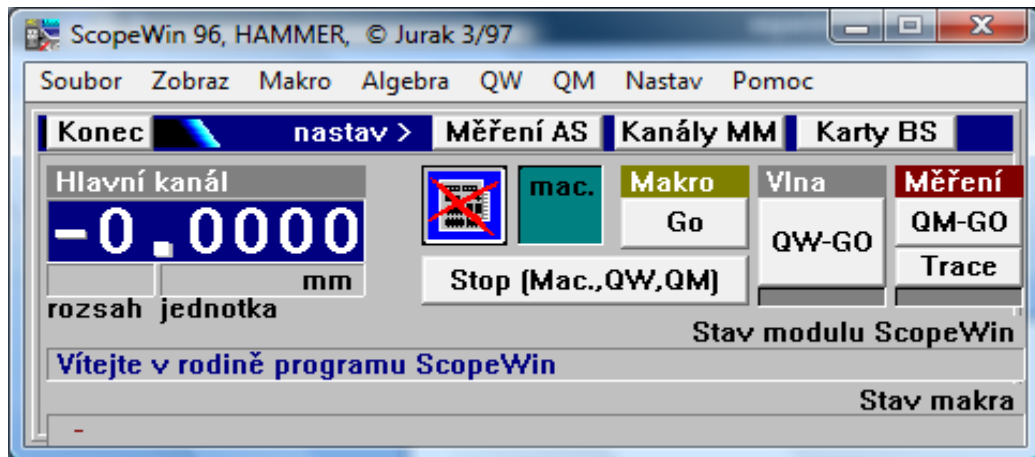
- konverze binárního souboru *.w programu ScopeWin® do ASCII *.txt souboru pro oba kanály karty,
- import do MS Excel,
- odstranění prázdných řádků v souboru pomocí maker,
- vytvoření závislosti síla-průhyb.



Obr. 17 Konverze binárního souboru *.w programu ScopeWin®

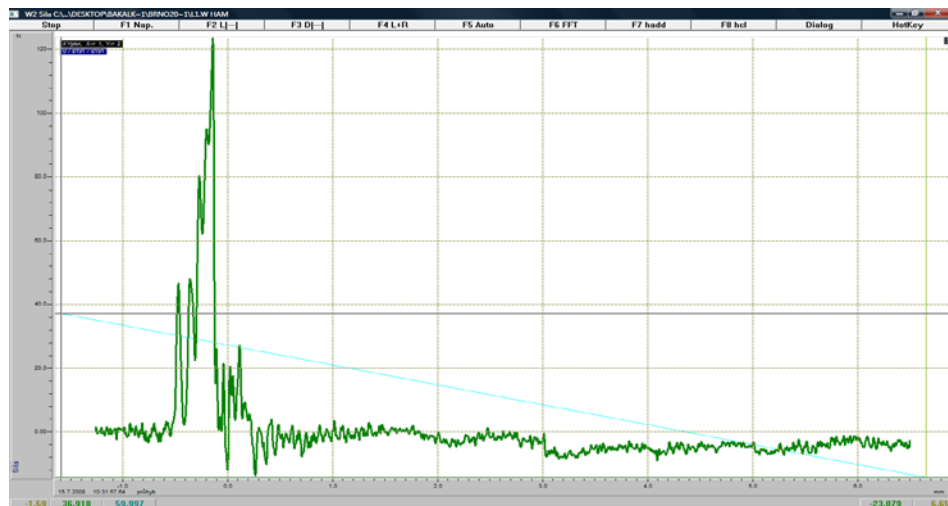
Postup vyhodnocení výsledků

- načítání vlny (*.w soubor)



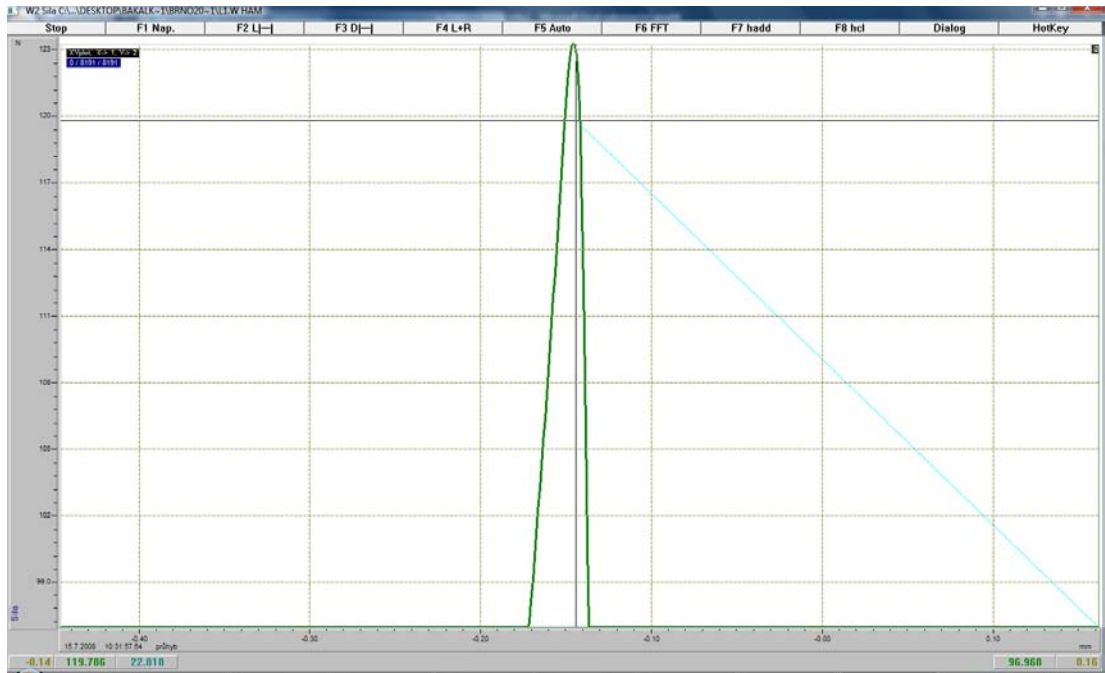
Obr. 18 Načítání vlny

- posunutí vlny, aby ležela na ose x (využití „horkých“ kláves)



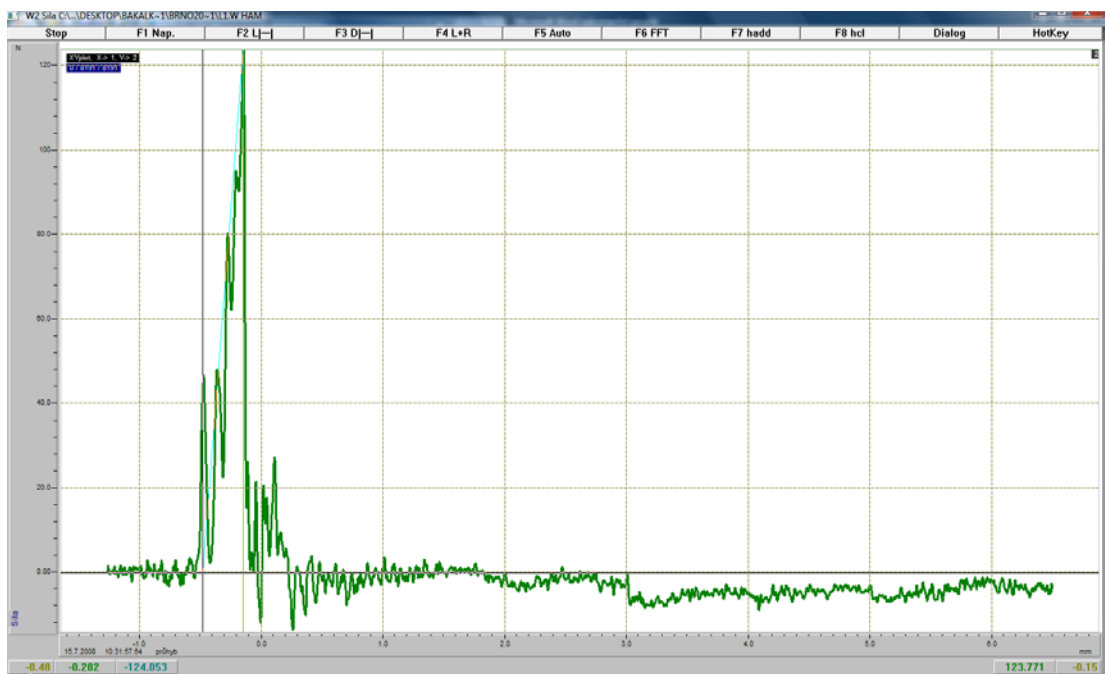
Obr. 19 Horké klávesy

- možnost ručně zadat F_{in} , F_m



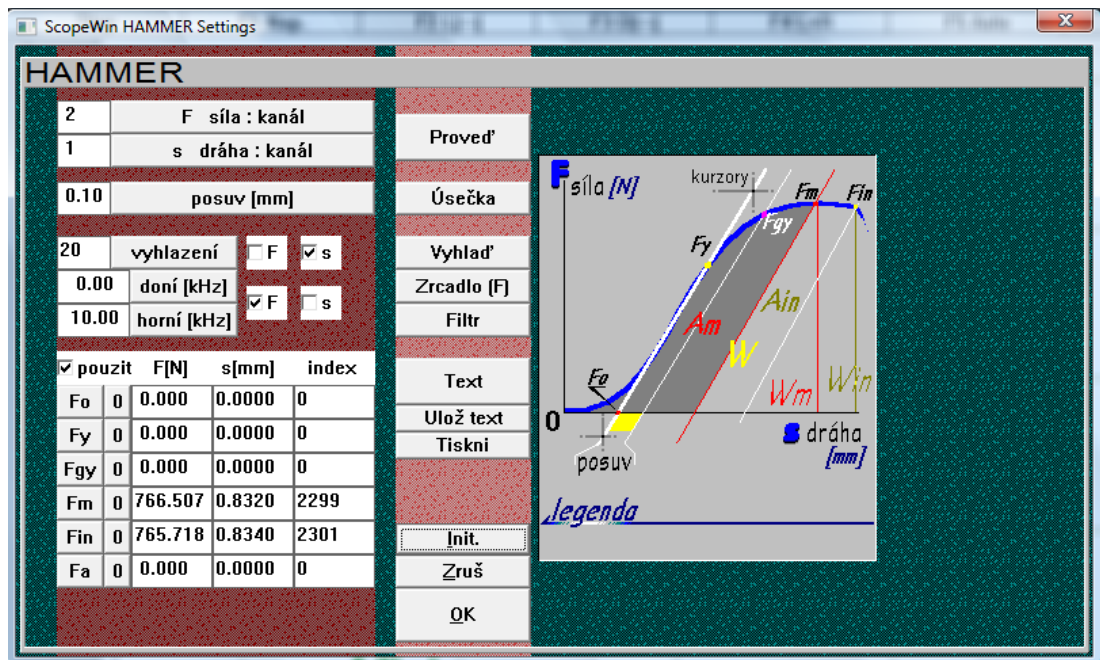
Obr. 20 Ruční zadání F_m a F_{in}

- proložení „úsečky“



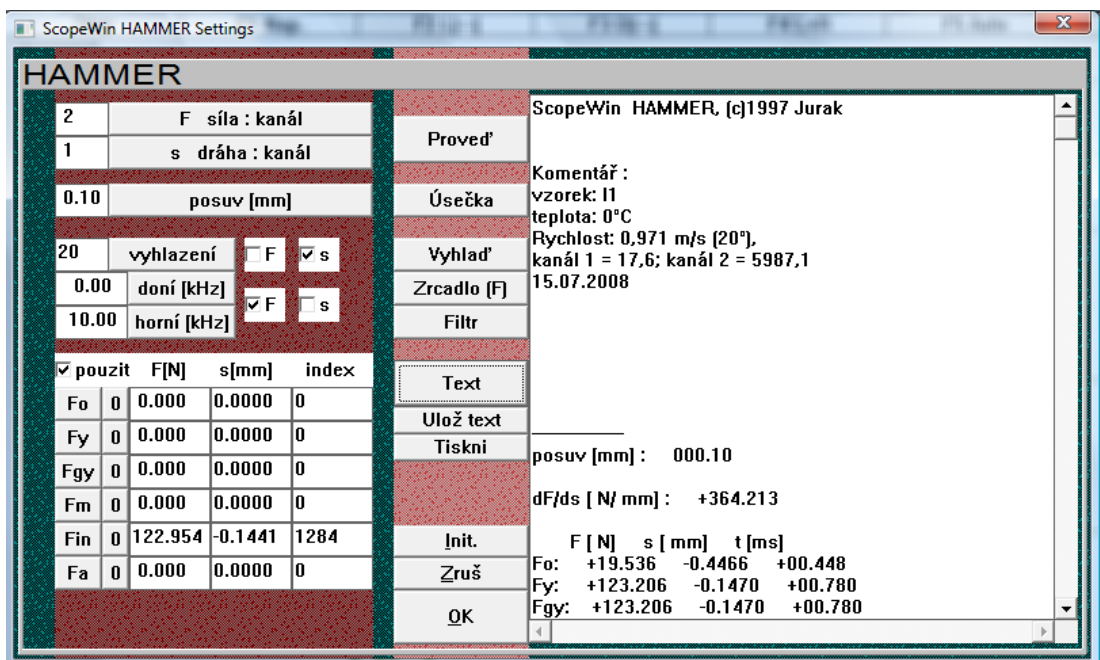
Obr. 21 Proložení „úsečky“

- po PC korekci (tzv. vyhlazení) provedení výpočtu



Obr. 22 PC korekce

- výsledný textový soubor



Obr. 23 Ukládání výsledků

- uložení ve formátu *.txt

2.4 Matematický aparát

Na základě charakteristického průběhu křivky závislosti síla-průhyb použijeme vhodný matematický aparát, abychom využili zákonitostí lineárně elastické lomové mechaniky resp. elasto-plastické lomové mechaniky.

V případě **křehkého lomu** (nestabilního lomu) platí zákony lineárně elastické lomové mechaniky a houževnatost materiálu je charakterizována kritickou hodnotou součinitele intenzity napětí neboli lomovou houževnatostí K_{I_d} .

Ze vztahu:

$$K_{Qd} = \frac{F_{\max} \cdot s}{B \cdot W^{1,5}} \cdot f_{(a/W)} \cdot 10^{-1,5} \quad (2.1)$$

je stanovena tzv. „prozatímní“ hodnota lomové houževnatosti K_{Qd} [MPa.m^{0,5}].

Funkce geometrie zkušební tělesa a/W se vypočítá:

$$f_{(a/W)} = \frac{3}{2} \cdot (a/W)^{0,5} \cdot \left(\frac{1,99 - a/W \cdot [1 - a/W] \cdot [2,15 \cdot 3,93 a/W + 2,7 (a/W)^2]}{(1 + 2 a/W) \cdot (1 - a/W)^{3/2}} \right) \quad (2.2)$$

Pokud se zkušební těleso po nárazu beranu Charpyho kladiva poruší **částečně stabilním lomem**, pak je nutné využít zákonů elasto-plastické lomové mechaniky a jejich houževnatost je popsána kritickou hodnotou J- integrálu, J_{I_d} [12].

Výsledkem je stanovení tzv. „prozatímní“ hodnoty J-integrálu J_{Qd} [N.mm⁻¹].

$$J_{Qd} = \eta_{el} \cdot \frac{A_{el}}{B \cdot (W - a_0)} + \eta_{pl} \cdot \frac{A_{pl}}{B \cdot (W - a_0)} \cdot \frac{W - a_{eff}}{W - a_0} \quad (2.3)$$

$$\eta_{el} = \frac{2 \cdot F_{GY} \cdot s^2 \cdot (W - a_0)}{f_{GY} \cdot E_d \cdot B \cdot W^3} \cdot f_{(a/W)}^2 \cdot (1 - \nu)^2 \quad (2.4)$$

$$\eta_{pl} = 2 - \frac{(1 - a_0/W) \cdot (0,892 - 4,476 \cdot a_0/W)}{1,125 + 0,892 \cdot a_0/W - 2,238 \cdot (a_0/W)^2} \quad (2.5)$$

Dynamický modul elasticity E_d a dynamická mez kluzu σ_d jsou získány z rovnic:

$$E_d = \frac{F_{GY} \cdot s^3}{4 \cdot B \cdot W^3 \cdot f_{GY}} \quad \sigma_d = \frac{3 \cdot F_{GY} \cdot s}{2 \cdot B \cdot W^2} \quad (2.6)$$

Při **stabilním lomu** se využívá tzv. *R - křivky*, což je závislost hodnoty J_{ld} na přírůstku délky trhliny a .

Výpočtem se stanoví tzv. „prozatímní“ hodnoty K_{Qd} , resp. J_{Qd} . Ty mohou být prohlášeny za platné hodnoty lomové houževnatosti K_{ld} , resp. J_{ld} v případě, že jsou splněny podmínky rovinné deformace:

$$B, a_0, (W - a_0) \gg \beta \cdot \frac{K_{Qd}^2}{\sigma_d}, \text{ kde } \beta = 3922,2 \cdot K_{Qd}^{-1,75} \Rightarrow K_{Qd} = K_{ld} \quad (2.7)$$

$$B, a_0, (W - a_0) \gg \varepsilon \cdot \frac{J_{Qd}}{\sigma_d}, \text{ } \varepsilon = 256,0 \cdot J_{Qd}^{-0,96} \Rightarrow J_{Qd} = J_{ld} \quad (2.8)$$

kde:

σ_d [MPa] je dynamická mez kluzu zjištěná na vzorcích bez vrubu a bez trhliny při stejných podmínkách zatěžování jako je určována dynamická lomová houževnatost.

Výše uvedené tři typy závislosti $F - s$ může vykazovat i jeden materiál, je-li jeho lomová houževnatost zjišťována v dostatečně širokém intervalu teplot.

Pro stanovení teplotní závislosti lomové houževnatosti je nutno přepočítat hodnoty J_{Id} [N.mm⁻¹] na K_{Id} [MPa.m^{0.5}] dle vztahu [12]:

$$K_{Id} = \sqrt{10^3 \cdot \frac{E_d}{1-\nu^2} \cdot J_{Id}} \quad (2.9)$$

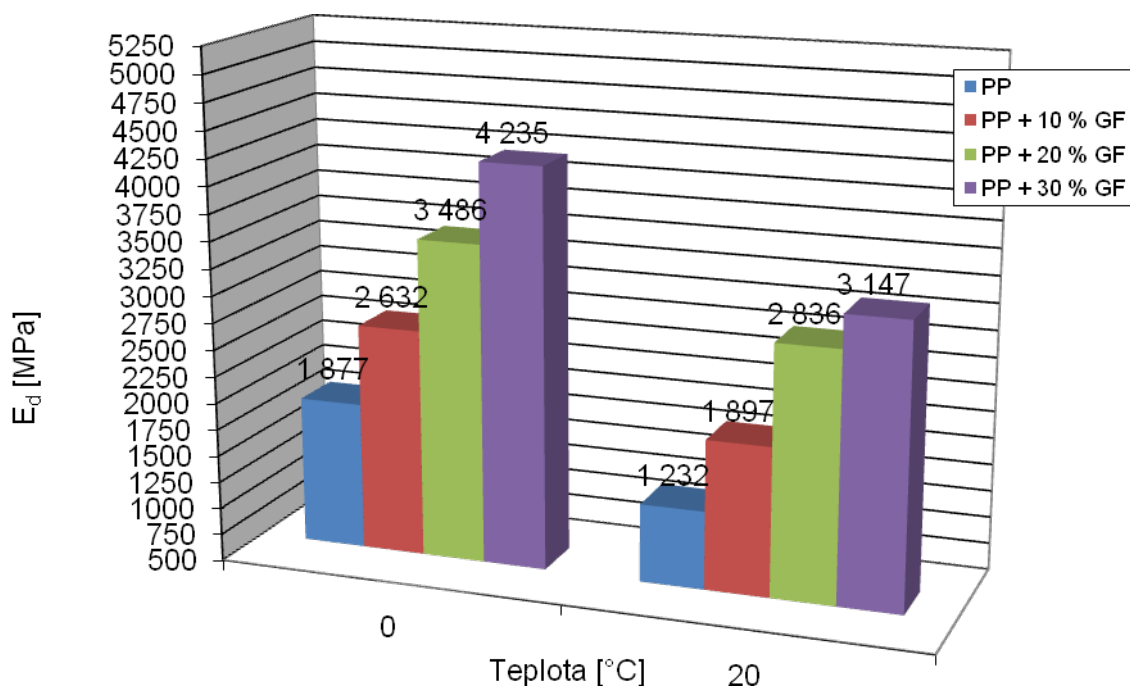
Do grafu jsou pro nízké hodnoty vynášeny hodnoty K_{Id} a při vyšších teplotách K_{Jd} .

2.5 Výsledky a diskuse

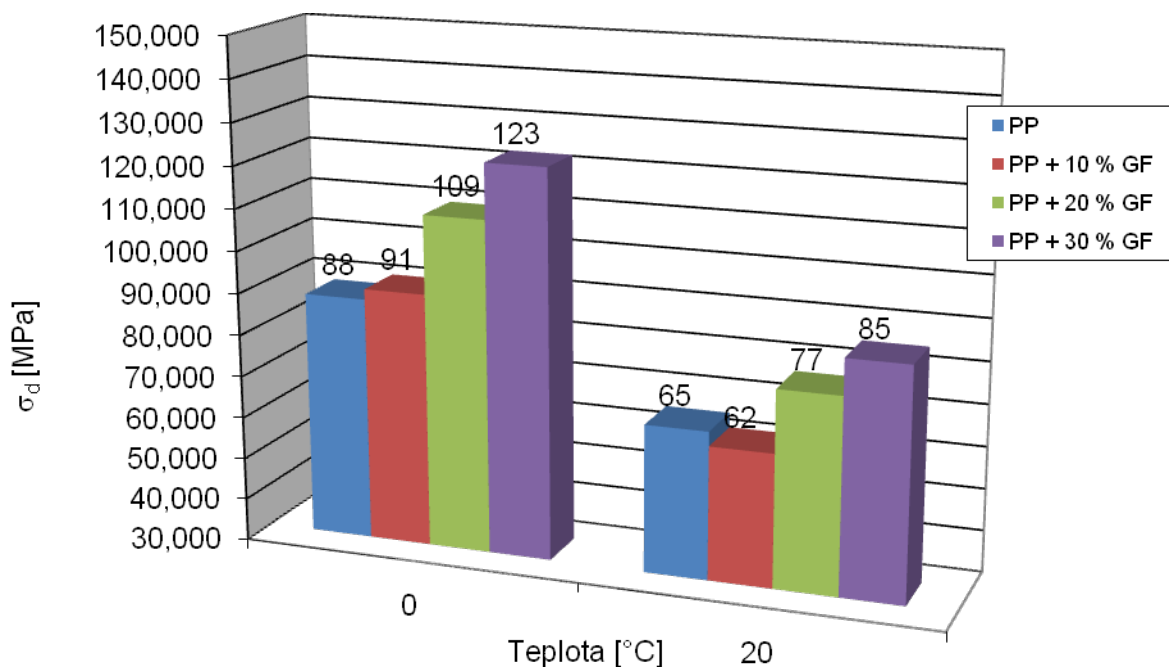
2.5.1. Určení dynamického modulu pružnosti E_d a dynamické meze kluzu σ_d

Na obrázcích 24 a 25 jsou uvedeny závislosti dynamického modulu pružnosti E_d a dynamické meze kluzu σ_d na teplotě a stupni plnění materiálu krátkými skleněnými vlákny. Tyto veličiny byly stanoveny na základě měření pomocí tříbodového ohybu metodou Charpy na vzorečkách bez trhliny. Dle předpokladů obě veličiny rostou se stupněm plnění, tedy materiály se stávají pevnějšími v ohybu (důsledek vyztužení). Obě veličiny také klesají s teplotou. Je tedy zřejmé, že pokud potřebujeme při vloženém napětí u vstřikovaného výrobku z iPP stabilní tvar ve větším teplotním rozsahu použití, tak se vyztužení krátkými vlákny nevyhneme.

Hodnoty dynamického modulu pružnosti E_d a dynamické meze kluzu σ_d byly následně použity jako jeden z nutných parametrů pro určení hodnot J-integrálu a součinitele intenzity napětí K_{Id} resp. K_{Jd} .



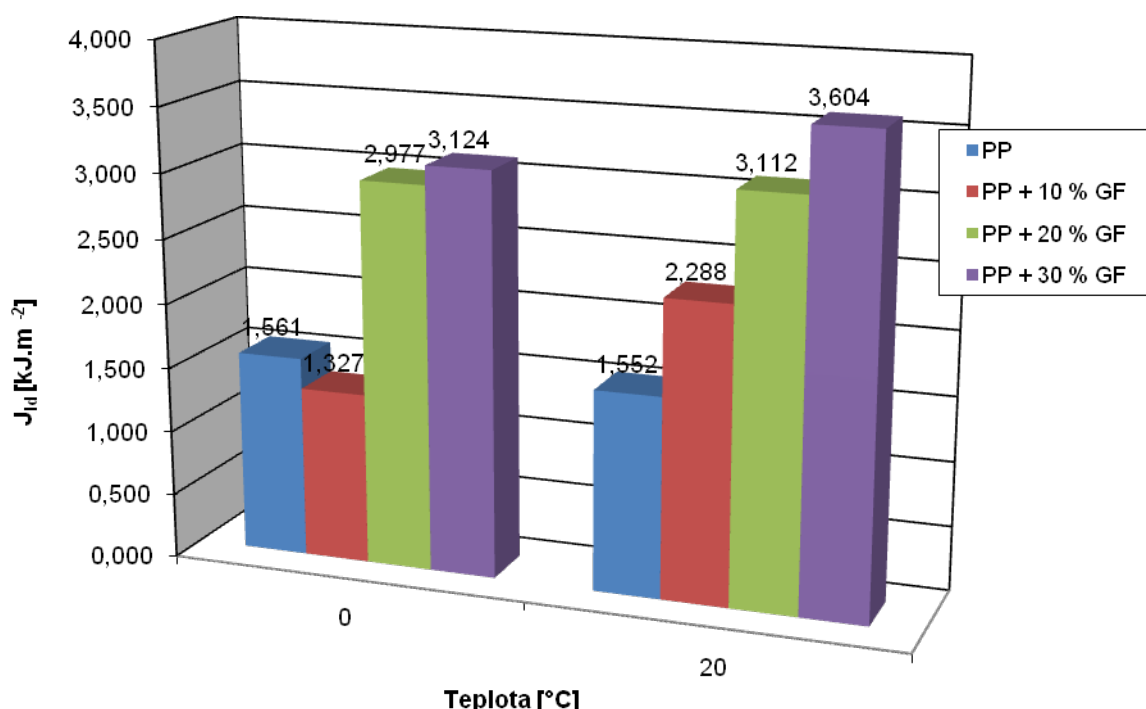
Obr. 24 Závislost E_d na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny



Obr. 25 Závislost σ_d na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny

2.5.2. Stanovení lomové houževnatosti

Houževnatost materiálu je složitější pojem než pouhá představa pevnosti. Nejedná se zde o jednu vlastnost, ale je to komplex vlastností, které v celku dávají materiálu schopnost odolávat vloženému vnějšímu napětí a následně se „bránit“ šíření trhliny. Obvykle se houževnatost chápe jako odolnost materiálu proti křehkému (nestabilnímu) lomu. Z této nejčastěji uváděné formulace vyplývá souvislost mezi houževnatostí materiálu a množstvím energie, které je materiál schopen absorbovat, než se poruší.

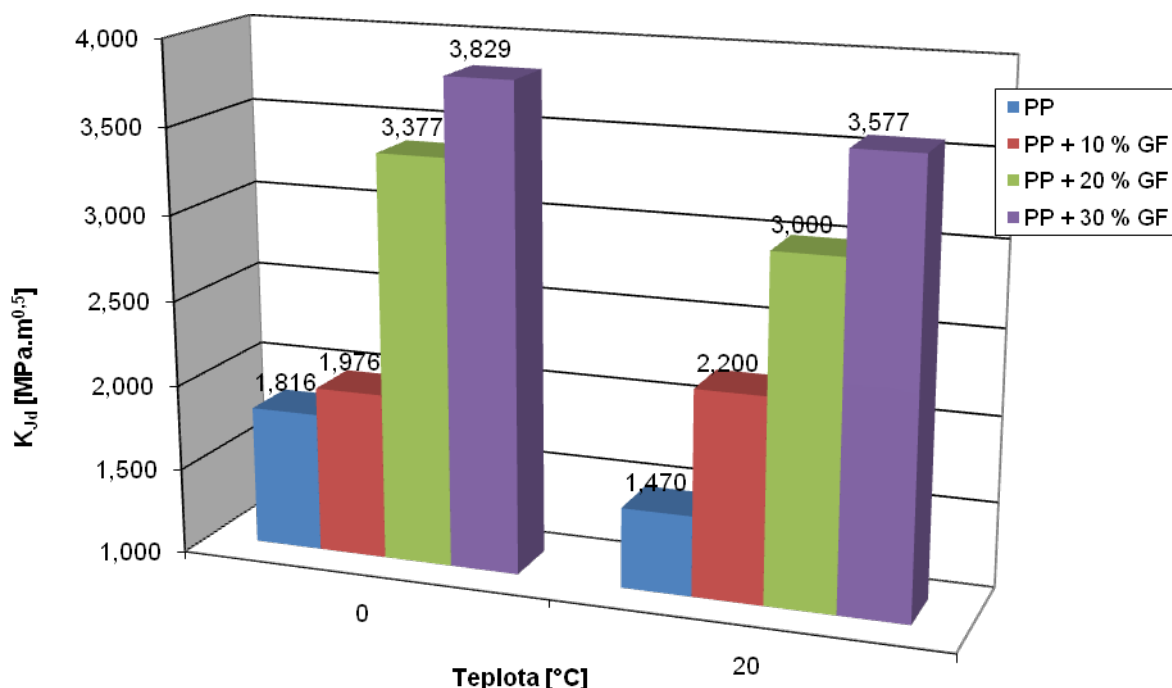


Obr. 26 Závislost J_{Id} na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny

Na obr. 26 je zobrazena závislost J-integrálu na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny. J-integrál byl poprvé formulován v roce 1968 Ricem a slouží k popisu velikosti napětí a deformace v nelineárním elastickém materiálu. Je tedy zřejmé, že k jeho popisu je nutné využít zákony elasticko-plastické lomové mechaniky (EPFM).

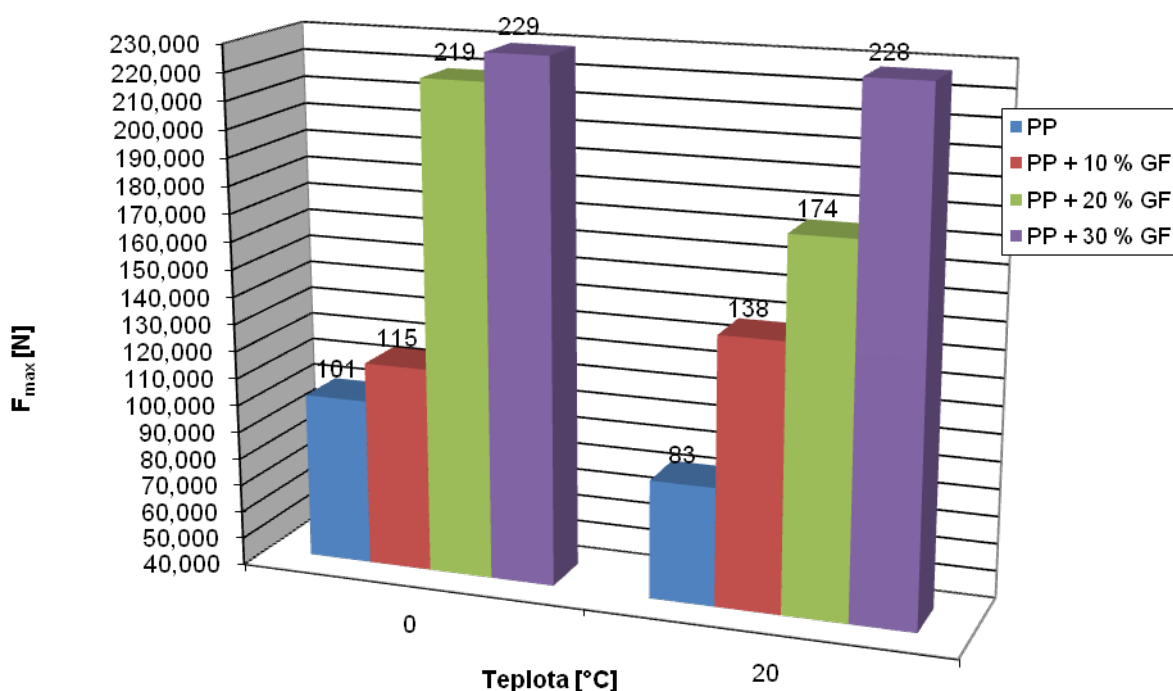
Z grafu je zřejmé, že se vzrůstajícím stupněm plnění hodnoceného materiálu hodnoty J-integrálu (odolnost vůči šíření trhliny), významně rostou. Výjimku tvoří pouze čistý iPP a

iPP s 10 % krátkých skleněných vláken při teplotě 0°C, kdy čistý iPP vykazoval sice vyšší hodnoty J-integrálu, ale proti ostatním plněním ne zase až tak významně.



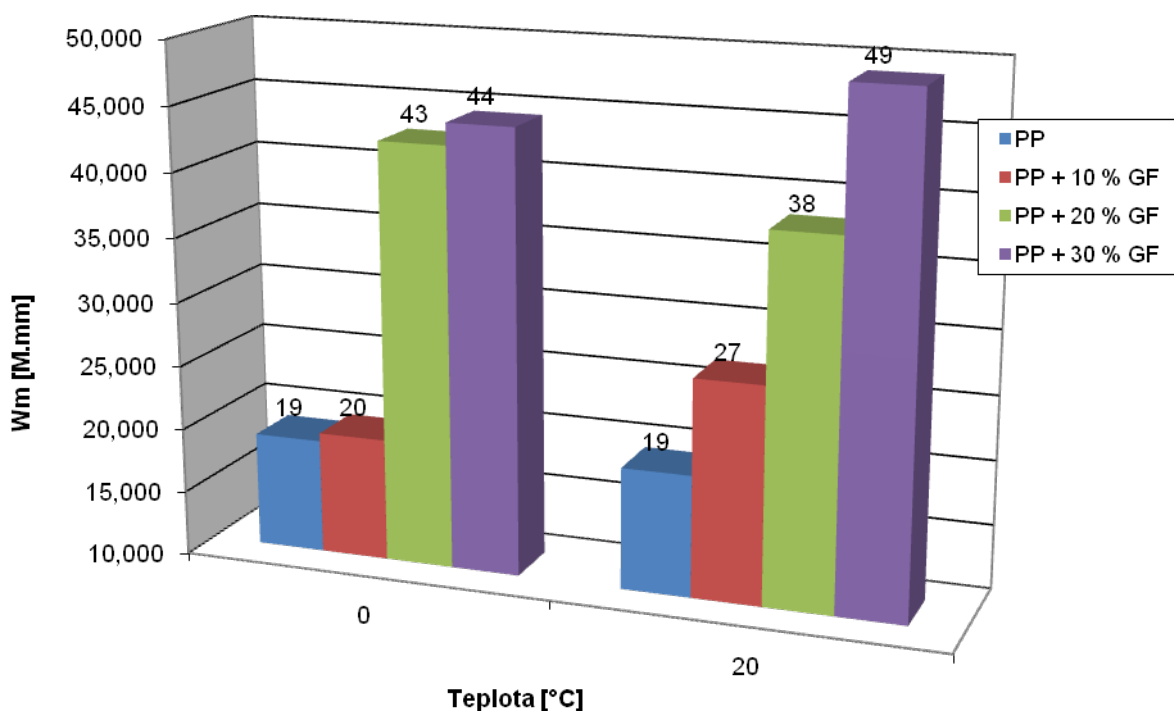
Obr. 27 Závislost K_{Jd} na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny

Obrázek 27 ukazuje závislost součinitele intenzity napětí K_{Jd} na teplotě a stupni plnění. Jedná se zde o zatížení dle módu I, tedy o případ, kdy je tahové napětí σ kolmé k rovině trhliny. Jde o technicky nejdůležitější případ. Je známé, že rostoucí únavová trhlina se stáčí tak, aby platilo zatěžování dle módu I. Z grafu je patrné, že materiály s vyšším stupněm plnění jsou schopny odolávat vyššímu vloženému napětí, tedy jejich lomová houževnatost je vyšší. Zajímavé zjištění je, že se vzrůstající teplotou tato schopnost materiálu mírně klesá. Tento pokles není ale nijak významný. Je zřejmé, že k dostatečnému popisu teplotní závislosti lomové houževnatosti, by bylo nutno teplotní interval významně rozšířit.



Obr. 28 Závislost F_{max} na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny

Velmi důležitým parametrem pro praktické využití je maximální velikost síly, kterou je výrobek schopen akceptovat, aniž by došlo k nestabilnímu šíření trhliny. Výsledné hodnoty pro námi hodnocené materiály a zkušební tělesa jsou uvedeny na obr. 28. Je zde vidět markantní rozdíl ve výsledných hodnotách F_{max} mezi čistou maticí a plněnými materiály, především ve srovnání s kompozity s vyšším stupněm plnění. Teorie říká, že u vláknových kompozitů matrice slouží k přenosu napětí do vláken, která pak nesou hlavní zatížení. Je zde tedy zcela zjevné, že pro prakticky využitelný krátkovláknový kompozit je nutné najít synergii mezi vlastnostmi matrice, její přenosovou schopností napětí do vláken a samotnými vlastnostmi krátkých skleněných vláken. V našem experimentu vycházely z hlediska maximální síly nejvýhodněji zkušební tělesa vyrobená z iPP plněného 30 hm, % krátkých skleněných vláken.

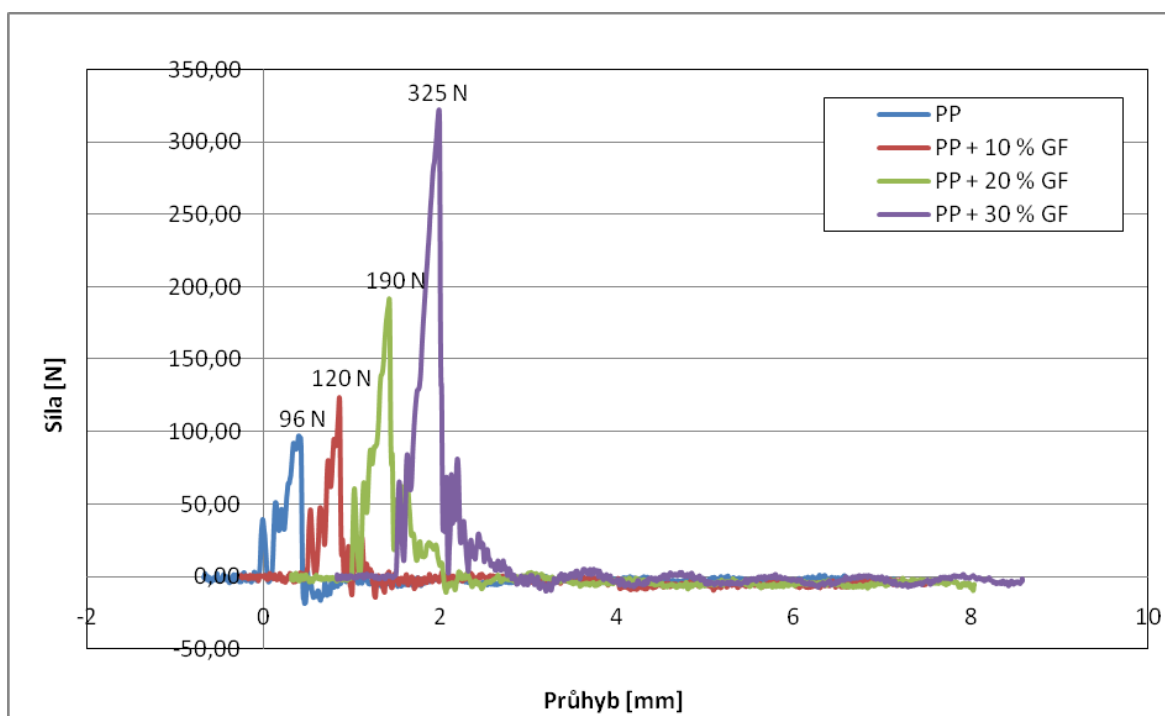


Obr. 29 Závislost W_m na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny

Pokud bychom hodnotili práci W_m , tzn. takovou velikost práce potřebné při nárazu, abychom zatížili zkušební těleso maximální silou F_{max} , tak výsledkem bude graf na obr. 29. Tato práce se určí vyhodnocením plochy pod křivkou síla – průhyb v intervalu průhybu $< 0; s_m >$. V našem případě toto za nás provede software ScopeWin[®] stejně jako například v případě určení F_{max} a dalších charakteristických hodnot z křivky síla-průhyb a exportuje je v *.txt souboru. Z grafu je zřejmé, že nejvyšších hodnot práce W_m při přelomení vzorečků s vrubem dosahují materiály s nejvyšším stupněm plnění.

2.5.3. Teplotní závislost křivek síla – průhyb pro jednotlivé materiály a vybraná zkušební tělíska

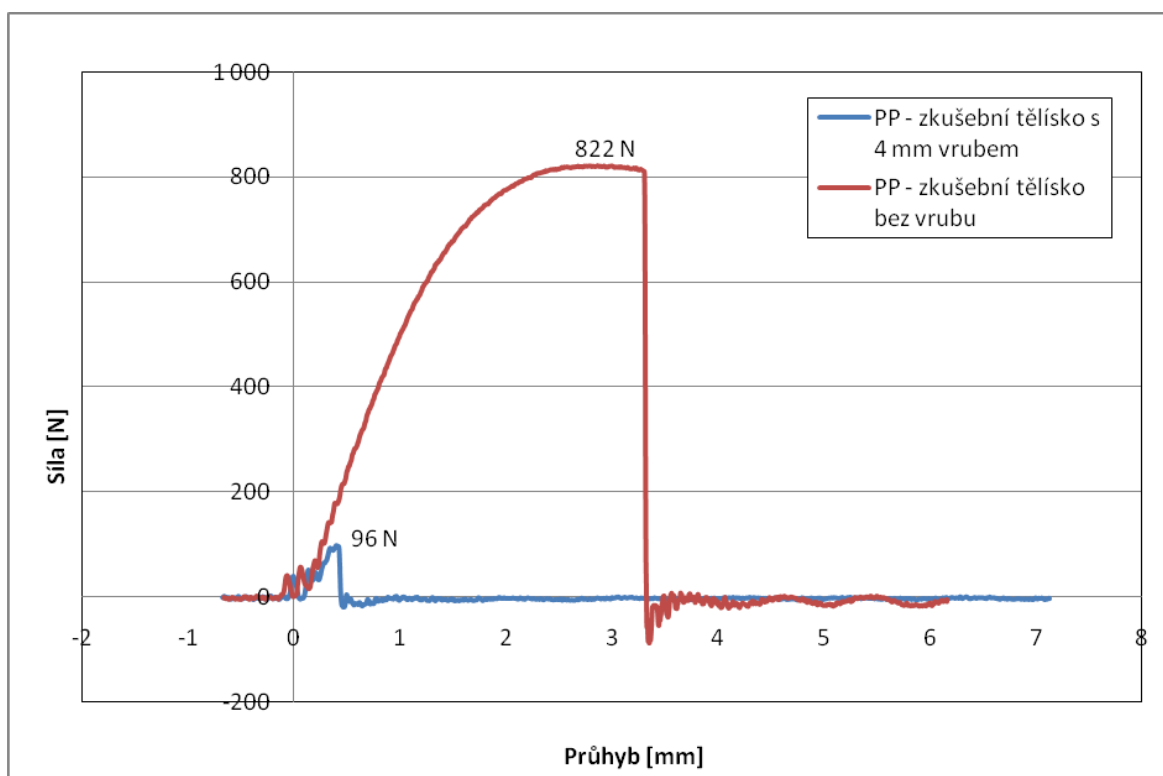
Jednou z velkých výhod instrumentace Charpyho kladiva je možnost zachycení celého průběhu křivky závislosti síla-průhyb s možností určení celé řady lomově-mechanických vlastností materiálu na rozdíl od neinstrumentované formy rázového kladiva, kdy výsledkem obvykle bývá pouze hodnota energie při lomu určená pomocí vlečené ručičky a příslušné cejchované stupnice. Jako názorný příklad bylo vybráno několik následujících grafů.



Obr. 30 Závislost síla-průhyb pro různé stupně plnění

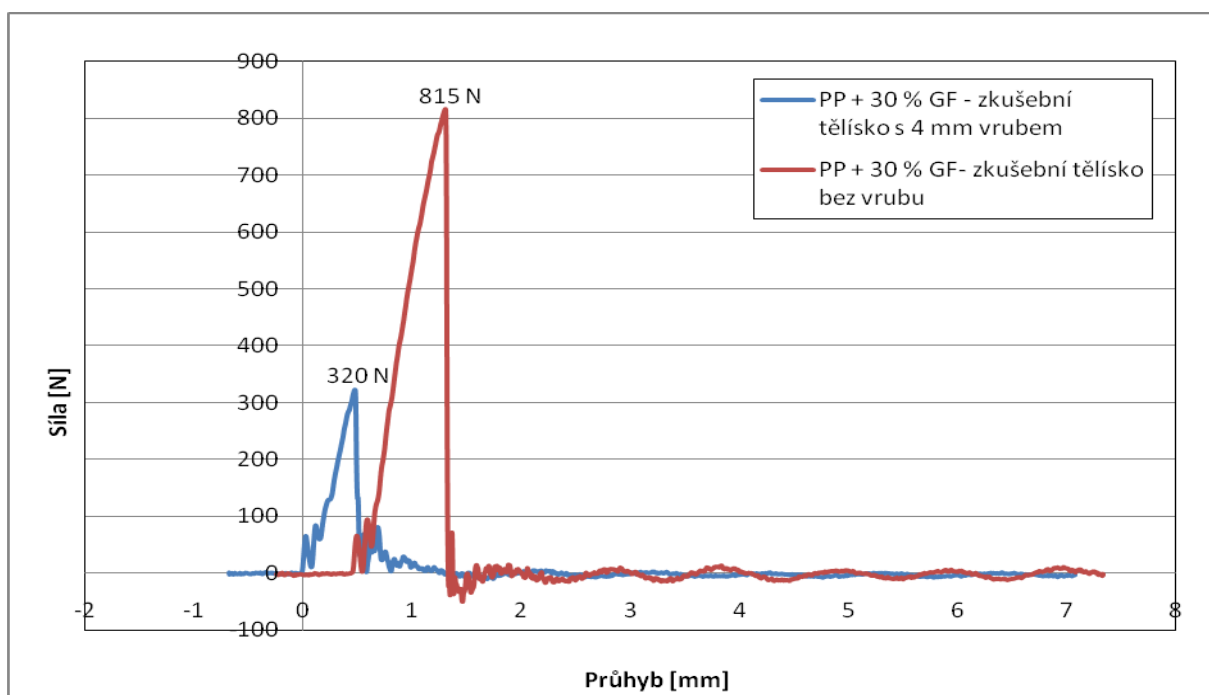
(tělíska s vrubem 4 mm, teplota 0 °C)

Na obr. 30 lze vidět průběhy závislosti síla-průhyb pro různé stupně plnění. Tyto křivky byly určeny při rázové zkoušce na zkušebních tělískách s vrubem o hloubce 4 mm a teplotě 0 °C. Výsledné křivky byly pro lepší přehlednost (aby se nepřekrývaly) posunuty v rámci osy průhybu. Je zde krásně vidět jedna z nejdůležitějších vlastností vyztužených kompozitů, tedy schopnost nést vyšší zatěžovací sílu než pouhá čistá matrice. Se vzrůstajícím stupněm plnění síla nutná k iniciaci nestabilního lomu roste.



Obr. 31 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP s 4 mm vrubem a bez vrubu (teplota 0 °C)

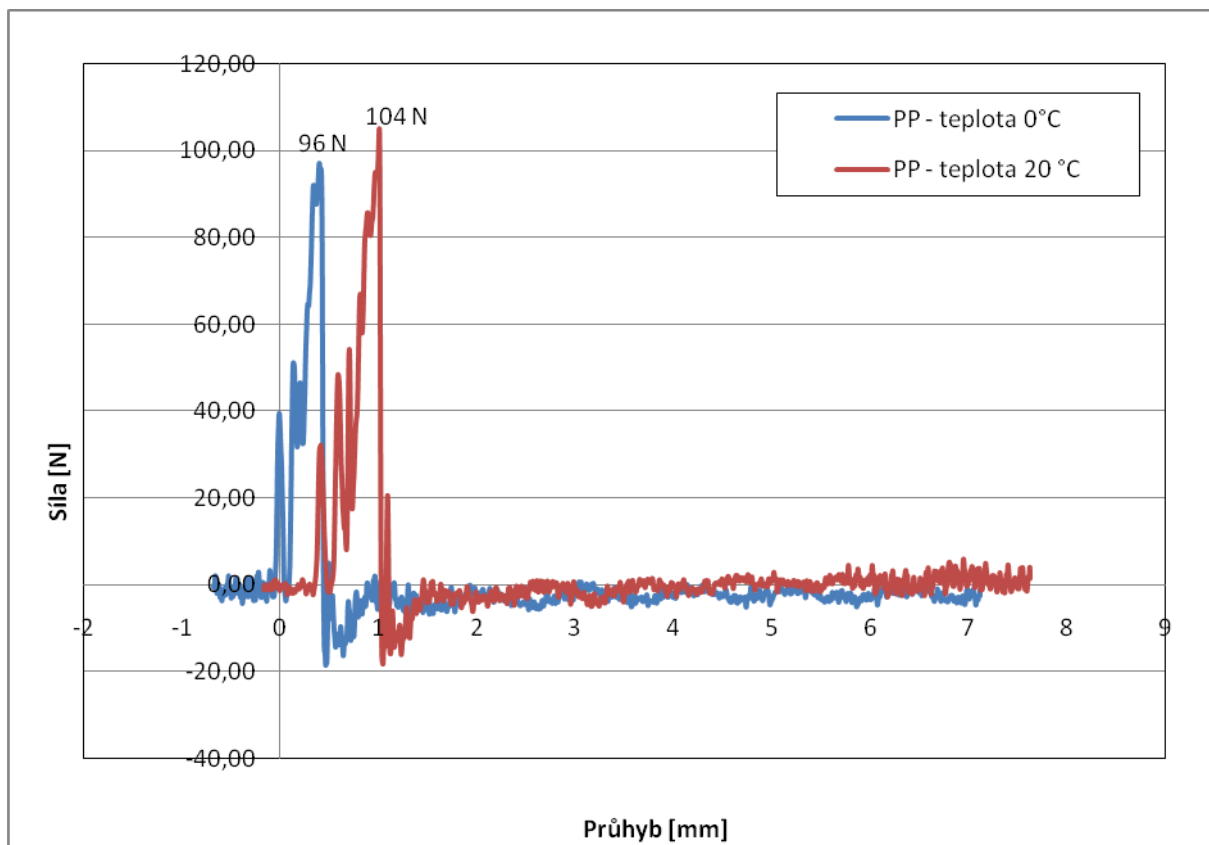
Křivky na obrázku 31 ukazují rozdíl mezi rázovou zkouškou provedenou na vrubovaném (4 mm hloubka vrubu) a nevrubovaném zkušebním tělese. Pokud je přítomna startovací trhlina tak dojde k velmi výraznému poklesu schopnosti odolávat lomu. Například síla potřebná k iniciaci nestabilního lomu poklesne téměř na jednu desetinu hodnoty pro nevrubované těleso. Ještě výraznější je to při pohledu na příslušnou energii nutnou k lomu, tedy velikosti plochy pod křivkou síla - průhyb. Schopnost odolávat napětí navíc výrazně klesá s klesajícím poloměrem kořene trhliny. Je tedy nezbytně nutné v praxi zabezpečit bezdefektnost nejen povrchu ale celého výrobku.



Obr. 32 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP + 30 % GF s 4 mm vrubem a bez vrubu (teplota 0 °C)

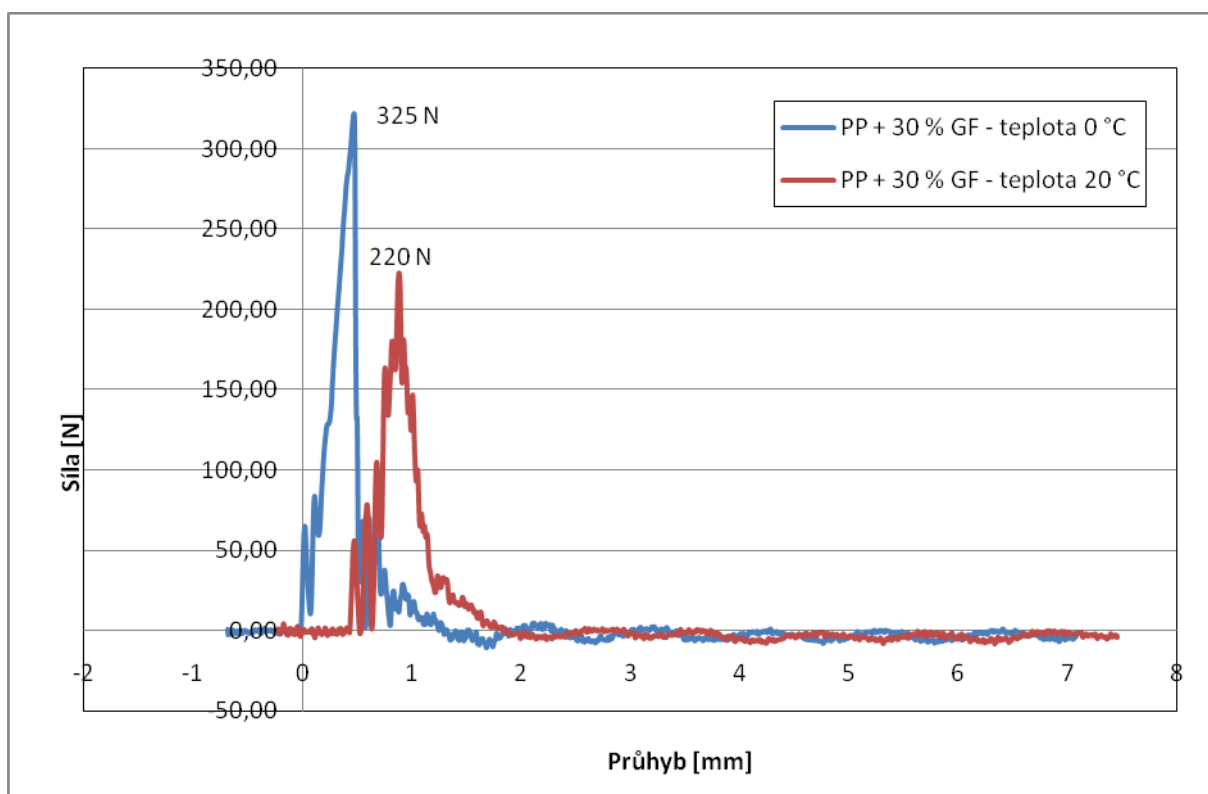
Obrázek 32 popisuje stejnou situaci, jen při použití kompozitu s 30 hmotnostními procenty krátkých skleněných vláken. Je zde vidět, že pokles hodnot při přítomnosti vrubu není až tak velmi výrazný, jako při použití čisté matrice. Jako příklad lze uvést pokles velikosti maximální síly v přítomnosti 4 milimetrového vrubu na přibližně 40 procent naměřené hodnoty pro nevrubované těleso.

Na obr. 33-36 jsou uvedeny ukázky závislosti síla průhyb pro vrubovaná a nevrubovaná tělesa, dvě teploty tzn. 0 a 20 °C a dva materiály – homopolymerní matrici a iPP plněný 30 hm. % krátkých skleněných vláken.



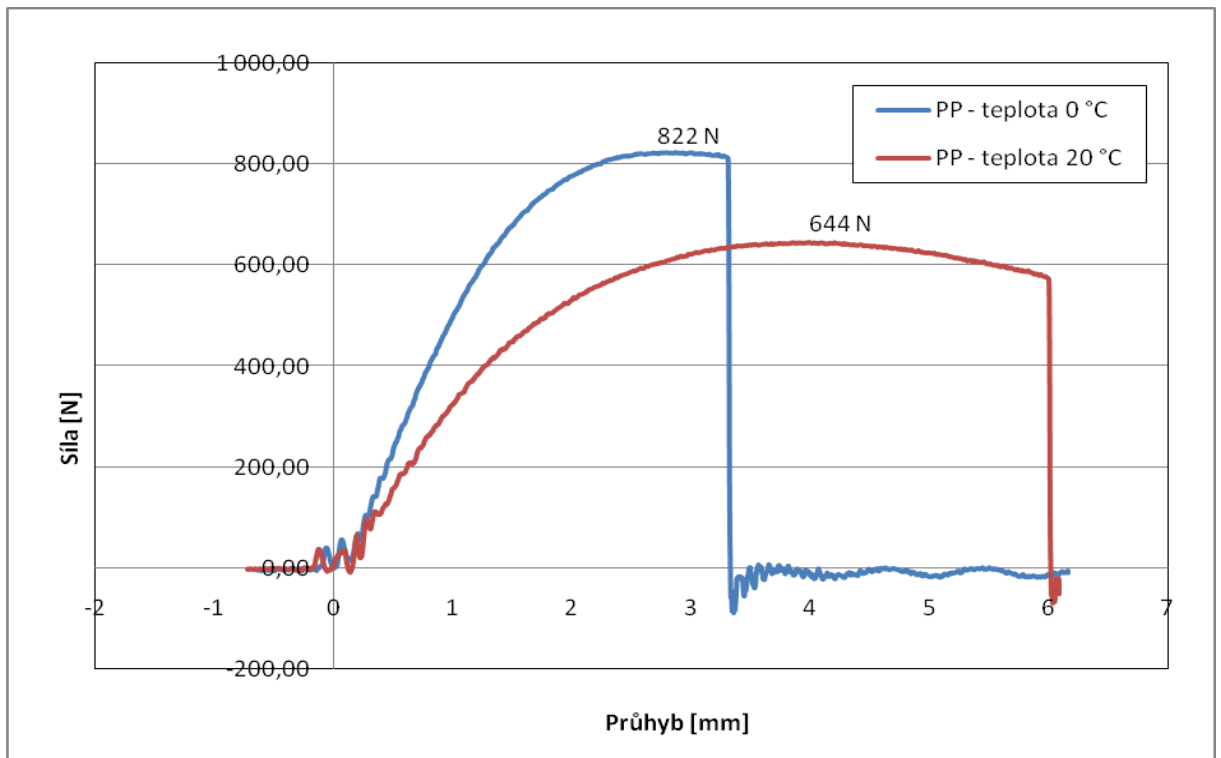
Obr. 33 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP s 4 mm vrubem, teplota 0 a 20 °C

V případě zkušebních tělísek s vrubem (obr. 33 a 34) je zřejmý pozitivní vliv plnění iPP krátkými skleněnými vlákny. Při obou teplotách je kompozit schopen nést vyšší zatěžovací sílu než pouhá čistá iPP matrice.

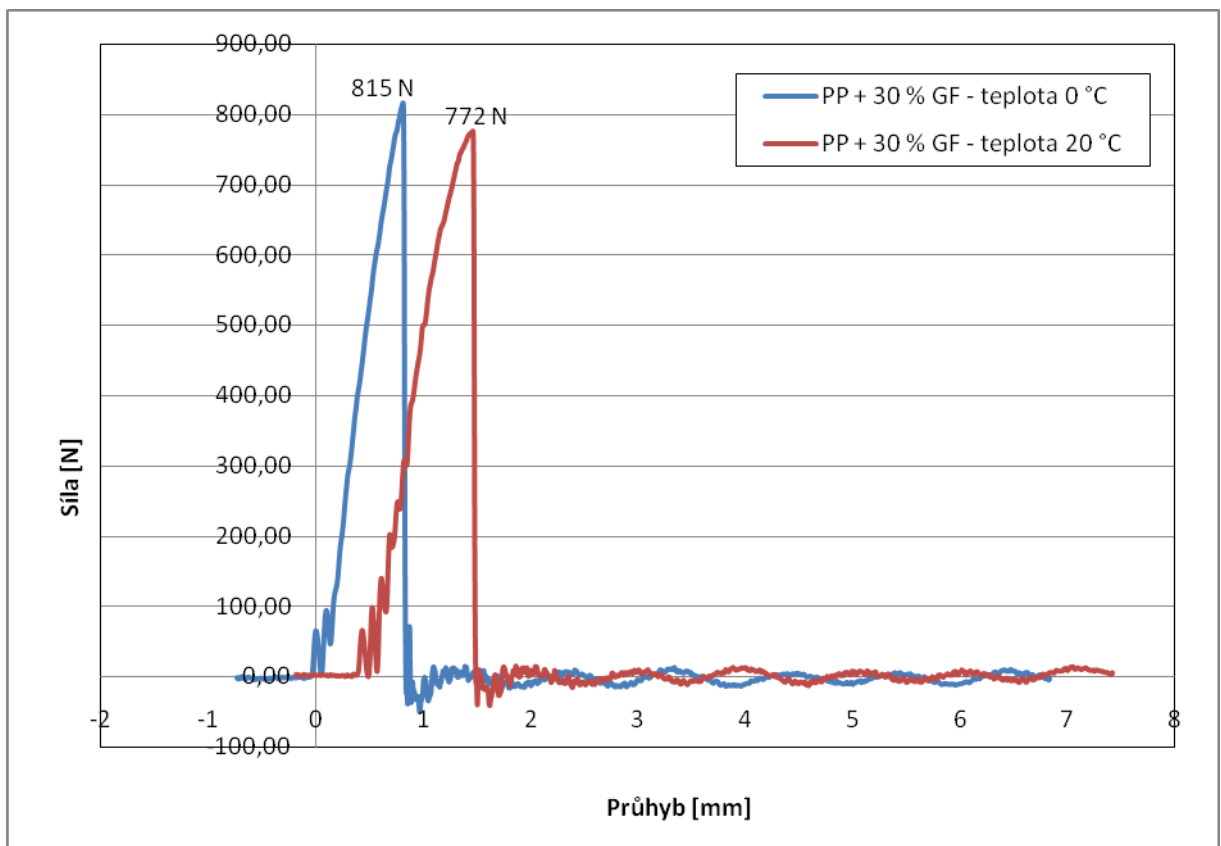


Obr. 34 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP + 30 hm. % GF s vrubem 4 mm, teplota 0 a 20 °C

Průběhy závislosti síla průhyb pro tělesa bez vrubů pro uvedené dva materiály jsou značně odlišné viz. obr. 35 a 36. Zatímco čistý iPP vykazuje s rostoucí teplotou výrazný pokles maximální síly a rostoucí velikost průhybu při lomu, tak vyztužující vlákna způsobí fakt, že s rostoucí teplotou sice maximální síla klesá, ale nikoliv tak výrazně. Vlákna stále plní svou úlohu a nesou většinu vloženého napětí. Dalším důležitým poznatkem je malá hodnota průhybu u plněného kompozitu, tzn. výrobek se bude až do lomu minimálně deformovat.



Obr. 35 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP bez vrubu, teplota 0 a 20 °C



Obr. 36 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP + 30 % GF s vrubem 0 mm, teplota 0 a 20 °C

2.6 ZÁVĚR

Mechanické vlastnosti kompozitu s matricí z iPP byly hodnoceny v závislosti na stupni plnění krátkými skleněnými vlákny a teplotě. Při experimentu bylo využito instrumentované Charpyho kladivo PSW 300 E/MFL o celkové energii 150 J vyhovující mezinárodním standardům, software ScopeWin[®], principy lineárně elastické popř. elasticko-plastické lomové mechaniky.

Po vyhodnocení experimentálně získaných poznatků lze formulovat tyto závěry:

1. Vyztužení polymerní matrice krátkými skleněnými vlákny s povrchovou úpravou apretací aminosilanem způsobilo vzrůst dynamického modulu pružnosti E_d a dynamické meze kluzu σ_d . Obě veličiny rostly s rostoucím stupněm plnění materiálu. Obě charakteristiky ale naopak s rostoucí teplotou vykazují výrazný pokles hodnot.
2. Se vzrůstajícím obsahem plnění roste odolnost materiálu vůči lomu. Dokladem toho jsou vzrůstající hodnoty J-integrálu a součinitele intenzity napětí K_{Jd} . Přítomnost výztuže zaručuje vyšší odolnost materiálu proti lomu při obou testovaných teplotách.
3. Rostoucí podíl krátkovlákně výztuže v kompozitu u vzorečků opatřených vruby způsobil výrazný vzrůst síly a energie potřebné k iniciaci lomu a u zkušebních těles bez vrubů významný pokles maximálního průhybu v okamžiku lomu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LAPČÍK, L., RAAB M.: *Nauka o materiálech II*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2000, skripta.
- [2] NEZBEDOVÁ, E., GAHLEITNER M., FEIBIG J., GRELLMANN, W., SEIDLER, S., STARKE J. U., KOCH T.: *Vícefázové PP – systémy, vztah mezi strukturou a houževnatostí*, *Plasty a kaučuk* 1997.
- [3] AGARWAL B. D., BROUTMAN L.J.: *Vláknové kompozity*, Praha: SNTL, 1987.
- [4] BAREŠ, R. A.: *Kompozitní materiály*, Praha: SNTL 1988.
- [5] VIKTORIN, A.: *Analýza napjatosti čtvercové ortotropní desky*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2005, bakalářská práce.
- [6] MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J.: *Polymery, struktura, vlastnosti, použití*, Praha: SOBOTÁLES, 2000.
- [7] RAAB, M.: *Materiály a člověk, Praha 2: Encyklopedický dům*, 1999, ISBN 80-86044-13-0.
- [8] KOTEK, J., RAAB, M., SOVA, O.: *Polypropylen na konci století – klasický materiál s nadějnou perspektivou*, *Plasty a kaučuk*, 1998.
- [9] POKLUDA, J., KROUPA, F., OBDRŽÁLEK, L.: *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek*, Brno: PC-DIR spol. s.r.o., 1994.
- [10] CAFOUREK, M.: *Vztah mezi lomovou houževnatostí a geometrií vrubu u krátkovláknového kompozitu s PP maticí*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2004, diplomová práce.
- [11] ČSN EN ISO 179: *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*, Český normalizační institut, 1998.
- [12] ČSN EN ISO 179-2: *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy, Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška*, Český normalizační institut, 2000.
- [13] GRELLMANN W., SEIDLER S., HESSE W.: *Prozedur zur Ermittlung des Risswiderstandsverhaltens aus dem Instrumentieren Kerbschlagbiegeversuch*. Institut für Polymerwerkstoffe e.V., Merseburg, Deutschland 1993.

- [14] ELISEK, P.: *Houževnatost polymerních materiálů na bázi izotaktického polypropylenu, Toughness of polymeric materials derived from isotactic polypropylene, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2006, disertační práce.*
- [15] <http://www.isibrno.cz/~jurak/scopewin.html>.
- [16] www.fme.vutbr.cz.
- [17] SAMCEF User's Manuals v. 8.1, Samtech Belgium 2000.
- [18] RICE J. R.: A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME*: 379-386, 1968.
- [19] NIKHISHKOV G. R., ATLURI S.N.: An equivalent domain integral method for computing crack tip integral parameters in non-elastic, thermo-mechanical fracture, *Engineering fracture mechanics* 26 (6): 851-867, 1987.
- [20] NIKHISHKOV G. R., ATLURI S.N.: Calculation of fracture mechanics parameters for an arbitrary three dimensional crack by the equivalent domain integral method, *International Journal of Numerical Engineering* 24: 1801-1821, 1987.
- [21] ŠUBA, O.: *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001, skripta.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam
α	–	monoklinická krystalografická modifikace PP
a	mm	délka povrchové trhliny nebo poloviny trhliny vnitřní; délka vrubu
a_0	mm	počáteční délka vrubu
a_{eff}	mm	efektivní hodnota délky vrubu
A_{el}	N.mm	elastická část deformační energie
A_{pl}	N.mm	plastická část deformační energie
β	–	trigonální krystalografická modifikace PP
B	mm	tloušťka zkušebního tělíska
c	mm	délka trhlíčky
c_{krit}	mm	kritická velikost trhliny
E_d	MPa	dynamický modul pružnosti vzorku
F_a	N	síla při zastavení trhliny
F_{max}	N	maximální síla při rázu
F_{GY}	N	síla při přechodu z elastického do elasticko- plastického chování (na mezi makro- plastických deformací)
F_{iu}	N	síla potřebná na iniciaci trhliny
f	m ²	plocha pod funkcí p
f_{max}, s_m	mm	maximální průhyb při rázu
f_{GY}, s_{gy}	mm	průhyb při přechodu z elastického do elastickoplastického chování
$f(a_0/W)$	-	funkce geometrie zkušebního tělíska
γ	–	triklinická krystalografická modifikace PP

J	kJ/m^2	J-integrál
J_{IC}	kJ/m^2	kritická hodnota J-integrálu (lomová houževnatost)
J_{Id}	kJ/m^2	dynamická lomová houževnatost
K_{Id}	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$	dynamická lomová houževnatost
K_{Qd}	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$	„provizorní“ hodnota dynamické lomové houževnatosti
K_{Jd}	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$	elasticko-plastická lomová houževnatost
s	mm	vzdálenost mezi podporami Charpyho kladiva při rázové zkoušce
s_{iu}	mm	průhyb při iniciaci trhliny
s_a	mm	průhyb při zastavení trhliny
s_t	mm	celkový průhyb
σ_d	MPa	dynamická mez kluzu nevrubovaného vzorku
T_g	°C	teplota skelného přechodu polymeru
T_m	°C	teplota tání semikrystalických polymerů
W_m	N.mm	práce spotřebovaná na přeražení tělesa
W_{iu}	N.mm	práce na iniciaci trhliny
W_a	N.mm	práce při zastavení trhliny
W_t	N.mm	celková nárazová práce

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Obecné schéma pro rozdělení kompozitních materiálů. [3, 4, 5, 14]	11
<i>Obr. 2</i> Stereoizomery polypropylenu	12
<i>Obr. 3</i> Strukturní hierarchie izotaktického polypropylenu (lamela, sférolit, sférolitická struktura) [1, 7, 8]	14
<i>Obr. 4</i> Lomově mechanické charakteristiky [10, 14]	16
<i>Obr. 2</i> Vliv délky trhliny c na pevnost v tahu σ_b [1, 14]	16
<i>Obr. 6</i> Rázová zkouška Charpy (a) a Izod (Dynstat) (b) [14]	18
<i>Obr. 7</i> Schematické znázornění závislosti síla-průhyb při rázové zkoušce, které odpovídají nestabilnímu (a), částečně stabilnímu (b) a zcela stabilnímu lomu (c) [1, 14]	20
<i>Obr. 8</i> Analýza struktury anizotropického rotoru [14, 17, 22]	21
<i>Obr. 9</i> Analýza válcového tělesa s trhlinou zatíženého v krutu [17, 22]	22
<i>Obr. 10</i> Analýza válcového tělesa s trhlinou zatíženého v krutu,- součinitel intenzity napětí K_{II} [17]	23
<i>Obr. 11</i> Integrační křivka	25
<i>Obr. 12</i> Definice zatěžovací funkce p [17].	26
<i>Obr. 13</i> Vstřikovací lis DEMAG ERGOtech 50 – 200 system	28
<i>Obr. 14</i> Schéma měřicí aparatury, Instrumentované Charpyho kladivo	29
<i>Obr. 15</i> Ukázka software ScopeWin [®] (hlavní okno modulu, okno pro měření síly a průhybu, výsledky rázové zkoušky Charpy ve formě textového souboru)	30
<i>Obr. 16</i> ScopeWin [®] jednotlivé charakteristiky – grafická ukázka	32
<i>Obr. 17</i> Konverze binárního souboru *.w programu ScopeWin [®]	32
<i>Obr. 18</i> Načítání vlny	33
<i>Obr. 19</i> Horké klávesy	33
<i>Obr. 20</i> Ruční zadání F_m a F_{in}	34
<i>Obr. 21</i> Proložení „úsečky“	34
<i>Obr. 22</i> PC korekce	35
<i>Obr. 23</i> Ukládání výsledků	35
<i>Obr. 24</i> Závislost E_d na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny	39
<i>Obr. 25</i> Závislost σ_d na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny	39
<i>Obr. 26</i> Závislost J_{1d} na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny	40

<i>Obr. 27 Závislost K_{Jd} na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny</i>	41
<i>Obr. 28 Závislost F_{max} na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny</i>	42
<i>Obr. 29 Závislost W_m na teplotě a stupni plnění iPP krátkými skleněnými vlákny</i>	43
<i>Obr. 30 Závislost síla-průhyb pro různé stupně plnění</i>	44
<i>Obr. 31 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP s 4 mm vrubem a bez vrubu (teplota 0 °C)</i>	45
<i>Obr. 32 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP + 30 % GF s 4 mm vrubem a bez vrubu (teplota 0 °C)</i>	46
<i>Obr. 33 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP s 4 mm vrubem, teplota 0 a 20 °C</i>	47
<i>Obr. 34 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP + 30 hm. % GF s vrubem 4 mm, teplota 0 a 20 °C</i>	48
<i>Obr. 35 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP bez vrubu, teplota 0 a 20 °C</i>	49
<i>Obr. 36 Závislost síla-průhyb pro zkušební tělíska z iPP + 30 % GF s vrubem 0 mm, teplota 0 a 20 °C</i>	49