

Vliv materiálových vlastností plastových vloček pražců na chování a napjatost.

Bc. Ondřej Turecký

Diplomová práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Ondřej TURECKÝ

Studijní program: N 2808 Chemie a technologie materiálů

Studijní obor: Materiálové inženýrství

**Téma práce: Vliv materiálových vlastností plastových vložek
pražců na chování a napjatost.**

Zásady pro vypracování:

- 1. Úvod do problematiky diplomové práce**
- 2. Vypracování literární rešerše, základní východiska pro praktickou a teoretickou část**
- 3. Naměření, porovnání a vyhodnocení materiálových charakteristik plastových vložek**
- 4. Aplikace numerických metod na řešení stavu napjatosti a dynamiky plastových vložek**
- 5. Vyhodnocení a porovnání výsledků s návrhy pro aplikaci v technické praxi**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Agarwal, B.D., Broutman, L.J. **Vláknové kompozity**. SNTL -- Nakladatelství technické literatury, Praha, 1987.
2. Bareš, R.A. **Kompozitní materiály**. SNTL -- Nakladatelství technické literatury, Praha, 1988.
3. Bathe, K.J. **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**, Prantice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1996.
4. Petrtýl, M. **Mechanika kompozitních těles**, ČVUT, Praha, 1991.
5. Matthews, F.L., Davies, G.A.O., Hitchings, D., Soutis, C. **Finite element modeling of composite materials and structures**, CRC Press, England, 2000, ISBN 0-8493-0846-1
6. KUBÍK, J. a ZYTKA, A. **Zkušební metody v gumárenství**, SNTL Praha, 1962.
7. Schätz, M., Vondráček, P. **Zkoušení polymerů**. SNTL -- Nakladatelství technické literatury, Praha, 1979.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Antonín Polášek, CSc.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

11. února 2008

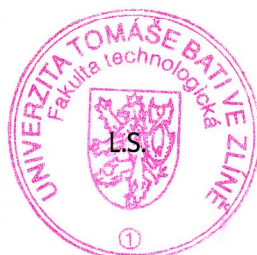
Termín odevzdání diplomové práce:

20. května 2008

Ve Zlíně dne 11. února 2008



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

V práci je provedena obecná charakteristika struktury železniční trati, její konstrukce a rozbor bezpodkladnicového upevnění. Dále je uvedený popis a rozdělení kompozitních materiálů, teorie přenosu napětí, základy metody konečných prvků (MKP) a popis použitých technik termických analýz. V praktické části jsou provedeny materiálové analýzy zkoumaných vzorků za pomoci termických metod. Výsledky z nich získané jsou použity pro určení materiálových charakteristik vzorků.. MKP je aplikována pro výpočet rozložení tenzoru napětí a deformace pro dva typy hmoždinek. V závěru je provedeno srovnání výsledků a vyhodnoceno chování hmoždinky u bezpodkladnicového upevnění s návrhy pro další možné aplikace v praxi.

Klíčová slova:

Železnice, bezpodkladnicové upevnění, kompozitní materiály, vložky do betonu, hmoždinky, metoda konečných prvků, termické analýzy, napjatost.

ABSTRACT

In the work have been carried out general characteristics of a railway line structure, its construction and analysis of a sole-plate-free attachment. Further there is given a description and classification of composite materials, theory of stress transfer, principles of the finite element method (FEM) and description of techniques used for thermal analyses. In the practical part have been material analyses of tested samples carried out by means of thermal methods. The results obtained have been used for determination of material characteristics of samples. The FEM has been applied for computation of distribution of stress and strain tensor for two kinds of dowels. In the conclusion has been carried out a comparison of the results and evaluated behaviour of the dowel at the sole-plate-free attachment together with projects for next applications in praxis.

Keywords:

Railway line, sole-plate-free attachment, composite materials, finite element method, stress analyses, thermal analyses, dowel.

V této části mé práce chci poděkovat společnosti K.P.R. ENGINEERING, s.r.o v Otrokovcích a panu Ing. Antonínu Poláškov, CSc. za odborné vedení, rady, konzultace a poskytnutí softwarového vybavení při tvorbě mé diplomové práce.

Dále chci poděkovat Ústavu materiálového inženýrství UTB ve Zlíně za poskytnutí vybavení k provedení materiálových analýz a odborné konzultace při vyhodnocování měření.

V neposlední řadě mé poděkování patří rodině za maximální podporu po celou dobu mého studia a kamarádům a přátelům, díky kterým bylo studium obohaceno o zážitky a díky sdílení všeho dobrého i zlého co nás za dob studia potkalo také mnohem jednodušší a příjemnější. Jmenovitě kamarádu Ing. Dušanovi Kopeckému, který bohužel již nemůže společné radosti v životě kvůli tragické nehodě sdílet s námi.

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KONSTRUKCE A STRUKTURA ŽELEZNIČNÍ TRATI	11
1.1 ŽELEZNIČNÍ SPODEK	11
1.1.1 Těleso železničního spodku	11
1.1.2 Stavby železničního spodku	11
1.2 ŽELEZNIČNÍ SVRŠEK	12
1.2.1 Kolejnice	12
1.2.2 Upevňovadla	12
1.2.3 Pražce	14
1.2.4 Kolejové lože	14
1.2.5 Bezpodkladnicové upevnění	14
1.2.6 Plastové vložky	15
2 PLASTICKÉ HMOTY V ŽELEZNIČNÍ DOPRAVĚ	16
3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	18
3.1 VLASTNOSTI KOMPOZITŮ	18
3.2 MIKROKOMPOZITNÍ MATERIÁLY	20
3.2.1 Částečné mikrokompozity	20
3.2.2 Vláknové mikrokompozity	20
3.2.2.1 Krátkovlákné kompozity	21
3.3 MAKROKOMPOZITY	22
3.4 NANOKOMPOZITY	23
3.5 TEORIE PŘENOSU NAPĚTÍ PRO KOMPOZITY S KRÁTKÝMI VLÁKNY	23
3.6 MODUL PRUŽNOSTI A SMĚŠOVACÍ PRAVIDLO POISSONOVA POMĚRU	27
4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)	29
5 TECHNIKY TERMICKÉ ANALÝZY	30
5.1 DIFERENCIÁLNÍ TERMICKÁ ANALÝZA (DTA)	30
5.1.1 Zařízení pro DTA	30
5.1.2 Experimentální faktory	32
5.1.3 Výklad a presentace dat	33
5.2 DIFERENCIÁLNÍ TERMOGRAVIMETRIE (DTG)	34
5.3 FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY (FTIR)	35
5.3.1 Charakteristika metody	35
5.3.2 Princip	35
5.3.3 Absorpční pásy	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
6 TERMÁLNÍ ANALÝZY	37
6.1 VZORKY PRO DTA/DTG	37
6.1.1 Hmoždinka používaná u ČD	37
6.1.2 Vývojový typ VT-1	37
6.1.3 Příprava vzorků pro DTA/DTG	38
6.1.4 Zařízení pro DTA/DTG	39

6.1.5	Vyhodnocení měření DTA/DTG	40
6.1.5.1	Bílý vzorek.....	40
6.1.5.2	Modrý vzorek	41
6.1.5.3	Světle žlutý vzorek	41
7	FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY (FTIR)	43
7.1	VZORKY PRO FTIR.....	43
7.2	VYHODNOCENÍ ANALÝZY FTIR.....	44
7.3	SROVNÁNÍ S REFERENČNÍMI VZORKY	44
7.4	SHRnutí MATERIÁLOVÝCH ROZBORŮ	46
8	APLIKACE METODY KONEČNÝCH PRVKŮ PRO ŘEŠENÍ NAPJATOSTI	47
8.1	TEORETICKÝ ÚVOD.....	47
8.2	APLIKACE METODY KONEČNÝCH PRVKŮ	50
8.2.1	Vložka používaná u ČD- materiál Silamid, izotropie.....	51
8.2.2	Vložka používaná u ČD- materiál Silamid, ortotropie	56
8.2.3	Vložka typu VT-1 materiál Nitren, izotropie	59
8.2.4	Vložka typu VT-1 materiál Nitren, ortotropie	65
	ZÁVĚR.....	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	72
	SEZNAM OBRÁZKŮ	73
	SEZNAM TABULEK.....	75
	SEZNAM PŘÍLOH.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

ÚVOD

Železniční doprava je bezesporu rozsáhlou a závažnou oblastí činnosti lidského společenství, která ve svých důsledcích ovlivňovala a zajisté i v současné době ovlivňuje, život každého z nás. Efektivní realizace této činnosti se neobejde bez aplikace výsledků řady vědních oborů a bez, tak říkajíc, vlastní vědeckovýzkumné a zkušebnícké činnosti svázané na straně jedné přímo s železničním provozem, a na straně druhé s výrobní sférou. (19)

Každá oblast lidské činnosti má svoji historii, každý nový objev, nové řešení problému navazuje na výsledky práce předchozích generací. Nejinak je tomu i v případě železničního výzkumu a zkušebnictví, v tomto případě materiálového. (19)

Již v druhé polovině minulého století věnovaly evropské železniční správy (francouzská, německá, italská, rakousko-uherská) železničnímu zkušebnictví, a zvláště zkoušení materiálů, značnou péči. Po vzniku ČSR dne 27. 1. 1919 bylo zřízeno v Brně při ředitelství ČSD, výnosem č. 171 Ministerstva železnic, oddělení IX. Jeho hlavním úkolem bylo přejímání a zkoušení hmot a materiálů používaných u ČSD. Toto oddělení mělo 4 skupiny, z nichž první 3 zajišťovaly objednávání, přejímku materiálů a jejich zkoušení u dodavatelů a skupina 4. prováděla zkoušení materiálů ve vlastních laboratořích (laboratoř mechanického zkoušení, chemická laboratoř a pomocná dílna pro zhotovování laboratorních vzorků) a rovněž výzkumnické práce, jimiž se řešily nejrůznější problémy železniční praxe, související s jakostí materiálů. (19)

Cílem diplomové práce bylo stanovit a porovnat vlastnosti dvou typů plastových vložek do betonových pražců. Potom nasimulovat chování vložek při zatížení pro získání rozložení tenzoru napětí a deformace pro určení možného výskytu špiček napětí. Ty mají vliv na únavu materiálu, vznik trhlin a následné šíření trhliny vlivem opakovaného cyklického zatížení. K dispozici byly dva typy vložek. Úkolem bylo provést analýzy jak z materiálového, tak i z mechanického hlediska. Naměřené hodnoty potom aplikovat na mechanicko-matematický model vložek, popisující její chování při zatížení. Nejdříve proběhla identifikace a potom srovnání materiálů, ze kterých byly vložky vyrobeny. Pro identifikaci byly použity termické analýzy a to konkrétně DTA, DTG a FTIR. Výsledky analýz se vyhodnotily, byly z nich stanoveny charakteristiky materiálových vlastností jednotlivých vzorků.

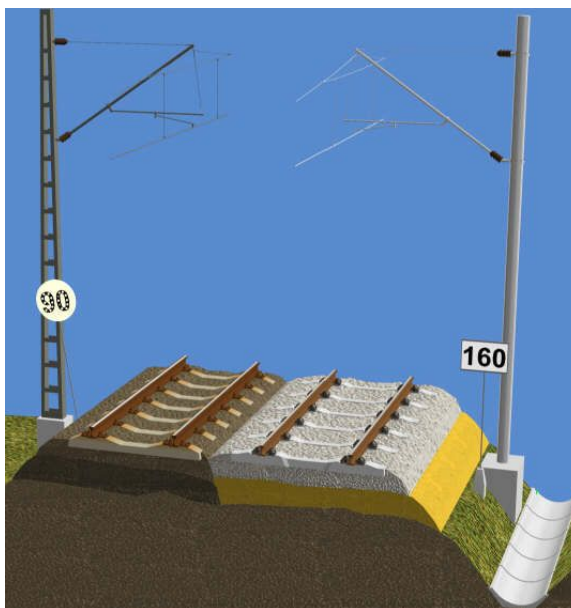
Následně byly vložky namodelovány pomocí metodou konečných prvků za využití softwaru Samcef a Samcef Field od společnosti Samtech.

Na závěr byly provedeny výpočty pomocí metody konečných prvků v software Samcef. CAD modely vložek byly vytvořeny v software SolidWorks. Mechanické vlastností byly uvažovány pro izotropní i ortotropní materiál. Získané výsledky rozložení tenzoru napětí a deformace určily místa napěťových špiček u obou typů vložek pro izotropii i ortotropii. Z porovnání výsledků lze odhadnout, která z vložek je vhodnější pro aplikaci do provozu. Komplexní popis vlastností daných vložek může sloužit jako dobrý základ pro další řešení jejich chování a napjatosti při dalším dynamickém zatěžování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KONSTRUKCE A STRUKTURA ŽELEZNIČNÍ TRATI

Z hlediska stavebního se železniční trať dělí na železniční spodek a svršek. (1)



Obr. 1 Struktura železničního koridoru (2)

1.1 Železniční spodek

Železniční spodek je konstrukce vybudovaná z největší části stavební úpravou terénu. Základem je těleso železničního spodku. (1)

1.1.1 Těleso železničního spodku

Je tvořeno vrstvou uvalcované zeminy a geotextilií, která je přesypána jemným materiálem. Další vrstvu tvoří štěrk a nakonec svršek. U mostů na koridoru je vyžadováno tzv. "průběžné štěrkové lože", které bez přerušení pokračuje i na mostě a zvyšuje výrazným způsobem kvalitu jízdy, obzvláště při vyšších rychlostech. (1, 2)

1.1.2 Stavby železničního spodku

Jedná se o umělé konstrukce zčásti nebo zcela nahrazující těleso. Jedná se o propustky, mosty, tunely, galerie, zdi a protihlukové stěny. Do železničního spodku ještě patří drobné stavby (jámy, oplocení,...), dopravní plochy a komunikace. Trať může být v náspu – nad stávajícím terénem, nebo v zářezu - pod stávajícím terénem. (1)

1.2 Železniční svršek

Jedná se o konstrukci tvořící jízdní dráhu pro železniční vozidla. Hlavní funkcí je bezpečné vedení vozidel a přenášení zatížení ze svršku na spodek. Jeho Konstrukce musí vyhovovat dovolené hmotnosti na nápravu, rychlosti a intenzitě provozu. Svršek se skládá z kolejnic, upevňovadel, pražců a šterkového lože. (1)

1.2.1 Kolejnice

Kolejnice je nejdůležitější a nejdražší součástí železničního svršku. Tím, že nese a vede vozidlo, má přímý vliv na bezpečnost dopravy a jízdní komfort. (3)

Nejrozšířenější jsou kolejnice širokopatní, jejichž základní části jsou hlava, stojina a pata. Tvar použité kolejnice vychází ze zatížení konkrétní trati. Dnes se v ČR používají kolejnice tvaru UIC 60 (hlavní tratě) a S 49. (2)

1.2.2 Upevňovadla

K upevnění kolejnic na pražce se používá podkladnicové nebo bezpodkladnicové upevnění. V podkladnicovém upevnění je mezi kolejnicí a pražec vložena ocelová deska s upínacími prvky - podkladnice. V bezpodkladnicovém upevnění je mezi kolejnicí a pražcem pouze pružná podložka z pryže nebo plastu. Bezpodkladnicové upevnění se používá v kolejích pro rychlejší dopravu (např. na železničních tranzitních koridorech). Podkladnicové upevnění se používá na všech ostatních tratích. V obou typech upevnění se při modernizacích a rekonstrukcích používají k uchycení kolejnic svěrky z pružinové oceli. (3)

Přednostně jsou používány bezpodkladnicové svěrky Skl 14 (I. koridor, Vossloh SRN) a bezšroubové PANDROL FastClip (II. koridor, PANDROL Anglie, poprvé zkoušeny v úseku Brno - Blansko v okolí km 166 v 2.TK). Dalším používaným typem je svěrka Skl 12, taktéž firmy Vossloh. Posledním běžně používaným typem je svorka Pandrol, vyráběná anglickou firmou totožného jména.



Obr. 2 Bezšroubová svorka Pandrol FastClip (2)



Obr. 3 Svorka Vossloh typ Skl 12 (2)



Obr. 4 Bezpodkladnicová svorka Skl 14 (2)

1.2.3 Pražce

Význam pražců spočívá jednak v roznášení provozních tlaků z kolejnic do kolejového lože a na železniční pláň, jednak zajišťují stálý rozchod. Pražce mohou být betonové, dřevěné, a ocelové. (1)

Nejdéle používaným typem pražců jsou pražce dřevěné. Používají se především pražce z tvrdého dřeva (buk, dub, akát, habr, popřípadě tropické dřeviny), výjimečně také z měkkého dřeva (borovice, modřín). Dřevěné pražce jsou dlouhé 2600 mm s průřezem obvykle 260 x 150 mm. V minulosti byly používány rovněž pražce ocelové. Ocelové pražce však nelze použít na elektrifikované tratě a tam, kde je zřízeno automatické nebo poloautomatické zabezpečovací zařízení, tedy v kolejích, kde musí být zajištěno vzájemné elektrické odizolování kolejnicových pásů. Betonové pražce se u ČD používají od roku 1950. V současné době se používají železobetonové předem předpjaté monolitické pražce o délce 2400 mm (pražec SB 8P pro podkladnicové upevnění) nebo 2600 mm (pražec B 91S pro bezpodkladnicové upevnění). Hmotnost jednoho betonového pražce se pohybuje okolo 300 kg. Pražce se do koleje ukládají v pravidelných vzdálenostech (podle předepsaného rozdělení pražců), v současné době je nejčastěji užívána osová vzdálenost pražců 600 mm. (3)

1.2.4 Kolejové lože

Slouží k roznášení tlaků pražců na pláň železničního spodku, jeho nejmenší tloušťka pod pražcem je 300 mm., k výškové a směrové regulaci koleje a k odvodnění železničního svršku. (1)

1.2.5 Bezpodkladnicové upevnění

Svěrky, respektive spony, jsou upevněny přímo k pražci, mezi patou kolejnice a pražcem je pouze pryžová nebo plastová podložka. Bezpodkladnicové upevnění se používá v kolejích pro rychlejší dopravu (např. na železničních tranzitních koridorech). Při modernizacích a rekonstrukcích se používají k uchycení kolejnic svěrky z pružinové oceli. (3, 4)

Pro úseky s bezpodkladnicovým upevněním, kde je třeba zajistit zvýšené tlumení dynamických účinků, respektive ve vyšší míře snížit emitovanou hladinu hluku, navrhla například německá firma VOSSLOH speciální konstrukci bezpodkladnicového upevnění VOSSLOH E 14. (4)

1.2.6 Plastové vložky

Svěrky, respektive spony jsou upevněny k pražci za pomoci ocelových vrtulí, které jsou zašroubovány do plastových vložek. Plastová vložka je obdoba plastové hmoždinky, která je zalitá do pražce.

V dřívějších dobách se používaly vložky ČD, které byly vyrobeny ze dřeva, později z materiálu PA6 plněného skelným vláknem.

V dnešní době dochází k regeneraci původních dřevěných vložek, které jsou měněny buď za starší typ vložek ČD, nebo za novější typ VT-1, který je vyroben z plněného PE.

Dřevěné vložky v betonových pražcích mají poměrně nízkou životnost v poměru k životnosti betonu. Vyzískané betonové pražce s dřevěnými hmoždinkami mohou být proto použity po regeneraci (výměně dřevěných hmoždinek) pro obnovu méně zatížených kolejí.

2 PLASTICKÉ HMOTY V ŽELEZNIČNÍ DOPRAVĚ

Úkoly z oboru plastických hmot a pryže v železniční dopravě vycházely nejprve z požadavků a snahy nahradit novými hmotami úzkoprofilové a málo dostupné barevné kovy a deficitní materiály vůbec. Když se zjistilo, že nové hmoty mají řadu funkčních vlastností lepších než jaké jsou běžné u materiálů klasických, řešilo se jejich využití i pro konstrukci se zvláštním zřetelem ke zkvalitnění údržby vozidel a zařízení. Postupem času, po překonání neochoty výrobců dodávat technické součásti málo atraktivní pro výrobu, a také nedůvěry a opatrnosti uživatele, došlo i k postupnému zadávání a řešení úkolů v této sféře materiálů. Jedním z prvních úspěšných řešení v oboru plastických hmot a pryže byl výzkum sekundární izolace mezi živé části trolejového vedení a mostní objekty, jehož výsledkem byla izolace z butylkaučukových pasů. (19)

Velmi progresivním materiálem se postupem času staly polymery. V oblasti vývoje železničních kolejových vozidel se aplikační výzkum odehrával především u vlastních výrobců vozidel. Výzkum ČSD se v tomto oboru zaměřil především na využívání nových materiálů v oblasti konstrukce železničního svršku. Výborné vlastnosti tyto materiály předurčovaly nejen pro některé speciální aplikace, ale zejména pro široké použití v koleji. Vedle výhodných mechanických vlastností to byla především velmi dobrá odolnost proti korozi, dlouhá životnost při dynamickém zatěžování i v tvrdých povětrnostních podmínkách, dobrá odolnost vůči ropným produktům a výborné elektroizolační vlastnosti. K těmto všem vlastnostem přistupovala často i nezanedbatelně příznivá cenová úroveň ve srovnání s tradičními materiály. Již v počátcích 60. let byly v rámci výzkumných prací ověřovány, s velmi dobrým výsledkem, některé součásti z polymerních materiálů v provozované koleji ČSD. Koncem šedesátých let pak byly již v širokém měřítku používány např. plastové hmoždinky do betonových pražců vyráběné z polyamidu (PA 6) plněného skelnými vlákny, plastové regenerační hmoždinky z PA, alkamidové kolejnicové spojky a jiné. Kromě toho byl PA používán i na výrobu některých menších či méně rozšířených prvků, kde však měly mnohdy nezastupitelnou výhodu i jeho výborné kluzné vlastnosti (např. izolační vložky mezi čela kolejnic, pouzdra táhel a spojovacích tyčí výhybek, samojistné matice). Současně s rozšířením betonových pražců u ČSD byly vyvinuty a zavedeny pro běžné používání v koleji polyetylenové podložky pod podkladnice a nové pryžové podložky pod patu kolejnice. (19)

Své uplatnění v koleji ČSD našly i reaktoplasty, tj. vícesložkové materiály vytvrzované po jejich smísení přímo na místě aplikace. Zejména plastbetony na bázi epoxidových pryskyřic doznaly širokého použití již v počátku 70. let, a to především na opravy a při výstavbě betonových staveb (točny, posuvny, jeřábové dráhy, podlévání mostních ložisek), později v mostním stavitelství i jako materiály pro tenkovrstvé hydroizolační systémy. V těchto aplikacích se uplatnila nejen mechanická odolnost epoxidových plastbetonů, ale i jejich výborná soudržnost se starým i novým betonem a dalšími stavebními hmotami. (19)

Své významné postavení nacházejí zejména konstrukční plasty a pryže i při vývoji nových, moderních typů upevnění. Podkladnicové upevnění s plastovými distančními kroužky, vkládané v posledních letech u ČD zejména do úseků s větším zatížením nákladní dopravou, přineslo další významné uplatnění pro PA 6 plněný sklem, a to při výrobě funkčně velmi zatěžovaného konstrukčního prvku upevnění - distančního kroužku. (19)

Nové bezpodkladnicové typy upevnění Vossloh (Německo) a Pandrol Fastclip (Anglie), vkládané při rekonstrukcích do koridorových tratí ČD, potvrzují stejný trend vývoje i u zahraničních správ tratí. Oba typy upevnění využívají konstrukčních plastů pro funkčně velmi exponované prvky upevnění, přímo ovlivňující spolehlivost i životnost uzlu upevnění. Plastová úhlová vodicí vložka v upevnění Vossloh je vyrobena z PA 6 plněného sklem a oba dva izolátory v upevnění Pandrol Fastclip jsou z PA 6,6. V obou uvedených typech upevnění je navíc kladen důraz i na dlouhou životnost pryžové podložky pod patou kolejnice, její výborné elektroizolační vlastnosti a zvýšené pružnostní charakteristiky ve srovnání s podložkami v podkladnicovém upevnění. Nové technologie výroby a typy pryží dokáží zajistit, byť za zvýšených finančních nákladů, i tyto náročné požadavky. (19)

Několika desítkami let prověřená spolehlivá funkce prvků z plastů a pryží dokladuje dnes již nezastupitelnost těchto materiálů v koleji ČD. Požadavek dlouhodobé životnosti a spolehlivosti však těsně souvisí i s dodržением předepsaného technologického postupu montáže. Specifické vlastnosti těchto materiálů předpokládají většinou i speciální podmínky montáže, tedy netradiční přístup firem či pracovníků ČD. Nedodržení parametrů při montáži může dojít k poškození některých prvků upevnění vedoucím k závadám v koleji a ke snížení životnosti celého uzlu upevnění. (19)

3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny následující podmínky:

- podíl výztuže musí být větší než 5 %
- vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- kompozit musí být připraven smícháním složek (5)

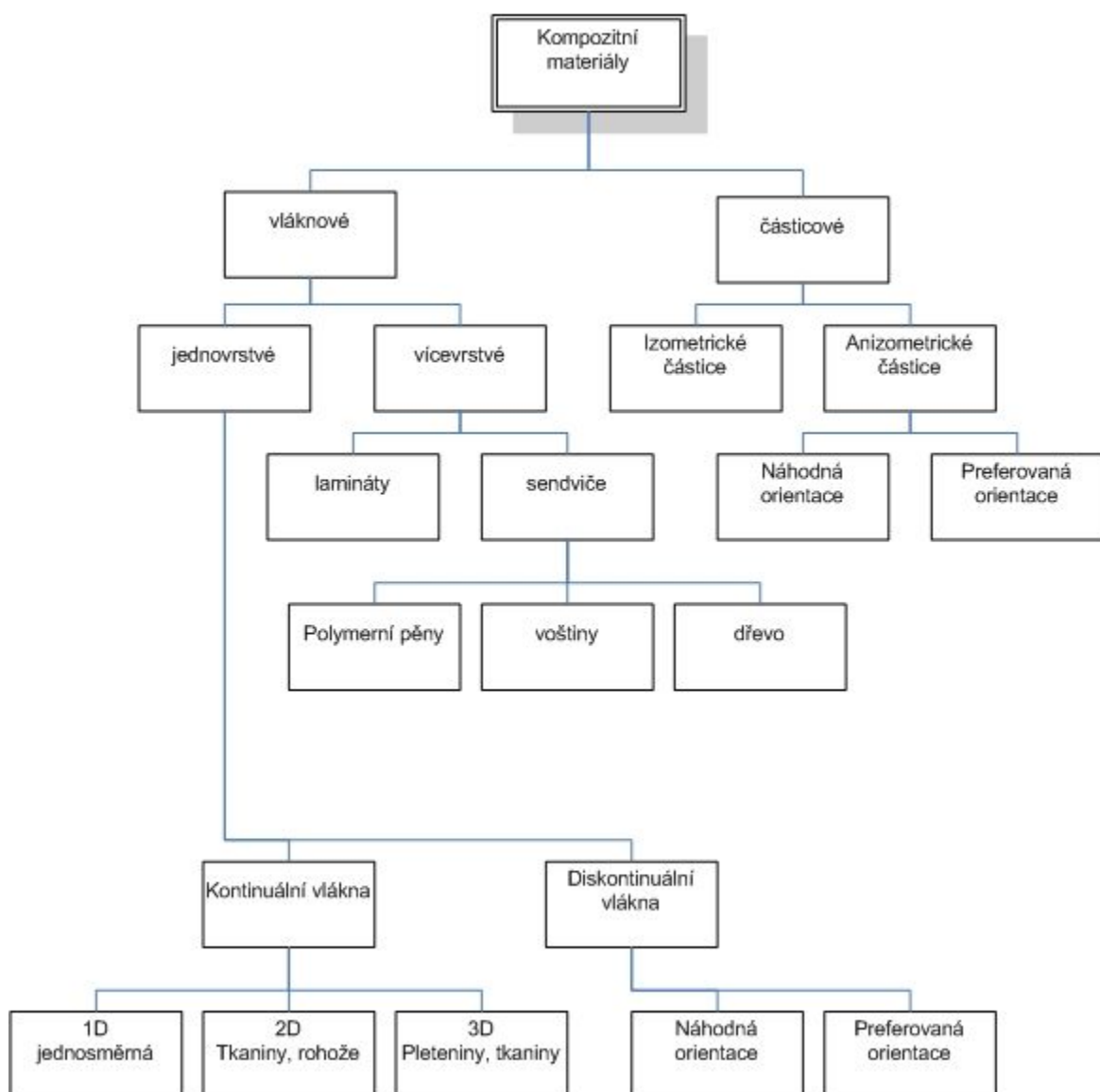
3.1 Vlastnosti kompozitů

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. (6)

Významný vliv na vlastnosti kompozitu má tvar částic nespojité 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 výztuží a maticí. (6)

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 matici je homogenní, chová se kompozit jako izotropní materiál,

který má ve všech směrech v dané 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. (6)



Obr. 5 Rozdělení kompozitních materiálů dle geometrie a orientace výztuže (5)

3.2 Mikrokompozitní materiály

V průmyslu mají největší význam. Mají největší příčné rozměry výztuže (vláken nebo částic) jsou v rozmezí 10^0 až 10^2 μm . Oproti kovům a jejich slitinám mají mikrokompozitní materiály menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě, tj. dosahují velké měrné pevnosti (σ_{pt}/ρ) a měrného modulu (E/ρ). (5)

Tab. 1 Některé vlastnosti používaných termoplastových matic (7)

Matrice	Hustota ρ [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	Axiální tahu- vý modul E [GPa]	Axiální tahová pevnost σ_p [MPa]	Deformace do lomu [%]
termoplasty	0,90-1,45	1,0-4,0	20-250	5-150
PP	0,90	1,1-1,5	28-41	10-700
PA	1,42	2,8-3,4	76-83	60-300
PC	1,21	2,1-2,8	62-76	110-130
PEEK	1,31	3,8	70	50-150

3.2.1 Částicové mikrokompozity

Obvykle se jedná o anorganické částice, anizometrické (destičkové částice) mají určitý štíhlostní (aspektní) poměr l/t , kde l je délka a t tloušťka částice. (5)

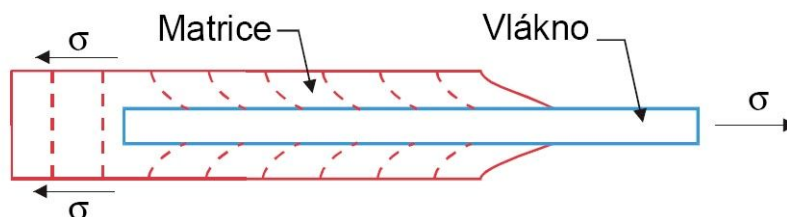
3.2.2 Vlákenné mikrokompozity

Jedná se buď o mikrokompozity obsahující diskontinuální vlákna, která mají aspektní poměr l/d , kde l je délka a d průměr vlákna, nebo o kontinuální vlákna.

Kontinuální vlákna mohou být z různých materiálů a to např.: sklo, křemen, uhlík, polymer, bór, keramika, přírodní (čedič), proteinová vlákna nebo kovová. (5)

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

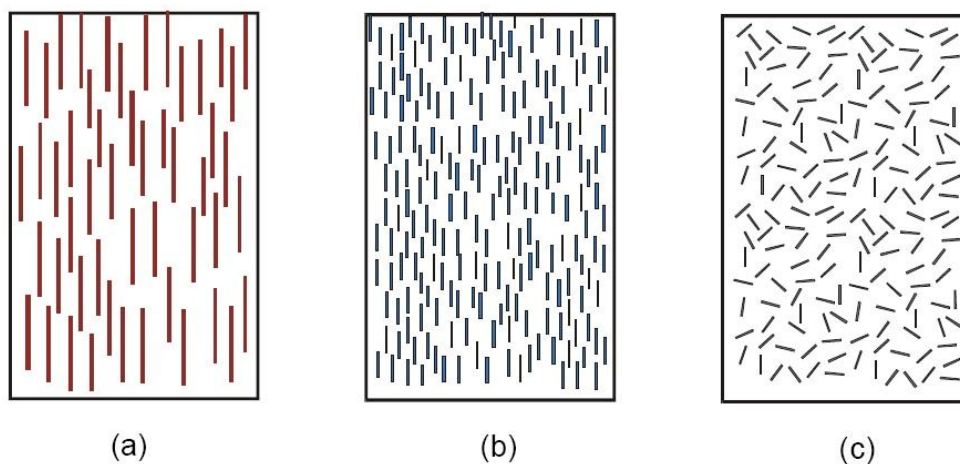
materiálu (např. plastu) je výrazně menší než materiálu tvořeného vlákny, je-li zatěžování ve směru vláken. Je to dáno tím, že velké nečistoty, které mohou být přítomny v kompaktním materiálu jsou minimalizovány v důsledku malých průřezových rozměrů vlákna. Zde ale vyvstává problém využití těchto vláken 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 (obr. 6). (6)



Obr. 6 Popis vláknového kompozitu

3.2.2.1 Krátkovlákné kompozity

Jako krátkovlákné kompozity uvažujeme takové materiály, ve kterých délka vlákna ovlivňuje jejich vlastnosti. Pro krátkovlákné kompozity musíme brát v úvahu uspořádání orientaci vláken (obr. 7). Ve většině případů, se pro tyto kompozitní materiály předpokládá, že vlákna jsou v kompozitu nahodile uspořádána (obr. 7 c). Tím se zaručí izotropnost kompozitní desky. To znamená, že vlastnosti krátkovlákného kompozitu s nahodilou strukturou nejsou závislé po tloušťce desky na směru. Použitím specifických výrobních postupů můžeme ale dosáhnout jisté směrové orientace krátkých vláken, při kterém jeden ze směrů významně převládá nad ostatními. Získáme tak kompozitní materiál s anizotropními vlastnostmi.



Obr. 7 Orientace vláken v krátkovlákném kompozitu

Tab. 2 Typické vlastnosti vláken (7)

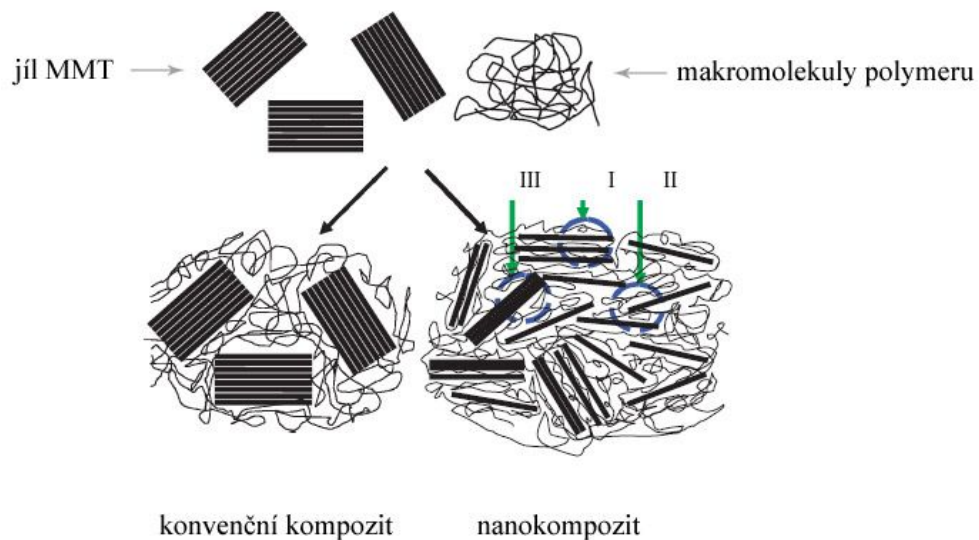
Materiál	Hustota ρ [g.cm ⁻³]	Axiální tahový modul E [GPa]	Axiální tahová pevnost σ_p [GPa]
E-sklo	2,54	72	1,5-3,5 ¹⁾
S-sklo	2,49	86	1,9-4,6
Karbon HTS	1,79	230	3,2
Karbon HM	1,86	340	2,5
Karbon UHM	1,95	480	1,8
Aramid (Kevlar-49)	1,45	124	2,8

3.3 Makrokompozity

Obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru 10^0 až 10^2 mm a jsou používány především ve stavebnictví (železobeton, tj. beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty, polymerbetony obsahující drcené kamenivo a pryskyřici). Za makrokompozity lze považovat i plátované kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce (např. chodníky a vozovky). (5)

3.4 Nanokompozity

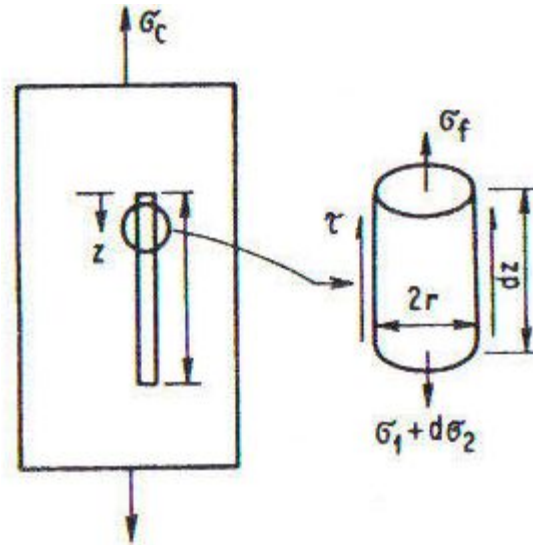
Jedná se o kompozitní materiály, které mají rozměr výztuže (délka částice nebo průměr vlákna) v jednotkách nm. Rozdíl mezi mikrokompozitem a nanokompozitem s výztuží na bázi částic jílu – montmorillonitu (MMT) ukazuje následující obrázek. (5)



Obr. 8 Rozdíl mezi nanokompozitem a mikrokompozitem (5)

3.5 Teorie přenosu napětí pro kompozity s krátkými vlákny

V kompozitech nepůsobí zatížení přímo na vlákna, nýbrž je zaváděno do matricového materiálu a přenášeno do vláken jednak prostřednictvím jejich konců, jednak též válcovým povrchem vlákna v okolí jeho konců. Je-li délka vlákna mnohem větší než délka, přes niž se přenos napětí děje, mohou být koncové účinky zanedbány a vlákno uvažováno jako spojité. U krátkovláknových kompozitů nemohou být účinky konců zanedbávány a vlastnosti kompozitu jsou funkcí délky vlákna. Konce ovlivňují významně chování a zpevňovací účinky kompozitů s diskontinuitními vlákny (8).



Obr. 9 Rovnováha na elementu diskontinuitního vlákna uloženého rovnoběžně se směrem zatížení (8).

Rozdělení napětí podél vlákna určíme z rovnováhy sil na infinitezimálním prvku vlákna dle obr. 9. Rovnováhu sil na elementární délce dz vyjádříme z Dow-Rosenovy teorie pomocí rovnice rovnováhy jako

$$(pr^2)s_f + (2prdz)t = (pr^2)(s_f + ds_f) \quad (1)$$

ze které lze vyjádřit

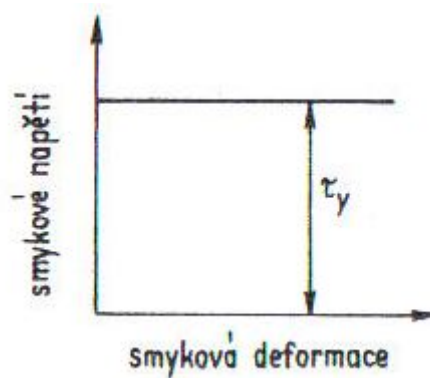
$$\frac{d\sigma_f}{dz} = \frac{2\tau}{r} \quad (2)$$

Rovnice (2) ukazuje, že pro vlákno konstantního poloměru je přírůstek napětí vlákna přímo úměrný smykovému napětí na rozhraní. Napětí v průřezu vlákna ve vzdálenosti z od konce vlákna, dostaneme integrací:

$$\sigma_f = \sigma_{f0} + \frac{2}{r} \int_0^z \tau dz \quad (3)$$

Mnohdy je σ_{f0} zanedbáváno, neboť dochází ke kluzu matrice přiléhající ke konci vlákna nebo k separaci konce vlákna a matrice v důsledku velkých koncentrací napětí. Je-li σ_{f0} zanedbatelné, lze rovnici (3) psát

$$\sigma = \frac{2}{r} \int_0^z \tau dz \quad (4)$$



Obr. 10 Idealizovaná křivka smykového napětí – smyková deformace pro matrici (8)

U krátkých vláken vzniká maximální napětí vlákna v polovině délky (tj. $z = l/2$).

pak

$$(\sigma_f)_{max} = \frac{\tau_y l}{r} \quad (5)$$

Napětí vlákna má svou mezní hodnotu. Mezní hodnota napětí vlákna je napětí, které by přeneslo spojité vlákno při zatěžovacím napětí namáhajícím kompozit. Při předpokladu $\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m$ lze ukázat, že maximální napětí vlákna je dáno vztahem

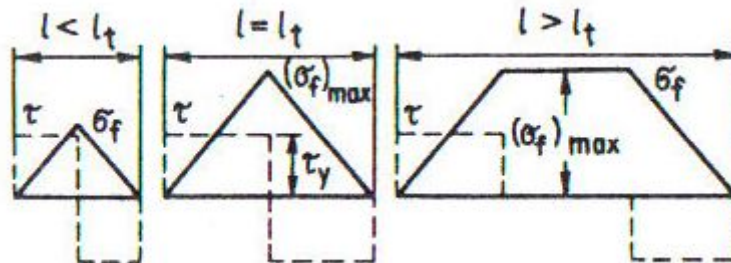
$$(\sigma_f)_{max} = \frac{E_f}{E_c} \sigma_c \quad (6)$$

Minimální délka vlákna, nezbytná k tomu, aby napětí vlákna dosáhlo svého maxima $(\sigma_f)_{max}$, může být definována jako přenosová délka zatížení, l_t . Touto délkou vlákna se převede zatížení z matrice do vlákna. Je dána vztahem

$$\frac{l_t}{d} = \frac{(\sigma_f)_{max}}{2\tau_y} \quad (7)$$

Jelikož $(\sigma_f)_{max}$ je funkcí zatěžovacího napětí, je též přenosová délka funkcí zatěžovacího napětí. Kritická délka vlákna l_c , nezávislá na zatěžovacím napětí, může být definována jako minimální délka vlákna, na které se dosáhne meze pevnosti vlákna σ_{pf} . Je tedy

$$\frac{l_c}{d} = \frac{\sigma_{pf}}{2\tau_y} \quad (8)$$



Obr. 11 Průběhy napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní pro různé délky vlákna (8)

Kritická délka je maximální hodnota přenosové délky. Kritická délka vlákna je důležitá vlastnost systému a ovlivňuje mezní vlastnosti kompozitu. Někdy se jako přenosová délka a kritická délka rozumí neúčinná délka, neboť na tuto vzdálenost přebírá vlákno menší zatížení než činí jeho maximální napětí. Variace napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní jsou ukázány na obr.10 pro různé délky vlákna. Krátký úsek na konci vlákna je zatěžován nižší hodnotou než činí maximální napětí vlákna. To ovlivňuje pevnost a modul pružnosti kompozitu. Je-li délka vlákna mnohem větší než přenosová délka, blíží se chování kompozitu vyztuženého spojitými vlákny (8).

Rozdělení napětí ukázaná v obr. 10 jsou přibližná, neboť byla získána za předpokladu, že materiál matrice je ideálně plastický. Ve skutečnosti většina matricových materiálů vykazuje pružně plastické chování. Přesný průběh napětí lze obdržet za předpokladu, že matrice je pružně plastická. To přináší četné obtíže v provedení teoretické analýzy kompozitu. Pro usnadnění analýzy složitých problémů jsou nejlepší numerická řešení. Numerické metody vyžadují velmi málo zjednodušujících předpokladů a lze snadno dosáhnout přesného řešení (8).

Konce vláken konečné délky jsou namáhány méně, než činí maximální napětí vlákna. Pro přibližnou napjatost znázorněnou obr. 10 se nalezne průměrné napětí jako

$$\bar{\sigma}_f = \frac{1}{2}(\sigma_f)_{max} = \frac{\tau_{yl}}{d}, \quad l < lt \quad (9)$$

$$\bar{\sigma}_f = (\sigma_f)_{max} \left(1 - \frac{l_t}{2l}\right), \quad l > lt \quad (10)$$

Je-li délka vlákna 50ti násobkem přenosové délky, je průměrné napětí vlákna 99 % maximálního napětí vlákna. Převyšuje-li tudíž délka vlákna 50krát svou kritickou délku, blíží se chování kompozitu chování kompozitu se spojitými vlákny se stejnou orientací vláken (8).

3.6 Modul pružnosti a směšovací pravidlo Poissonova poměru

Halpin a Tsai odvodili obecné vztahy jako aproximaci mnohem exaktnější analýzy mikro-mechaniky kompozitů. Tyto vztahy lze přímo použít i pro konstrukční účely. Prognóza vlastností kompozitů těchto vztahů je docela přesná, nedosahuje-li objemový podíl vláken hodnoty blízké 1 (8).

Rovnice Halpina a Tsaie jsou velmi užitečné pro určování podélného a příčného modulu usměrněných krátkovláknových kompozitů. Tyto rovnice mohou být psány pro podélný a příčný modul ve tvaru

$$\frac{E_L}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta_L V_f}{1 - \eta_L V_f} \quad (11)$$

a

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta_T V_f}{1 - \eta_T V_f} \quad (12)$$

kde

$$\eta_L = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + \xi} \quad (13)$$

a

$$\eta_T = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + 2} \quad (14)$$

Veličina ξ je mírou vyztužení kompozitu a závisí na geometrii vláken. V případě podélného modulu je dáno rovnicí

$$\xi = 2 \frac{l}{d} \quad (15)$$

a pro případ příčného modulu se $\xi = 2$

Halpinovy a Tsaiovy rovnice také ukazují, že příčný modul usměrněného krátkovlákného kompozitu není ovlivněn tvarovým parametrem l/d (8).

Hodnota smykového modulu G se dá vyjádřit vztahem

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (16)$$

kde

E = modul pružnosti v tahu

ν = Poissonův poměr

Poissonův poměr kompozitu ν lze vyčíslit směšovacími pravidly ve tvaru

$$\nu = \nu_f \cdot V_f + \nu_m \cdot V_m \quad (17)$$

kde

ν_f = Poissonův poměr skleněného vlákna

ν_m = Poissonův poměr matrice

V_f = objemový podíl vláken

V_m = objemový podíl matrice

4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)

Metoda konečných prvků (Finite Element Method - FEM) je numerická metoda pro analýzu struktur a těles. Pomocí MKP lze řešit problémy pro statiku, dynamiku, akustiku, teplo, elektromagnetické pole, elektrostatiku, piezoelektrické jevy a proudění. Analýzy pomocí MKP vedou na soustavu lineárních rovnic, jejichž řešení lze efektivně provádět pouze použitím počítačů. (11)

MKP byla poprvé popsána Courantem v roce 1941, nebyla však akceptována pro neexistenci prostředků řešení rozsáhlých soustav lineárních rovnic. (11, 10)

Courantův evoluční přístup byl použitelný pro rozměrná tělesa již dříve získaných řešení těchto diferenciálních rovnic odvozených Rayleighem, Ritzem a Galerkinem. Vývoj metody konečných prvků započal na začátku 50-tých let 20.století při řešení konstrukce letadla a úloh statické mechaniky. V roce 1953 byla rovnice tuhosti poprvé popsána v maticovém tvaru, to umožnilo její řešení na počítači. Hnacím motorem bylo v letech 60-tých středisko v Berkeley zaměřené na úlohy stavebního inženýrství. Velký rozmach zaznamenala MKP v leteckém průmyslu. Širší aplikace i v ostatních odvětvích nastoupily až s napsáním rozsáhlých programů využívajících MKP v průběhu 60. a 70. let. Metoda byla propracována spolu s precizním matematickým aparátem v roce 1973 v publikaci Stranga a Fixe „Analysis of The Finite Element Method“ (Analýza metody konečných prvků), kdy již byla zobecněna do samostatného oboru Aplikované matematiky pro numerické řešení fyzikálních soustav v celé řadě rozmanitých inženýrských disciplín např. elektromagnetismus, dynamika tekutin. Nyní je na trhu mnoho programů MKP různé velikosti, s různými možnostmi řešení a různé ceny. (11)

Základním principem FEM je diskretizace tělesa na malé části (prvky). Pomocí prvků je na topologii tělesa vytvořena síť konečných prvků. V uzlech prvků musí být zajištěna spojitost a kompatibilita deformace matematickým popisem pomocí tvarových funkcí. V současné době se převážně používá tzv. deformační metoda, která je nejpoužívanější variantou MKP. Teoretickým základem pro deformační metodu MKP je Lagrangeův variační princip.(9, 10)

5 TECHNIKY TERMICKÉ ANALÝZY

Termické analýzy zahrnují skupinu metod, ve kterých jsou fyzikální a chemické vlastnosti materiálu měřené jako funkce teploty, zatímco materiál podléhá řízeným teplotním změnám. Program v analyzátoru je možné použít pro dynamické zahřívání nebo ochlazování nebo pro izotermické udržování teploty, případně je možné kombinovat oba způsoby.

5.1 Diferenciální termická analýza (DTA)

Při DTA zahříváme nebo chladíme testovaný vzorek a referenční vzorek za stejných podmínek, přičemž zaznamenáváme rozdíl tepla dodaného do jednotlivých vzorků. Rozdíl tepla je zaznamenáván v závislosti na čase nebo na teplotě. Rozdíly mezi vzorky mohou být vyvolány absorpcí tepla nebo vyzářením tepla ze vzorku. DTA můžeme také použít pro sledování tepelných vlastností a fázových změn sledované látky, aniž by docházelo ke změně entalpie. Základna grafu DTA ukazuje rozdíly v teplotních změnách. Sklon křivky v kterékoli části grafu ukazuje závislost mikrostruktury složení na teplotě.

Průběh DTA lze použít jako „otisk prstu“ pro identifikační účely, například ke studiím hmot, u nichž je příliš podobná struktura a je těžké je navzájem odlišit.

Oblast pod vrcholem DTA může ukazovat změnu entalpie, která není ovlivněna tepelnou kapacitou vzorku.

DTA můžeme formálně definovat jako techniku pro záznam rozdílu tepla mezi měřeným a referenčním vzorkem v závislosti na čase nebo na teplotě kdy dva vzorky podléhají kontrolovaným teplotním změnám zahřívacího nebo ochlazovacího procesu.

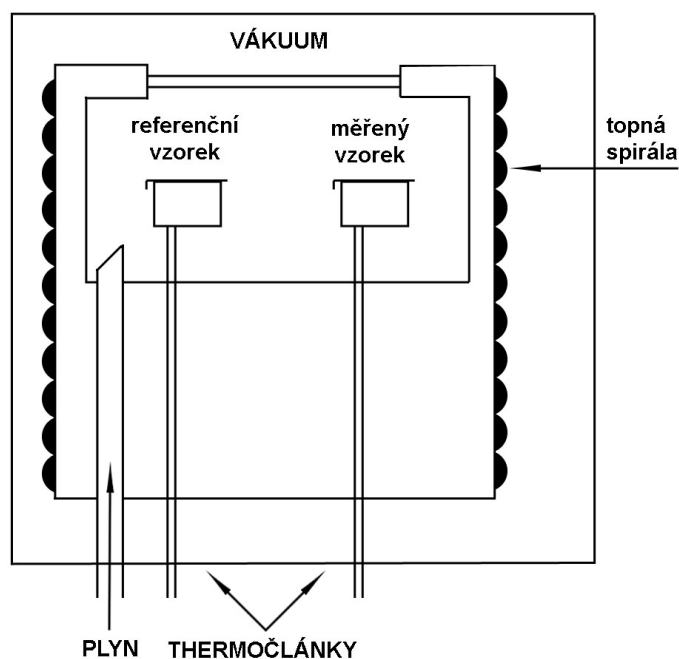
5.1.1 Zařízení pro DTA

Zařízení pro DTA je zobrazeno na obr. 12. Jednotlivé části zařízení jsou následující :

1. Držák vzorku zahrnující termoelektrické články, kryty pro vzorky a keramický, nebo kovový blok
2. Pec
3. Teplotní programátor
4. Záznamový systém

Poslední tři části se mohou lišit v závislosti na výrobcí. Základní požadavek na pec je, aby byla schopna okamžitě reagovat na požadovanou teplotní změnu. Teplotní programátor musí být schopen udržet požadovanou konstantní teplotu. Záznamový systém musí mít

nízkou setrvačností, aby byl schopen reagovat na jakékoli změny teplot a nastavení. Držák vzorku se skládá z termoelektrického článku a to zvláště pro referenční a zvláště pro měřený vzorek. Je umístěn v bloku, který musí zabezpečit rovnoměrný rozvod tepla. Vzorek je uložený v malé pánvičce, kde musí být zajištěn jeho přesný rozměr tak, aby byl situován od okraje po okraj. Pánvička může být vyrobena např. z Pyrexu, siliky, niklu, platiny, ... Volba materiálu pánvičky je závislá na teplotách, při kterých jsou testy prováděny. Termočlánky nesmí být v přímém kontaktu se vzorkem, aby se předešlo kontaminaci a degradaci, případně ovlivnění citlivost měření.



Obr. 12 Ilustrační schéma DTA komory

Kovové bloky jsou méně náchylné k odchýlení základny při srovnání s keramickými, které mohou být pórovité. Zařízení musí být izolováno proti elektrickým vlivům způsobeným elektrickým vinutím topné spirály a to tak, že štít zařízení je uzemněn a to většinou keramickým materiálem s vrstvou platiny. Štít se také využívá k udržení kontrované atmosféry nebo vakua.

V průběhu experimentu v rozmezí teplot od -200°C do 500°C mohou vzniknout problémy s rovnoměrným rozmístěním tepla ve vzorku. Tomu můžeme předejít použitím termočlánků, jež budou mít tvar plochého disku. Tak se vzorek rovnoměrně dotýká po celé své ploše s materiálem pánvičky, který může být z hliníku, nebo platinové folie. Pro možnost opakování pokusu je třeba se ujistit, aby bylo možno pánvičku oddělit od termočlánků.

5.1.2 Experimentální faktory

Výběr vhodných parametrů experimentu je nezbytný. Například vliv prostředí, složení, velikost, povrchu, atd. Experimenty jsou často prováděny na práškových vzorcích, takže data získaná z tohoto vzorku nemusejí být nezbytně stejná jako pro vzorek v pevném stavu nebo formě, kde mohou být výsledky ovlivněny například deformační energií. Forma vzorku je důležitá při degradačních reakcích a může se stát, že dva identické vzorky mohou mít značně rozdílné průběhy.



Obr. 13 Vzorek umístěný do zkušební pánvičky

Při více cyklech měření se může stát, že teplo uvolní látky, které naplní reakční kapacitu měřícího prostoru, proto je lepší ředit atmosféru prostoru, ve kterém probíhá test inertními materiály. Při měřeních, při kterých dochází k přeměně fáze, se doporučuje ujistit, že vrchol teploty se nemění s velikostí vzorku.

Tvar grafického průběhu DTA analýzy a velikosti jeho vrcholů jsou závislé na váze vzorku a rychlosti ohřevu. Zpomalení rychlosti ohřevu je zhruba ekvivalentní k eliminaci váhového rozdílu vzorku. Obojí vede ke strmějším vrcholům průběhu a tím ke zřetelnějším výsledkům a menšímu počtu nejasností v grafickém záznamu. Pro analýzu kinetiky reakce je důležité minimalizovat sklon průběhu a to redukcí velikosti vzorku a rychlosti ohřevu.

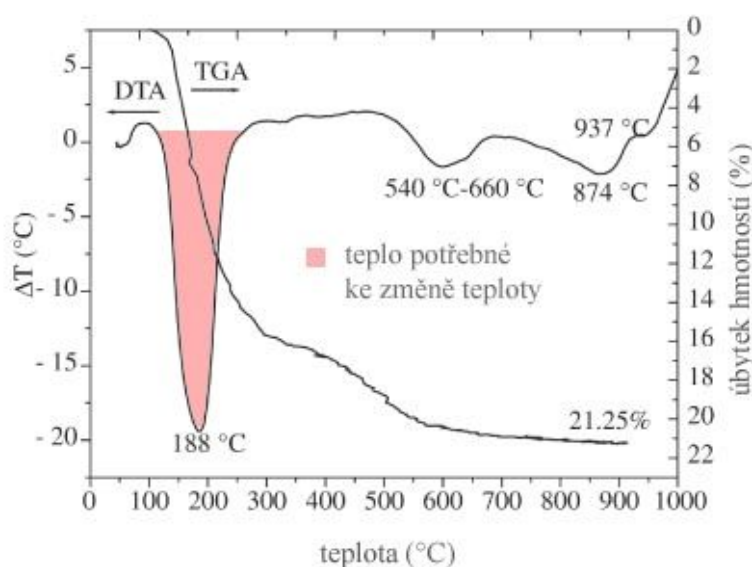
5.1.3 Výklad a presentace dat

Jednoduchý DTA graf se může skládat z téměř lineárních částí, které lze nahradit přímkou. Tepelná kapacita a teplotní vodivost zkoušeného a referenčního vzorku nejsou stejné a vrcholy grafů odpovídají chemickým nebo fyzikálním změnám (obr. 14.).

Potíže vznikají s měřením teplotních změn použitím DTA grafu. Prudký nástup DTA vrcholu je v podstatě na počáteční teplotě, ale teplota se může zpoždovat z důvodu umístění vzorků s ohledem na referenční vzorek a zkoumaný vzorek. Z tohoto důvodu se doporučuje přesně kalibrovat aparaturu s ohledem na známé teploty tání. Oblast vrcholu (A), která souvisí se změnami entalpie ve zkoumaném vzorku, je sevřena mezi vrcholem a přerušovanou základnou. Pokud jsou diferenční termočlánky v tepelném, ale ne ve fyzickém kontaktu s testovaným a referenčním vzorkem, lze A vyjádřit jako:

$$A = \frac{mq}{gK} \quad (18)$$

Kde m je hmotnost vzorku, q je změna entalpie na jednotku hmotnosti, g je tvarový koeficient a K je tepelná vodivost vzorku. U pórovitých a ztužovaných materiálů může plyn, uvolňující se z pórů narušit atmosféru v okolí vzorků a může vést k většímu počtu chyb v oblasti vrcholu grafu. Situace se může ještě zhoršit, pokud dojde k reakci a smíchání plynů uvolněných ze vzorku s atmosférou v přístroji a ta se bude značně lišit od podmínek, při nichž byl přístroj kalibrován před vlastním měřením.



Obr. 14 Ukázka grafu DTA a TGA (DTG)

Měřicí systém DTA je kalibrován podle entalpie měřených vrcholů standardních vzorků při daném teplotním rozpětí. Kalibrace by měla být založena minimálně na dvou různých vzorcích a zahrnovat jak ohřev, tak ochlazování vzorků.

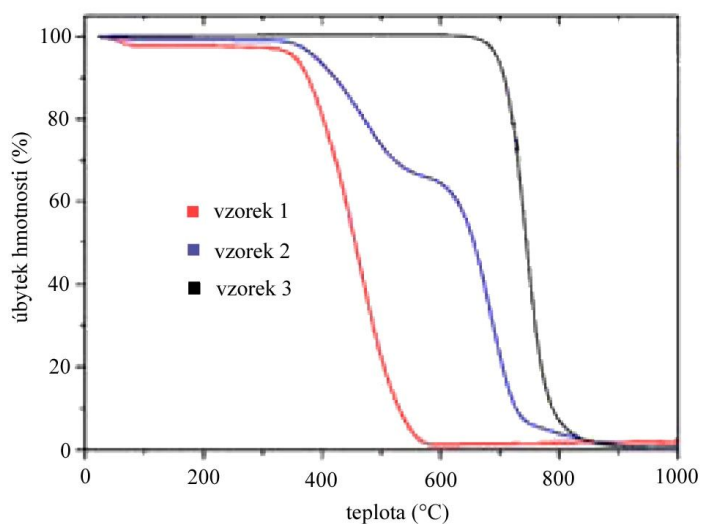
Pomocí DTA lze také měřit tepelnou kapacitu c_p při konstantním tlaku:

$$c_p = K \cdot \frac{T_2 - T_1}{m \Delta T} \quad (19)$$

Kde T_1 a T_2 jsou rozdíly teplot kdy poprvé měřicí systém měřil bez vzorku a podruhé se vzorkem. H je teplotní rozsah a konstanta K je určena kalibrací na základní látky.

5.2 Diferenciální termogravimetrie (DTG)

Také známá jako TGA (Thermogravimetric analysis). Metoda, která umožňuje sledovat procesy spojené se změnou hmotnosti navážky vzorku buď při kontinuálním zvyšování teploty (dynamický způsob) nebo v izotermickém režimu (statický způsob). V prvním případě se sledují závislosti aktuální hmotnosti na teplotě nebo čase, tedy $m = m(T)$, resp. $m = m(t)$, tzv. termogravimetrické křivky.



Obr. 15 Záznam grafu termogravimetrie

5.3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

5.3.1 Charakteristika metody

Infračervená spektroskopie je používána k identifikaci chemické struktury látek již od 30. let 20. století. Jedná se o analytickou techniku určenou především pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin a také pro stanovení anorganických látek. Tato technika měří pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem. Infračerveným zářením je elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek 0.78 – 1000 μm , což odpovídá rozsahu vlnočtů 12800 – 10 cm^{-1} . Celá oblast bývá rozdělena na blízkou (13000 – 4000 cm^{-1}), střední (4000 – 200 cm^{-1}) a vzdálenou infračervenou oblast (200 – 10 cm^{-1}), přičemž nejpoužívanější je střední oblast. (18)

5.3.2 Princip

Principem metody je absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem, při níž dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Analytickým výstupem je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie, většinou vyjádřené v procentech transmittance (T) nebo jednotkách absorbance (A) na vlnové délce dopadajícího záření. Transmittance (propustnost) je definována jako poměr intenzity záření, které prošlo vzorkem (I) k intenzitě záření vycházejícího ze zdroje (I_0). Absorbance je definována jako dekadický logaritmus $1/T$. Závislost energie na vlnové délce je logaritmická, proto se používá vlnoččet, který je definován jako převrácená hodnota vlnové délky a tedy uvedená závislost energie na vlnočtu bude funkcí lineární. (18)

5.3.3 Absorpční pásy

Absorpční pásy mající vrcholy v intervalu 4000 – 1500 cm^{-1} jsou vhodné pro identifikaci funkčních skupin (např. $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{N}-\text{H}$, CH_3 aj.). Pásy v oblasti 1500 – 400 cm^{-1} jsou nazývané oblastí „otisku palce“ (fingerprint region). Pomocí „Search programů“ a digitalizovaných knihoven infračervených spekter je možno identifikovat neznámou analyzovanou látku. V současné době se objevují software, které umožňují simulovat infračervené spektrum organických molekul. (18)

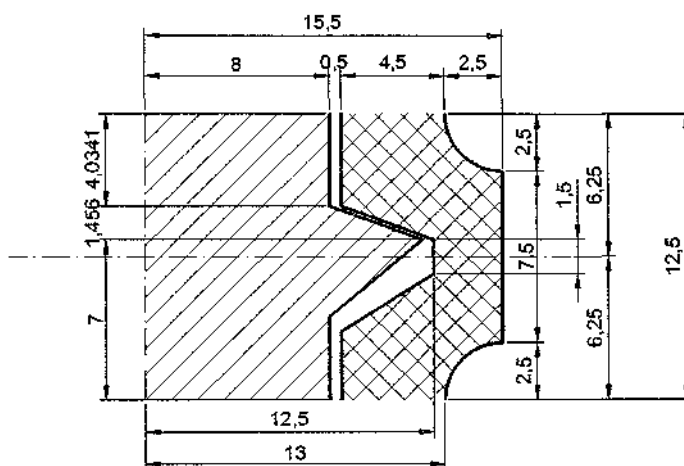
II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 TERMÁLNÍ ANALÝZY

6.1 Vzorčky pro DTA/DTG

6.1.1 Hmoždinka používaná u ČD

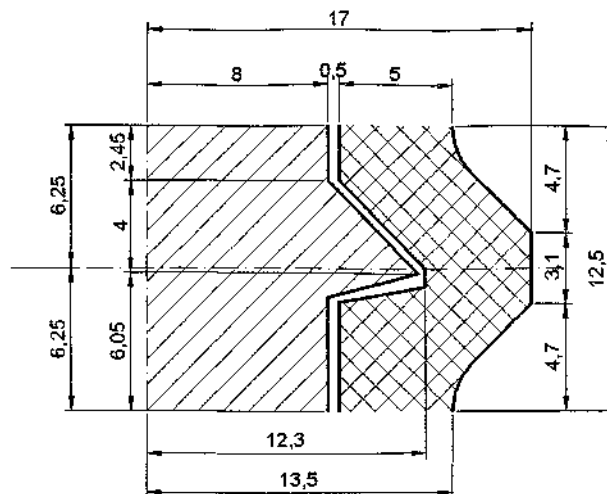
Pro hmoždinku používanou u ČD byly uvažovány materiálové charakteristiky pro materiál Silamid ESV-30, alternativně PA 6. Tyto vlastnosti byly převzaty z „Obecných technických podmínek pro plastové vložky do betonových pražců“. Odchylky mezi oběma materiály jsou v toleranci pro suchý a koincidovaný materiál. Zadány byly hodnoty: modul pružnosti $E = 6,0 \text{ GPa}$, Poissonův součinitel $\nu = 0,2$, mez kluzu 70 MPa , pevnost materiálu 110 MPa , nejnižší tažnost 5% . (12)



Obr. 16 Sestava závitu vrtule R1, R2 a vnitřního závitu hmoždinky ČD (12)

6.1.2 Vývojový typ VT-1

Pro vývojový typ hmoždinky VT-1 byly uvažovány materiálové charakteristiky plastu NITREN EH 71 G 30 - vstřikovací typ homopropylénu PE plněného skleněným vláknem (30%). Zadány byly hodnoty: modul pružnosti $E = 5,9 \text{ GPa}$, Poissonův součinitel $\nu = 0,2$, mez kluzu 39 MPa , pevnost materiálu 59 MPa , nejnižší tažnost $3,5\%$. (12)



Obr. 17 Sestava závitů vrtule Ss25 DB a hmoždinky VT-1 (12)

6.1.3 Příprava vzorků pro DTA/DTG

Hmoždinky byly důkladně očištěny, poté z nich byl odřezán rovnoměrně tlustý pásek o šířce minimálně 5mm. Z tohoto pásku byl vyseknut vzorek o průměru 5mm, který se vkládal do zkušebních pánviček. Tloušťka vzorku byla u každého materiálu proměnná, protože celý vzorek musí odpovídat váze cca 10mg.



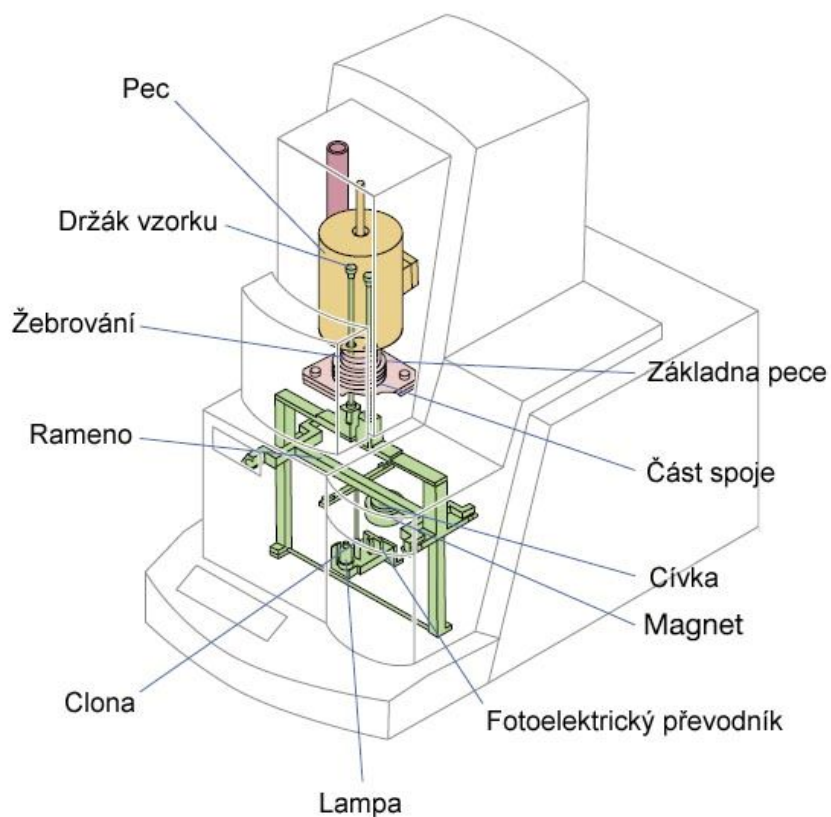
Obr. 18 Měřené vzorky

Tab. 3 Hmotnosti vzorků pro DTA/DTG

Vzorek	Hmotnost [mg]
Modrý	12,90
Světle žlutý	13,28
Bílý	13,63

6.1.4 Zařízení pro DTA/DTG

Měření DTA/DTG charakteristik bylo provedeno na zařízení Schimadzu DTG-60. Vzorky byly zahřívány konstantní rychlostí 5°C/min až do teploty 600°C v dusíkové atmosféře.



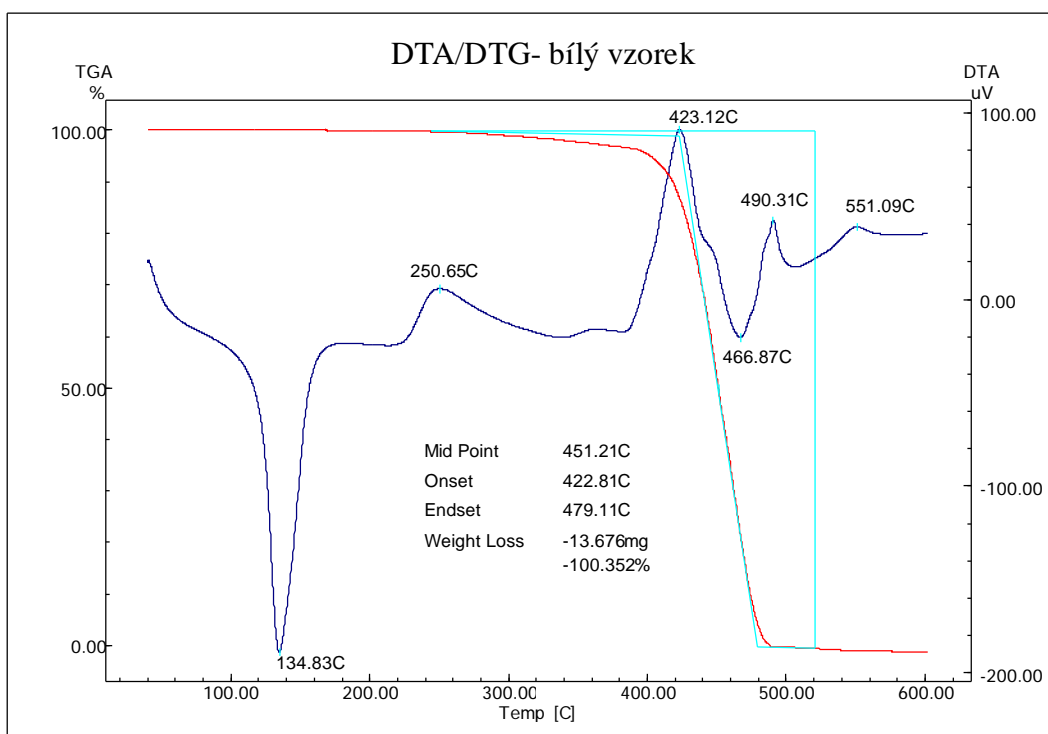
Obr. 19 Schimadzu DTG-60

6.1.5 Vyhodnocení měření DTA/DTG

6.1.5.1 Bílý vzorek

Z grafu naměřených hodnot DTA nám vyplývá, že při konstantním ohřevu vzorku nám první pík vznikl při teplotě 134,83°C. Tento pík může znamenat buď teplotu skelného přechodu měřeného materiálu, nebo teplotu tání. Další vzniklé píky nejsou pro naše měření významné hodnoty a poukazují na počátek tepelné degradace a počátek a průběh depolymerace měřeného polymeru. Podle materiálových tabulek tato teplota odpovídá teplotě tání HDPE, která je dle typu PE a podle výrobce v rozmezí 125-136°C. Tyto hodnoty odpovídají zmíněnému materiálu použitému pro výrobu hmoždinek vývojového typu VT-1 a to materiálu NITREN EH 71 G 30.

Dle závislosti DTG můžeme určit, že se jedná o neplněný, čistý HDPE, čemuž odpovídá 100% úbytek hmotnosti při depolymeraci materiálů, což nesouhlasí s popisem materiálu použitého pro vložku typu VT-1. Z tohoto důvodu vzorek můžeme vyloučit.

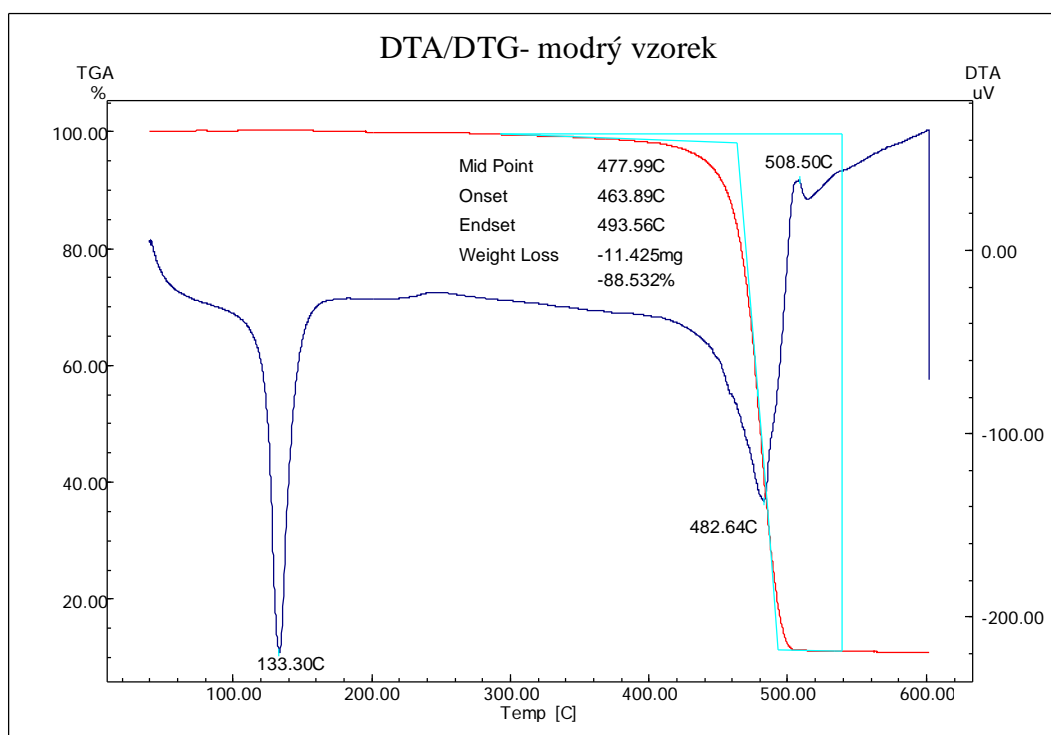


Obr. 20 DTA/DTG pro bílý vzorek

6.1.5.2 Modrý vzorek

Průběh grafu DTA je téměř totožný jako u bílého vzorku z čehož můžeme určit, že se jedná o stejný typ HDPE, tudíž NITREN EH 71 G 30.

Průběh měření DTG se ale již liší oproti bílému vzorku a to v úbytku hmotnosti, která odpovídá 88,53% úbytku hmotnosti. Z tohoto vyplývá, že se jedná o materiál NITREN EH 71 G 30, který je plněný skelným vláknem, které má jiné vlastnosti než materiál matrice a tudíž nedochází ani k úplnému poklesu křivky DTA ani DTG. U měřeného vzorku obsah skelného vlákna odpovídal přibližně 12% (hmotnostním) obsahu, přičemž výrobce uvádí 30% obsahu. Odchyłka může být způsobena nerovnoměrným obsahem vláken ve vzorku, nebo také malými rozměry měřeného vzorku.

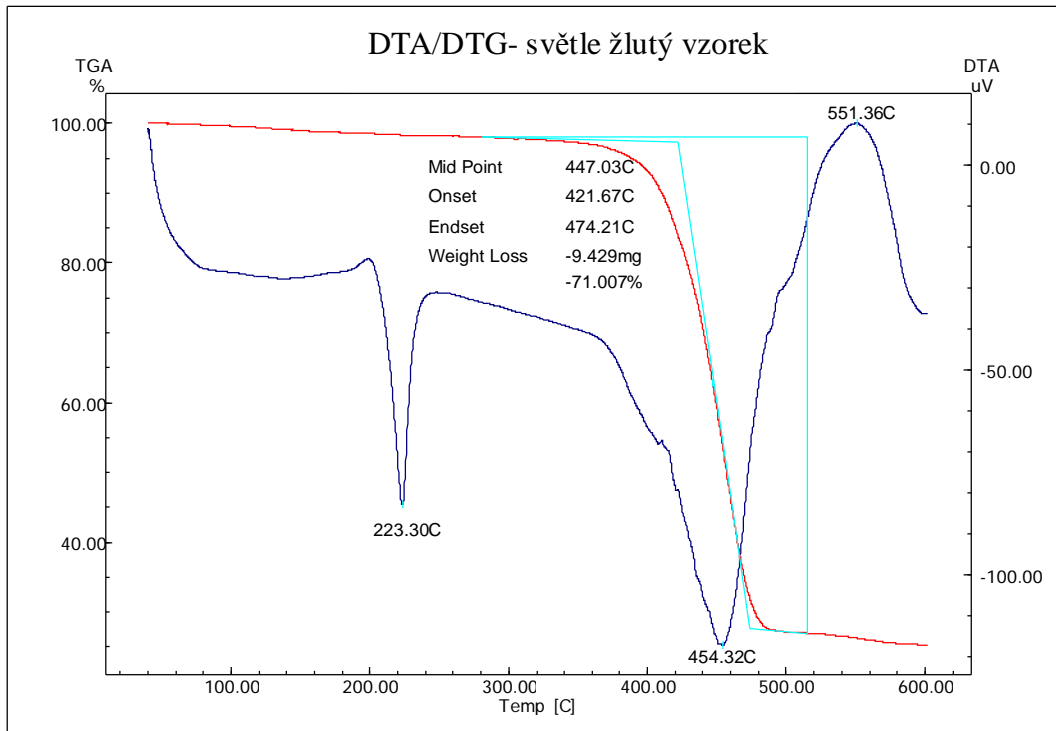


Obr. 21 DTA/DTG pro modrý vzorek

6.1.5.3 Světle žlutý vzorek

Z grafu závislosti DTA pro světle žlutý vzorek je zřejmý pík při teplotě 223,3°C. Tato teplota odpovídá teplotě tání materiálu PA6, která je v rozmezí 215-221°C a může se nepatrně lišit v závislosti na výrobci. Odchyłka může být způsobena i přesností měřicího přístroje, která je stanovena výrobcem na +-1% což je odpovídající.

Z grafu závislosti úbytku hmotnosti DTG lze určit úbytek hmotnosti vzorku odpovídající hodnotě 71%. Z toho vyplývá, že vzorek je taktéž plněn skelným vláknem a to z 29%. Jedná se tudíž o běžně dostupný, standardní materiál PA6. Odpovídá tomu také lehce nažloutlé zbarvení.



Obr. 22 DTA/DTG pro světle žlutý vzorek

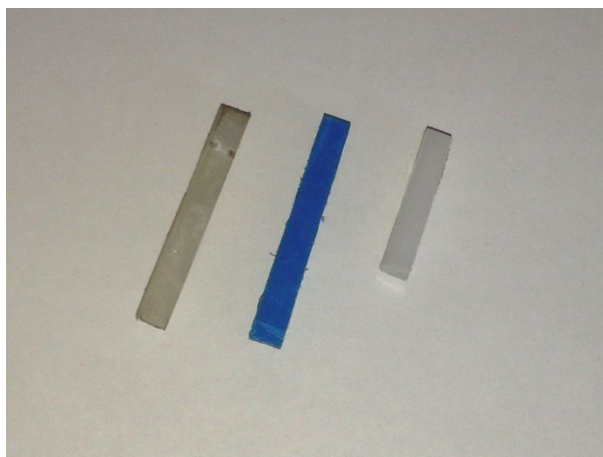
7 FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY (FTIR)

7.1 Vzorčky pro FTIR

Pro FTIR analýzu byly vyrobeny vzorky z vložek vyřezáním. Velikost vzorků byla maximální možná, které šlo dosáhnout, aby byla zachována absolutní hladkost čela vzorku, které se přikládá na senzor analyzátoru. U vzorků pro FTIR metodou ATR je důležitá měřená plocha, její hladkost a čistota, proto bylo čelo vyhlazeno, vyčištěno a snažili jsme se dosáhnout co největší možné plochy. Pro měření bylo použito analyzátoru Shimadzu FTIR-8400S.

Tab. 4 Rozměry plochy vzorků pro FTIR

Vzorek	Šířka [mm]	Délka [mm]
Světle žlutý	5,23	40,56
Modrý	4,87	41,65
Bílý	4,97	32,55

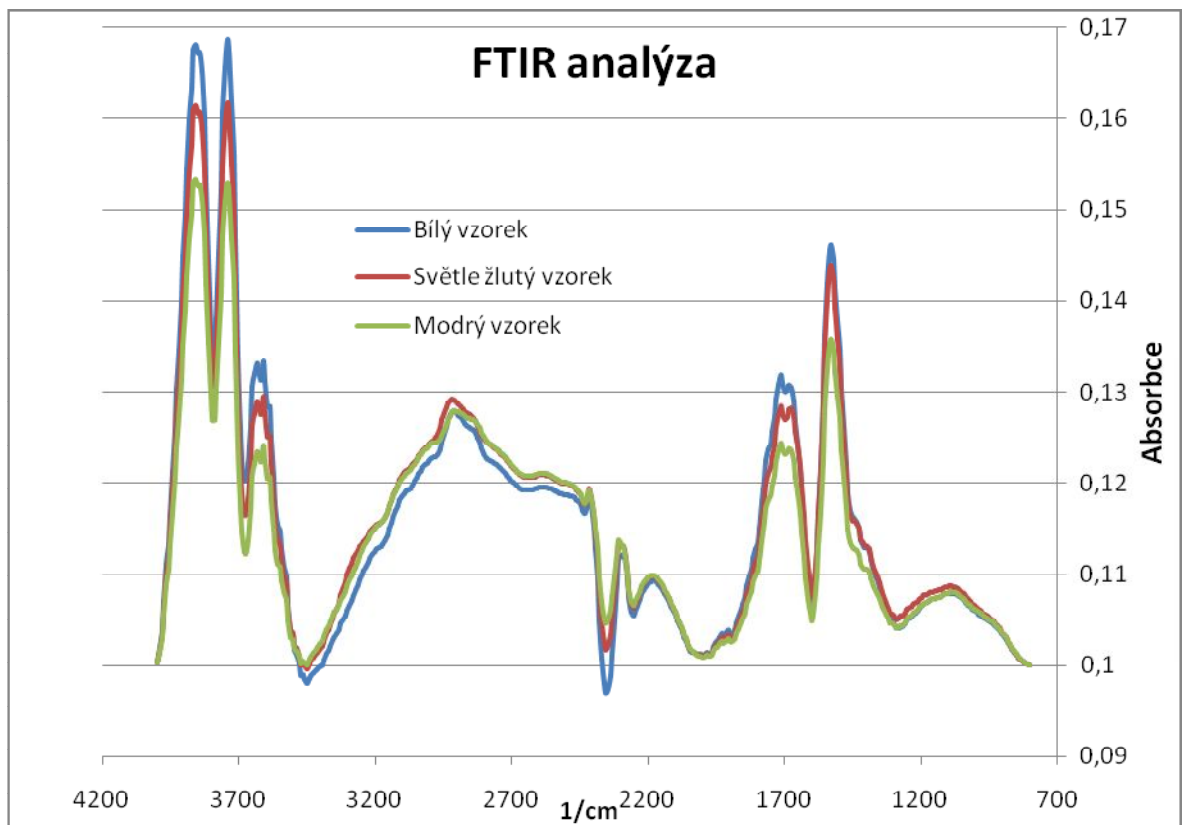


Obr. 23 Vyrobené vzorky pro FTIR

7.2 Vyhodnocení analýzy FTIR

Jak je patrné z obrázku 24, průběhy FTIR analýzy pro všechny tři materiály jsou téměř shodné a žádný z nich nemá odlišnou svou charakteristickou oblast nazývanou otisk palce. To bohužel značí, že analýza neproběhla v pořádku a výsledky analýzy jsou zkreslené.

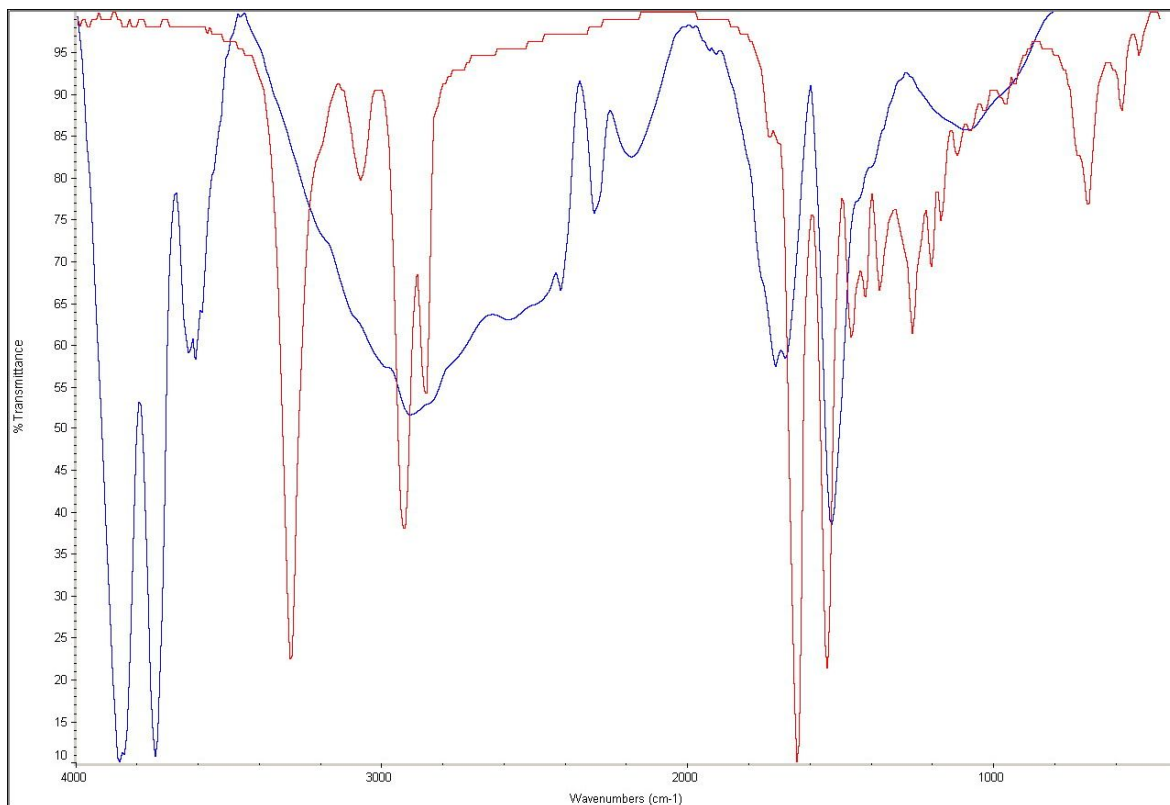
Chyba měření byla s největší pravděpodobností způsobena nedostatečnou velikostí měřené plochy, nedostatečným vyhlazením a čistotou měřené plochy.



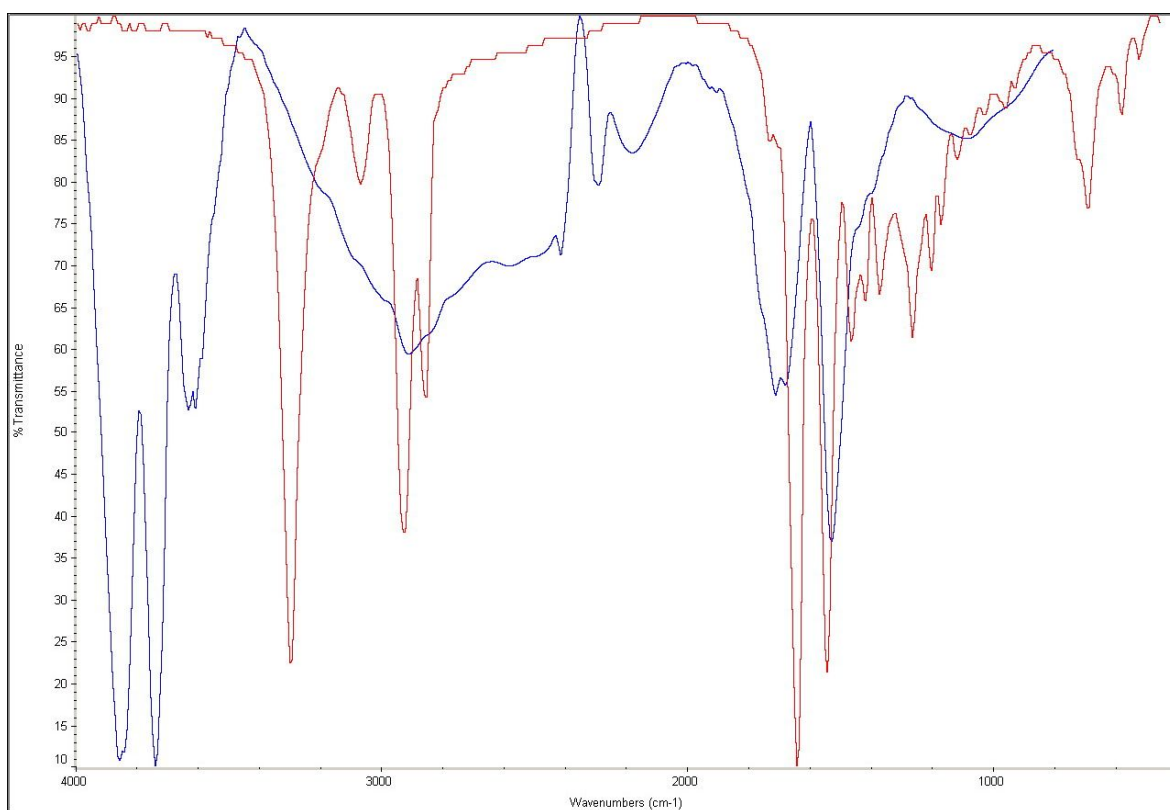
Obr. 24 Srovnání naměřených hodnot jednotlivých vzorků

7.3 Srovnání s referenčními vzorky

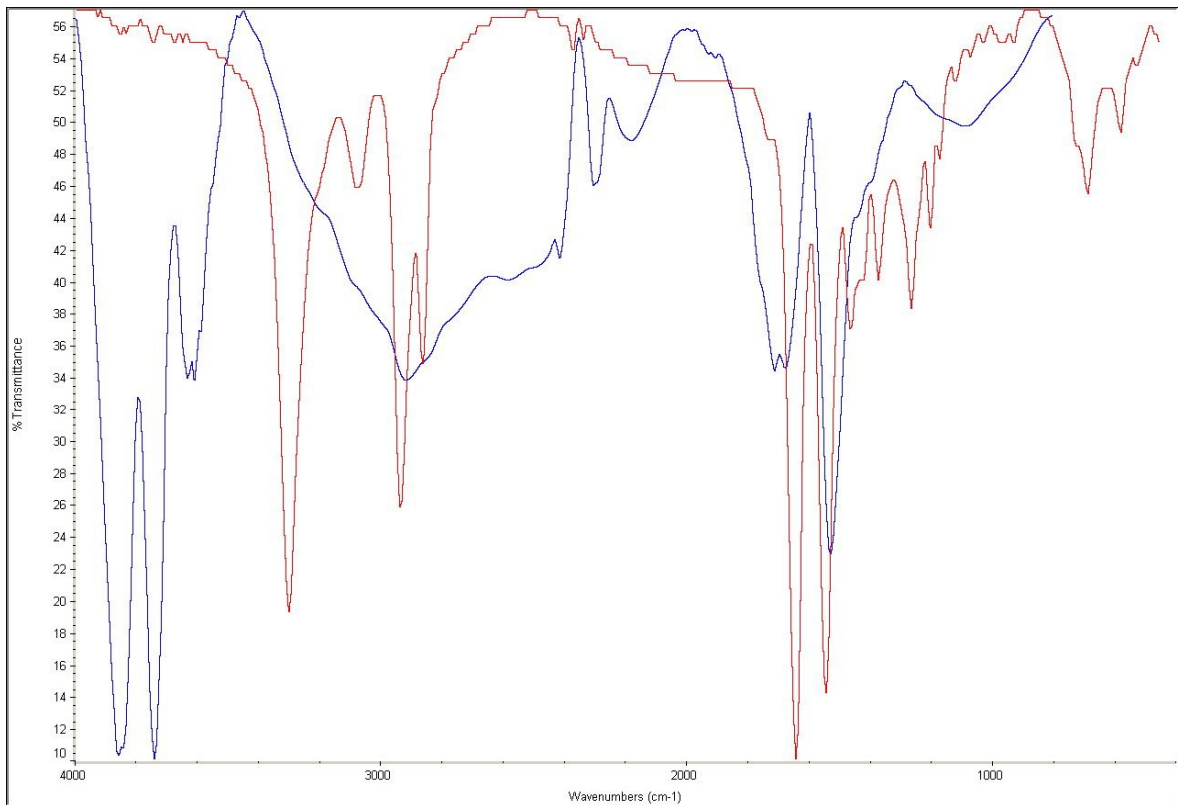
Průběhy naměřených hodnot byly srovnány s referenčními vzorky, kde modrý průběh je průběh naměřený a červený je referenční vzorek materiálu PA6. Největší shoda u všech naměřených průběhů dosahovala hodnoty 14,78% a to s materiálem PA6. Dosažená shoda je irelevantní pro vyhodnocení závěru a pro seriózní identifikaci materiálu.



Obr. 25 Srovnání modrého vzorku s materiálem PA6



Obr. 26 Srovnání bílého vzorku s materiálem PA6



Obr. 27 Srovnání světla žlutého vzorku s materiálem PA6

7.4 Shrnutí materiálových rozborů

Z analýz DTA a DTG lze jednoznačně určit, že zkoumané vzorky se shodují s materiály uvedenými v závěrečné zprávě.

Analýza FTIR nám neposkytla žádné použitelné informace, ale lze ji brát jen jako doplňující analýzu potvrzující výsledek DTA a DTG analýzy.

Z toho vyplývá, že můžeme použít pro numerický rozbor namáhání a napjatosti materiálové konstanty uvedené v závěrečné zprávě.

8 APLIKACE METODY KONEČNÝCH PRVKŮ PRO ŘEŠENÍ NAPJATOSTI

8.1 Teoretický úvod

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 (16, 17).

Její nejrozšířenější variantou je deformační metoda používající tzv. Lagrangeovských konečných prvků. Tato varianta vychází z Lagrangeova variačního principu minima celkové potenciální energie soustavy (těleso + jeho zatížení), resp. jeho vnějších a vnitřních sil. Matematicky je princip formulovaný rovnicí

$$\Pi = \Pi_i + \Pi_z = \min \quad (20)$$

kde

Π = celková potenciální energie

Π_i = deformační energie vnitřních sil tělesa

Π_z = práce vnějších sil

Tento princip znamená, že ze všech kinematicky přípustných stavů pružného tělesa nastává takový stav, pro který nabývá potenciální energie systému minimální hodnotu (13).

Celkovou potenciální energii elementu pro spojité třídímní těleso rozdělené do m elementů lze vyjádřit vztahem

$$\Pi = \sum_{e=1}^m \Pi^e - \{d\}^T \{f\} \quad (21)$$

kde

$$\Pi^e = \Lambda^e - W_0^e - W_p^e \quad (22)$$

V maticovém tvaru lze energetický funkcionál pro element e zapsat ve tvaru

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} [d]^e \left(\int_V [B]^T [D] [B] dV \right) \{d\}^e - \\ & - [d]^e \left(\int_V [B]^T [D] \{\epsilon_T\} dV + \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{Bmatrix} dV + \int_\Gamma [N]^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} d\Gamma \right) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \partial \Pi^e(u, v, w) = 0 \quad (24)$$

V rovnici první a druhý integrál představují potenciální energii přetvoření, třetí integrál představuje práci vykonanou objemovými silami a poslední integrál práci vykonanou rovnoměrným zatížením na povrchu oblasti Γ . Pro rovnováhu systému nabývá potenciální energie minima, tzn. že první variace energetického potenciálu

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \partial \Pi^e(u, v, w) = 0 \quad (25)$$

Matematickými úpravami předcházejících rovnic se dostane tvar tzv. matice tuhosti elementu ve tvaru

$$[k]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (26)$$

kde $[B]$ je transformační matice a matice $[D]$ je maticí fyzikálních konstant. Po dalších provedených úpravách se dostane standardní tvar rovnice statické analýzy pro element v následujícím tvaru

$$[k]^e \{d\}^e = \{f\}^e \quad (27)$$

kde vektor zobecněných posuvů

$${}^T [d]^e = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ \dots \ u_r \ v_r \ w_r] \quad (28)$$

a vektor zatížení v uzlech je

$${}^T \{f\}^e = [\{f\}^1 \ \{f\}^2 \ \dots \ \{f\}^r] \quad (29)$$

kde r je počet uzlů na elementu.

Rovnice celého systému pro diskretizované těleso s m uzly musí zahrnovat rovnice všech uzlů a má tvar

$$[K] \{d\} = \{f\} \quad (30)$$

kde

$[K]$ = matice tuhosti pro celý systém

$\{d\}$ = vektor uzlových posunutí pro celý systém

$\{f\}$ = vektor výsledných sil v uzlech

Výsledná rovnice pro výpočet tenzoru napětí v závislosti na posuvech a počátečních přetvořeních bez uvažování počátečních teplotních napětí se může zapsat jako

$$\{\sigma\} = [D] [B] \{d\} \quad (31)$$

V případě, že existují počáteční napětí je nutné je superponovat (13, 14, 15, 17).

8.2 APLIKACE METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

K simulaci bylo použito softwaru Samcef a SamCef Field od společnosti SamTech. Byly namodelovány oba typy plastových vložek a pro výpočet byly použity oba druhy materiálů a to Silamid a Nitren. Obě vložky byly modelovány jako izotropní i jako anizotropní materiály.

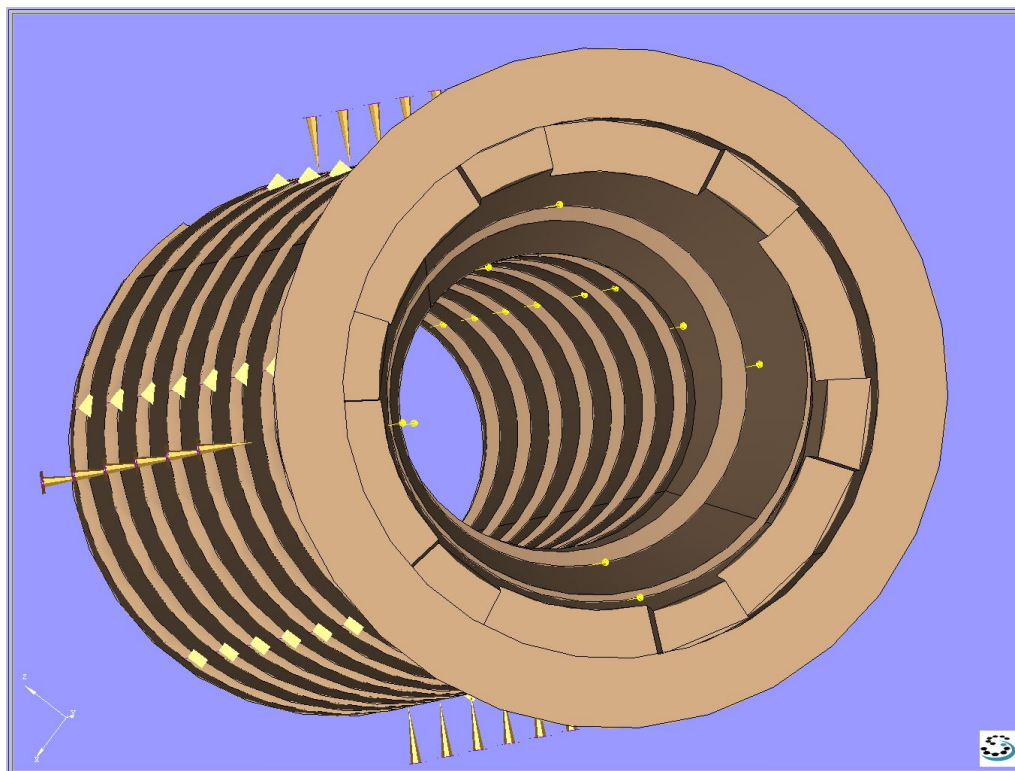
Model byl zatížen liniovou silou 50N/mm která byla aplikována na hrany šroubovice, tudíž na místo kde dochází k namáhání hmoždinky působením šroubu.

Okrajové podmínky jsou patrné z obr. 28, 29, 44 a 45 kdy bylo zamezeno pohybu v ose Y a bylo zamezeno i pohybu vnější válcové plochy ve směru normály.

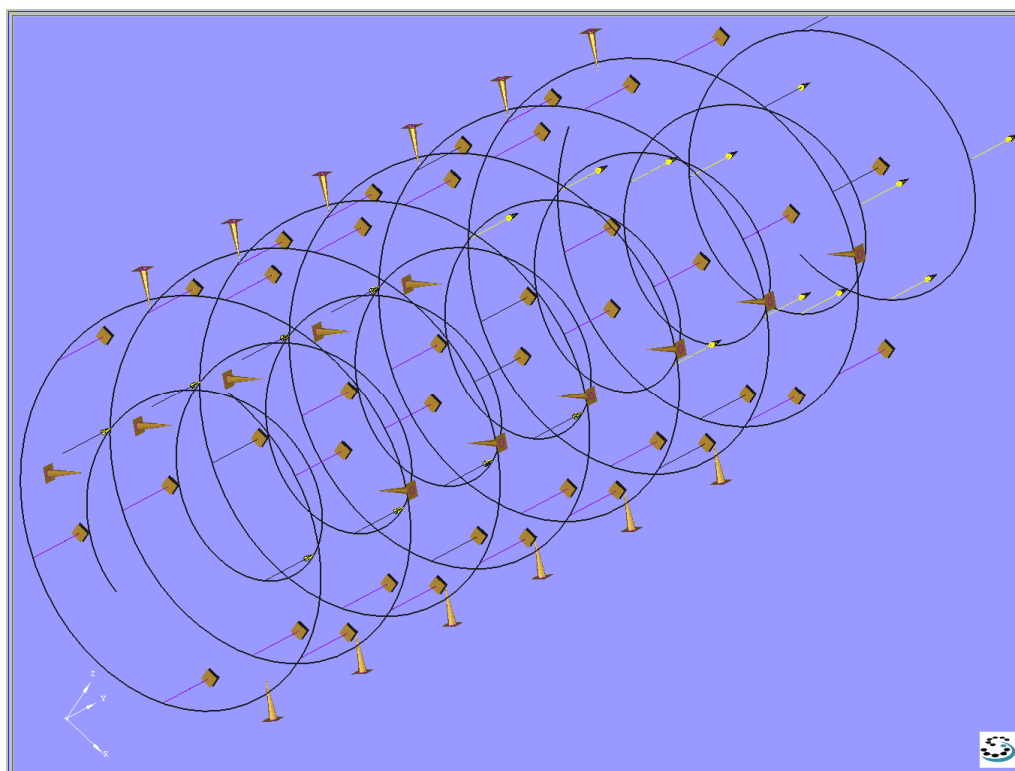
Tab. 5 Materiálové charakteristiky použité pro výpočet

Veličina	Silamid	Nitren
Modul pružnosti E	6,0 GPa	5,9 GPa
Poissonova konstanta	0,2	0,2
Mez kluzu	70 MPa	39 MPa
Pevnost materiálu	110 Mpa	59 MPa
Nejnižší tažnost	5%	3,5%

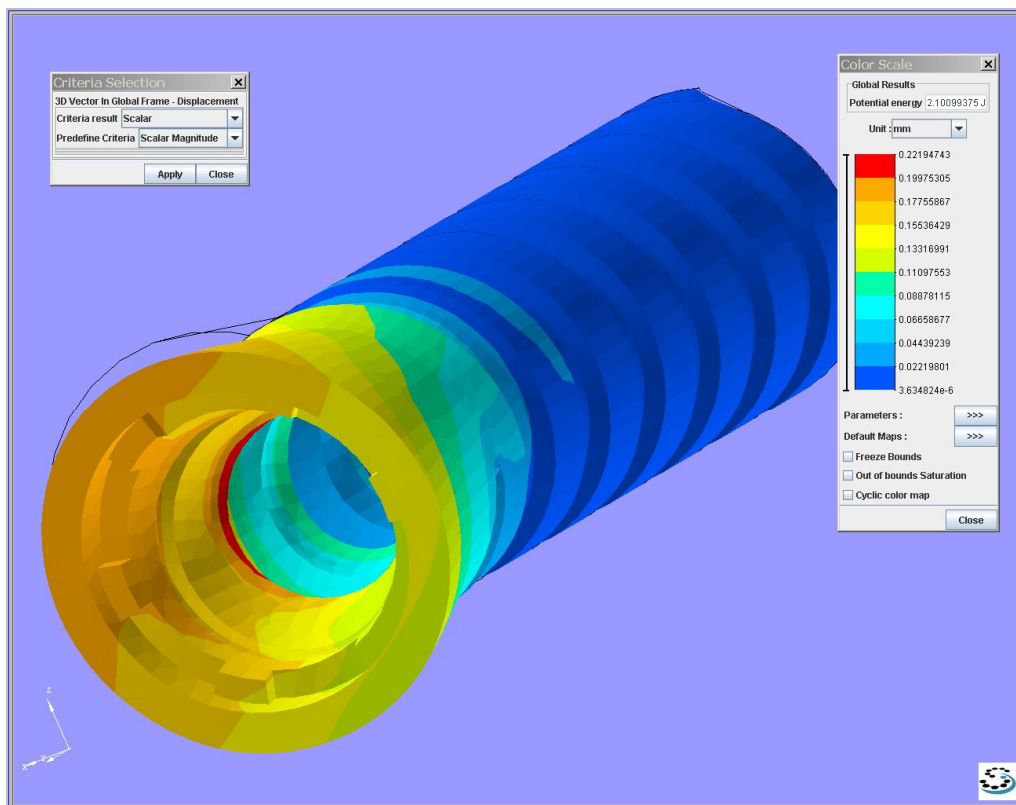
8.2.1 Vložka používaná u ČD- materiál Silamid, izotropie



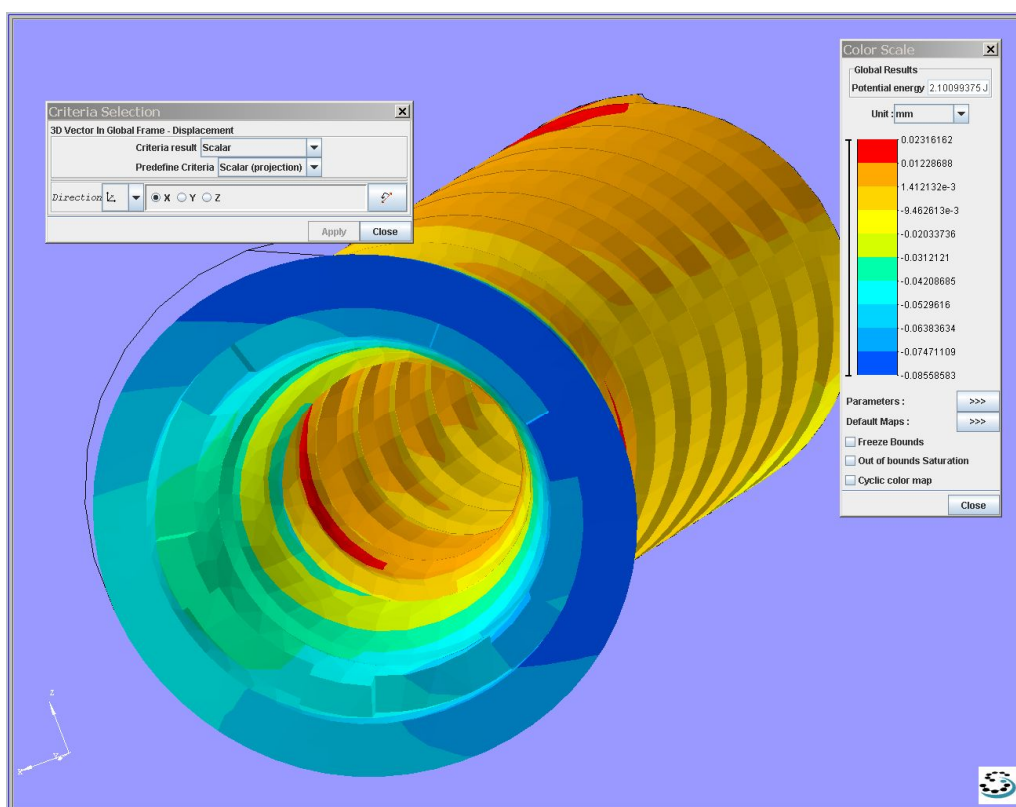
Obr. 28: Zatížení a okrajové podmínky



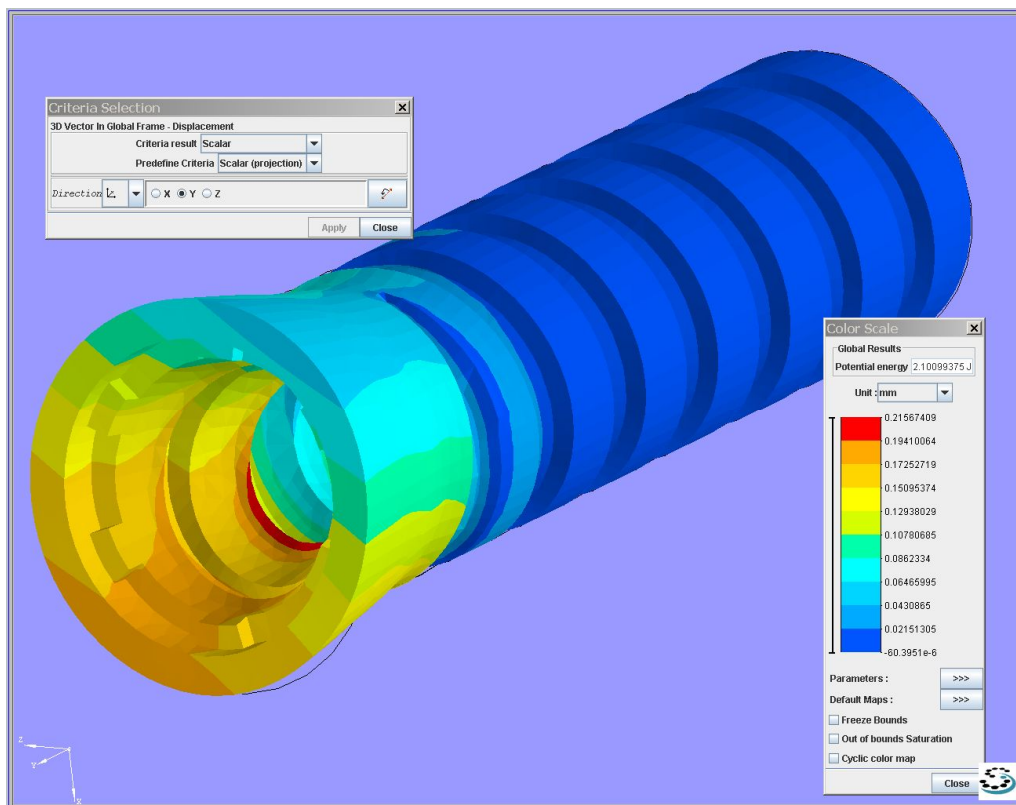
Obr. 29 Zatížení a okrajové podmínky transparentní pohled



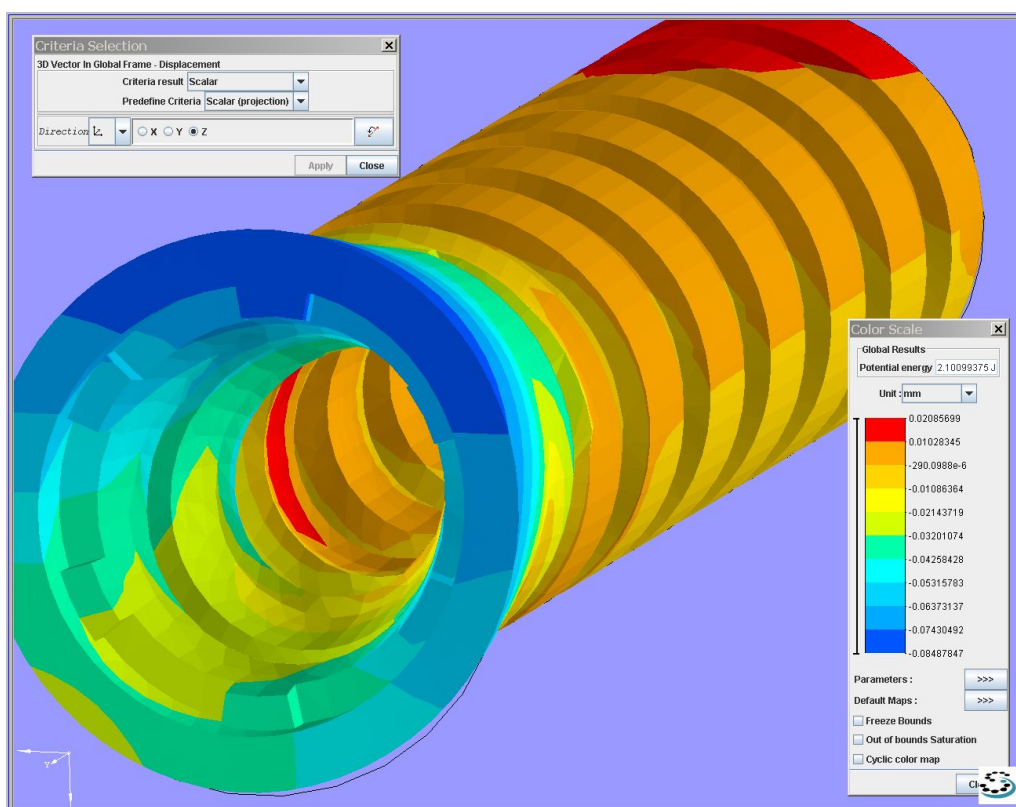
Obr. 30 Celková deformace



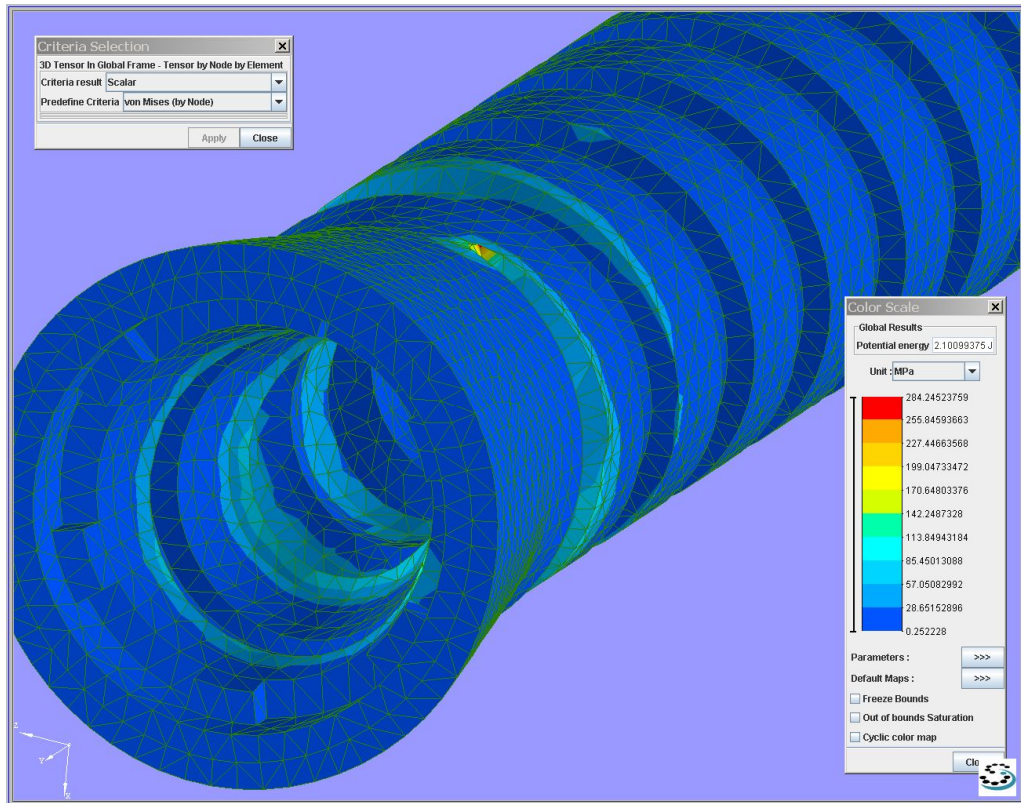
Obr. 31 Deformace v ose X



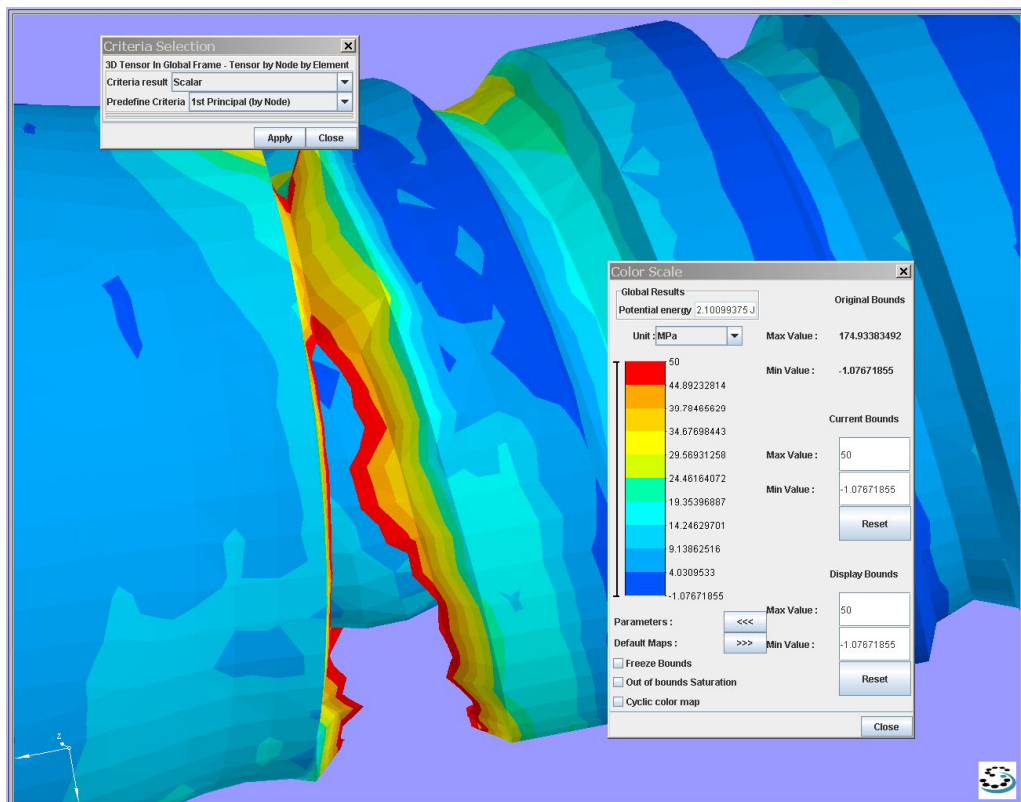
Obr. 32 Deformace v ose Y



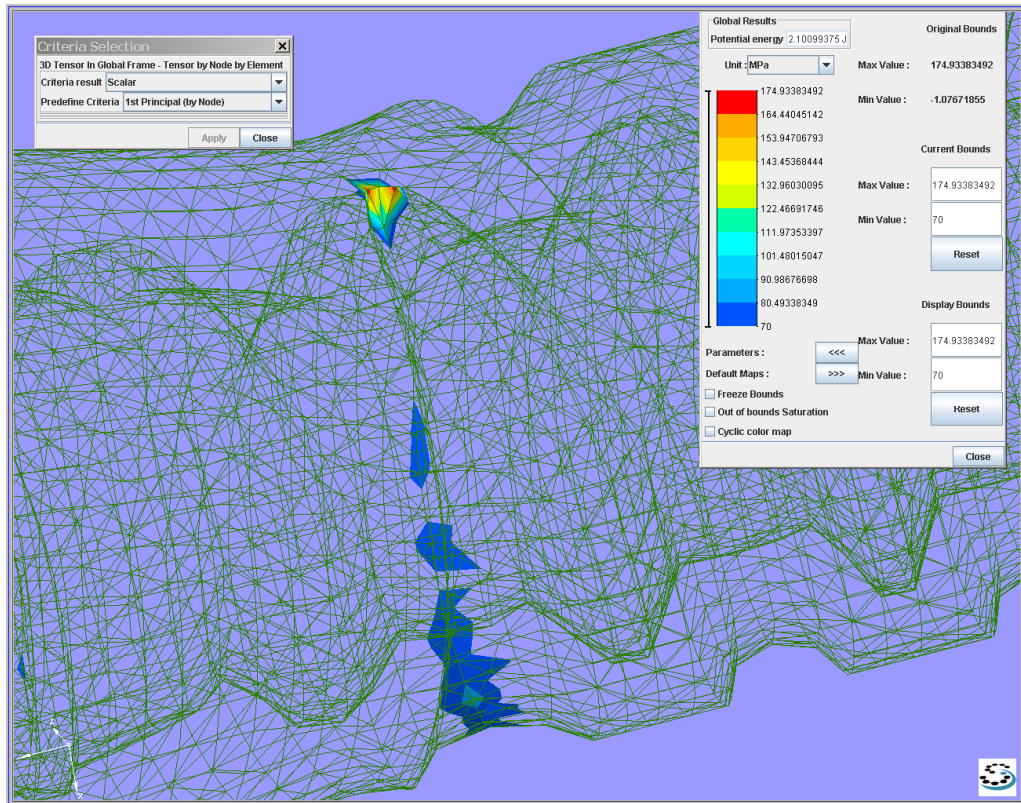
Obr. 33 Deformace v ose Z



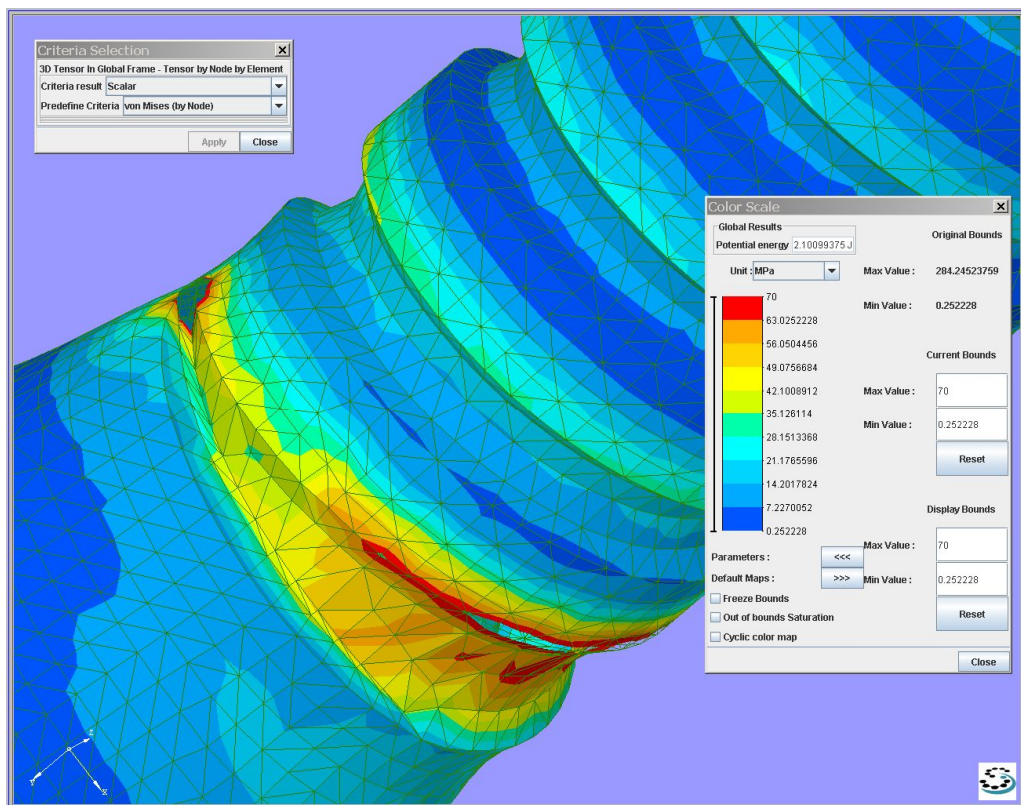
Obr. 34 HMH napětí



Obr. 35 HMH napětí bez špiček

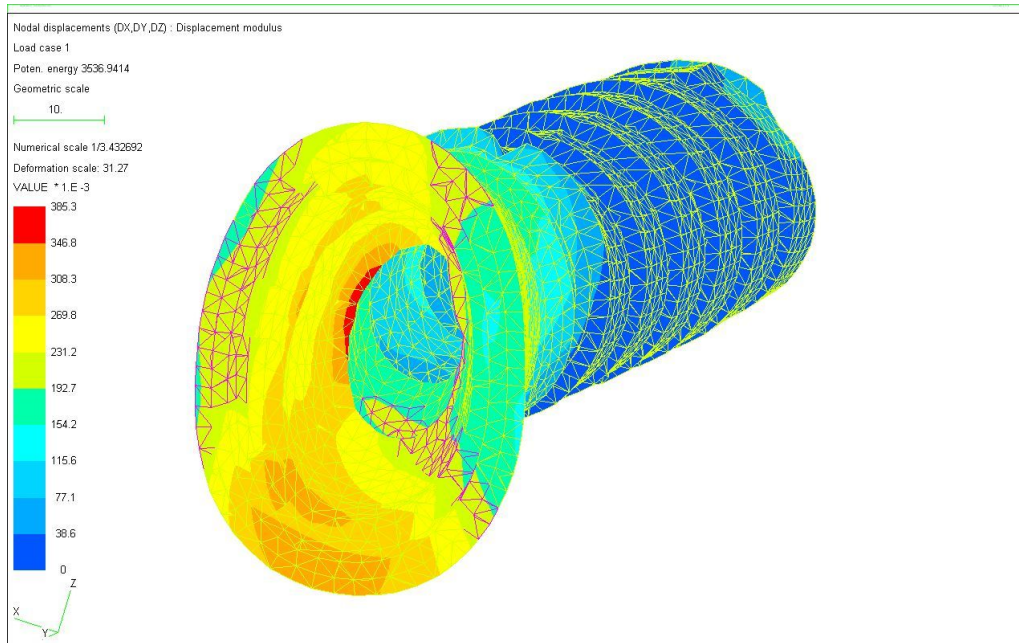


Obr. 36 Špičky HMH napětí

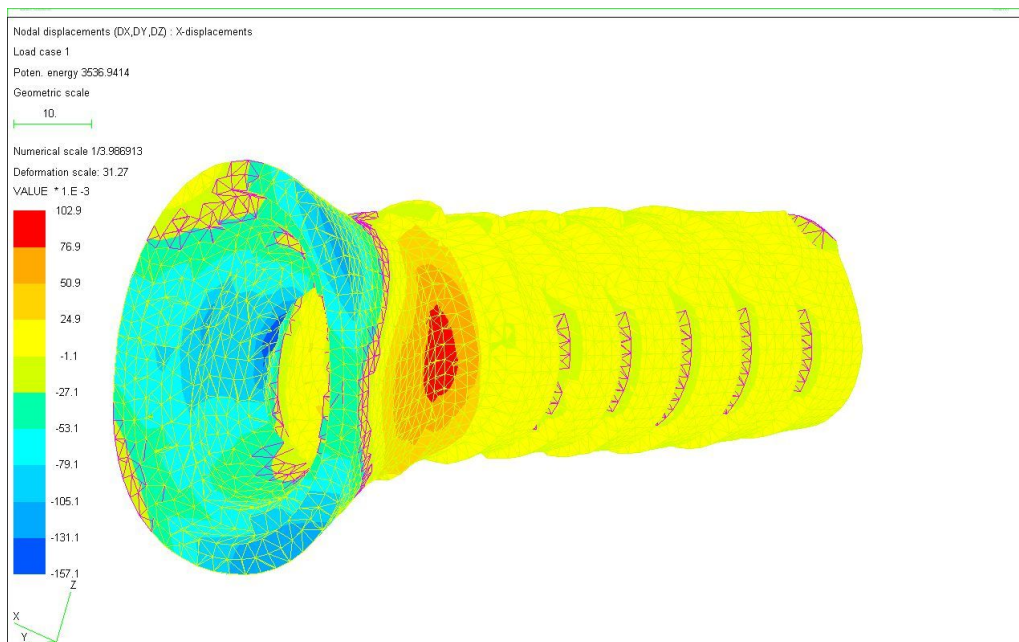


Obr. 37 Hlavní napětí

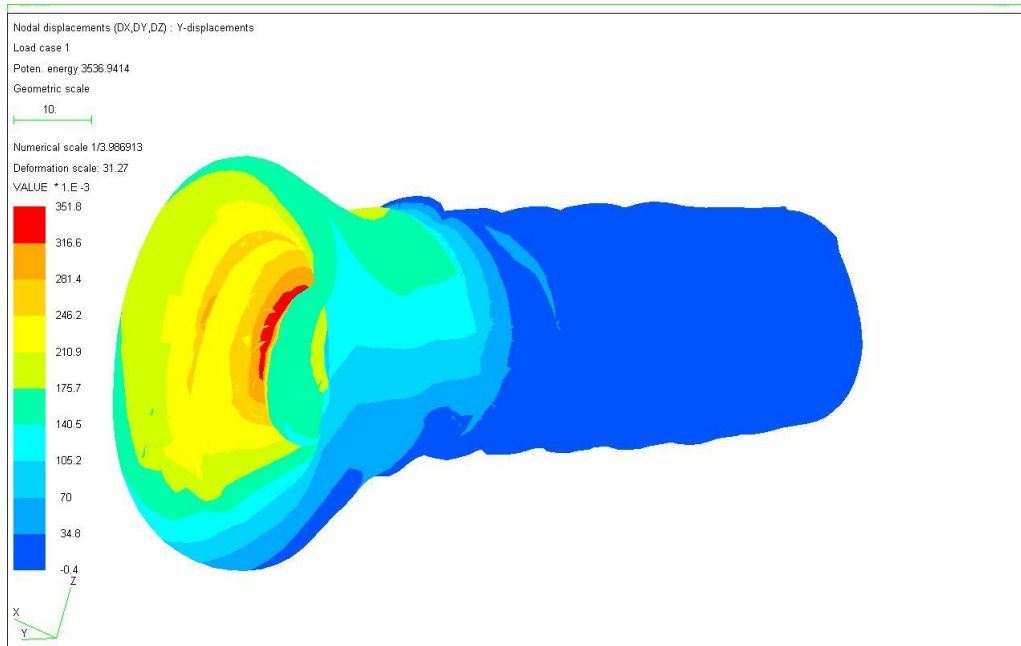
8.2.2 Vložka používaná u ČD- materiál Silamid, ortotropie



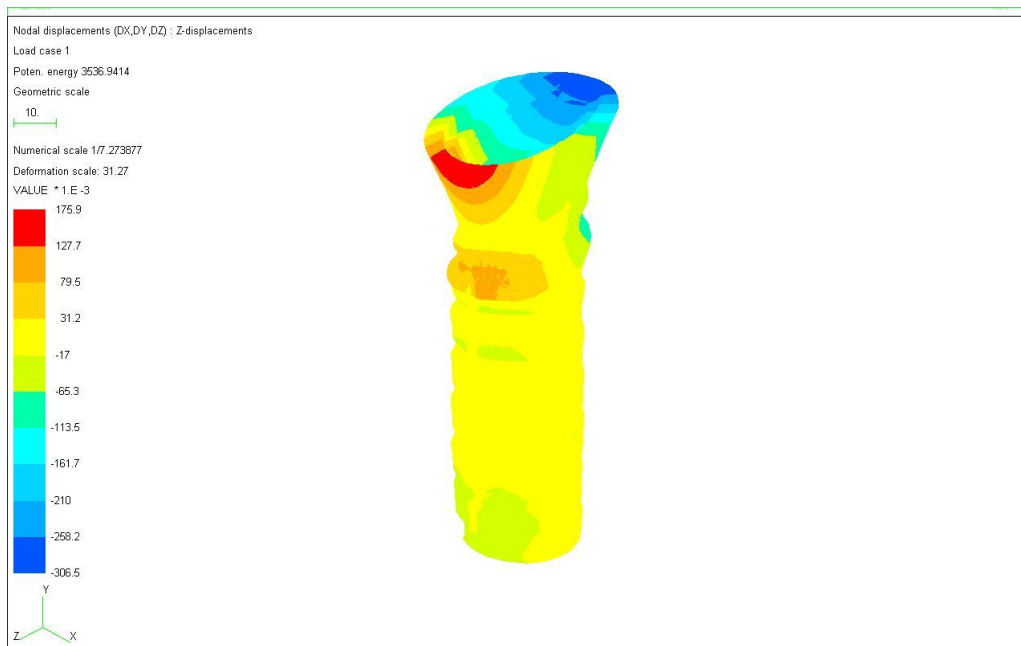
Obr. 38 Celková deformace



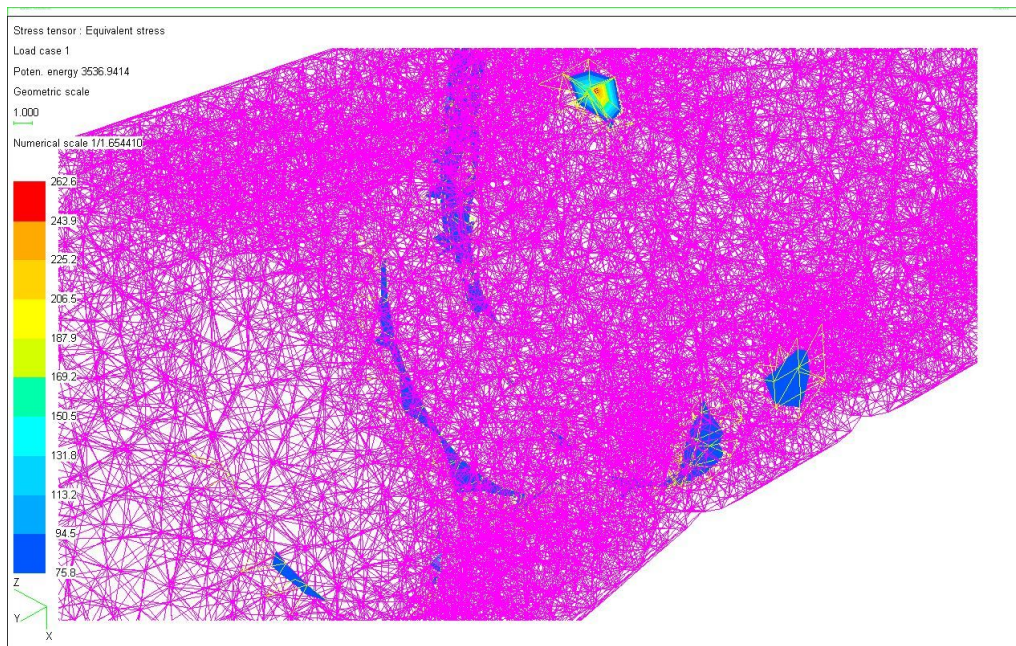
Obr. 39 Deformace v ose X



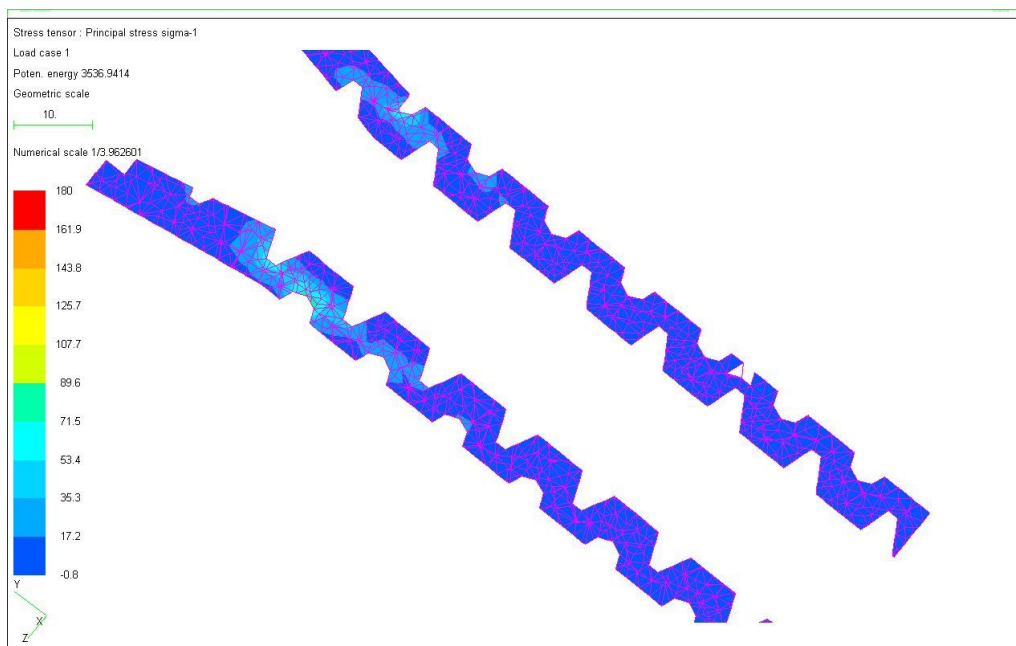
Obr. 40 Deformace v ose Y



Obr. 41 Deformace v ose Z

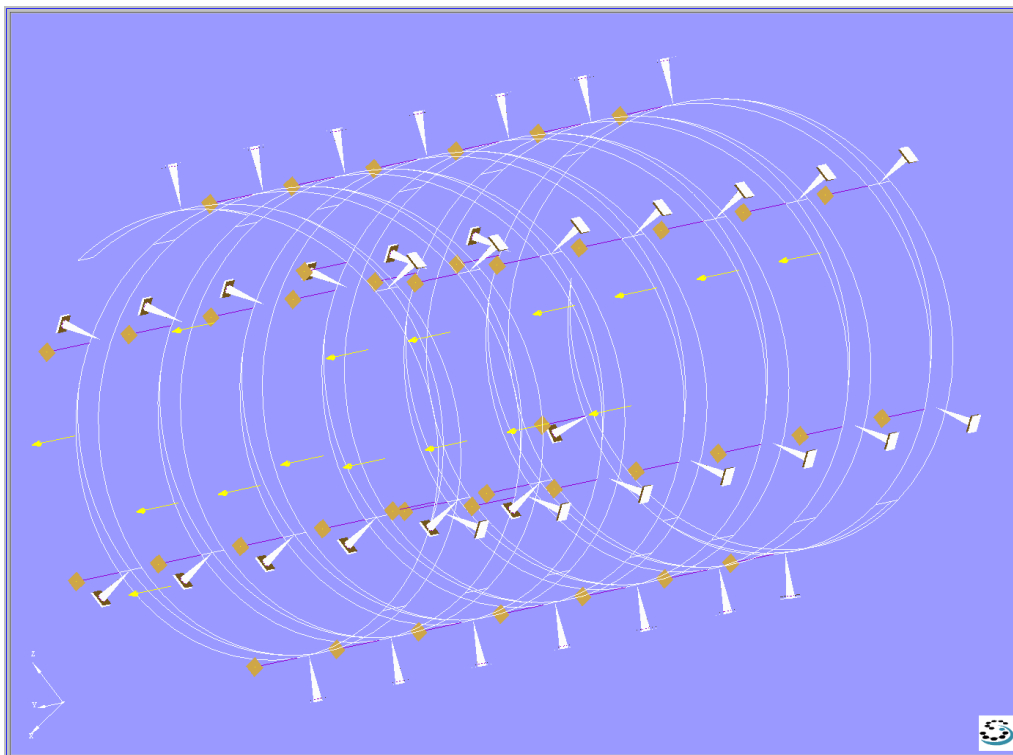


Obr. 42 Špičky HMH napětí

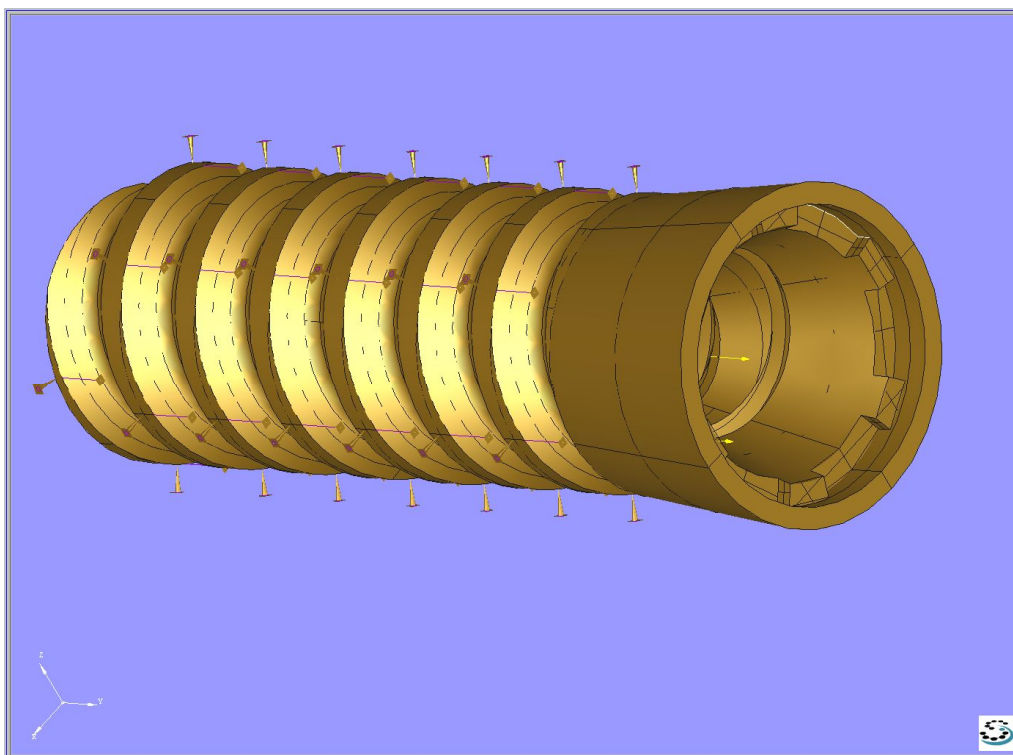


Obr. 43 HMH napětí v řezu

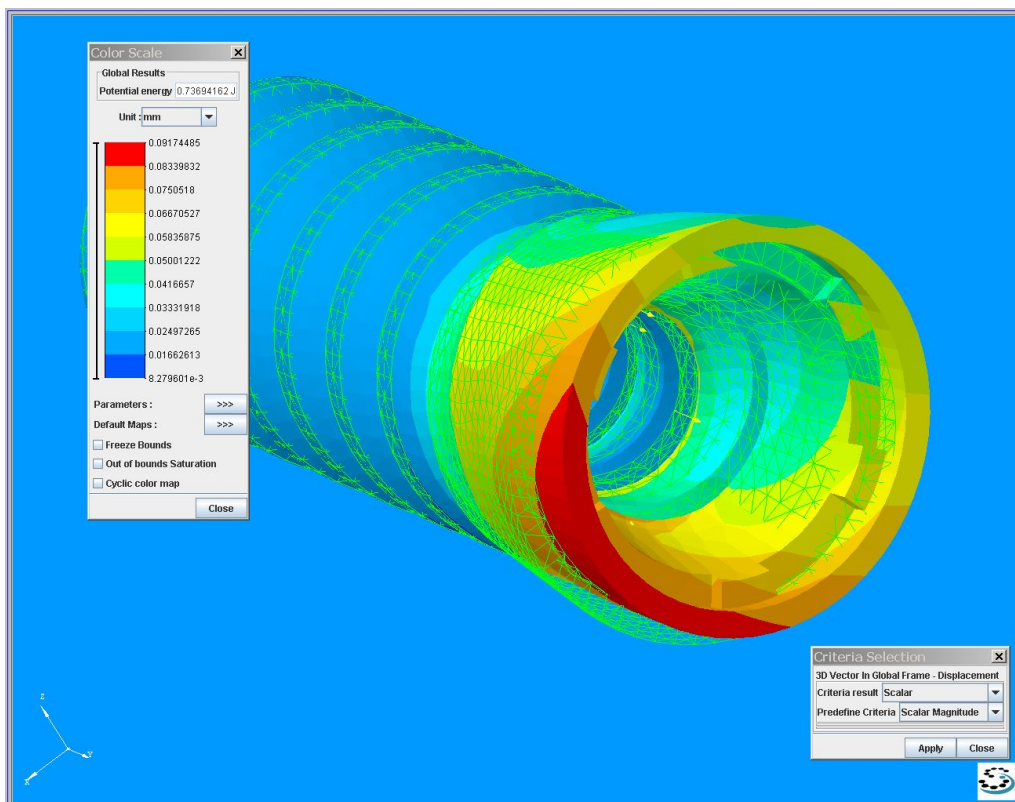
8.2.3 Vložka typu VT-1 materiál Nitren, izotropie



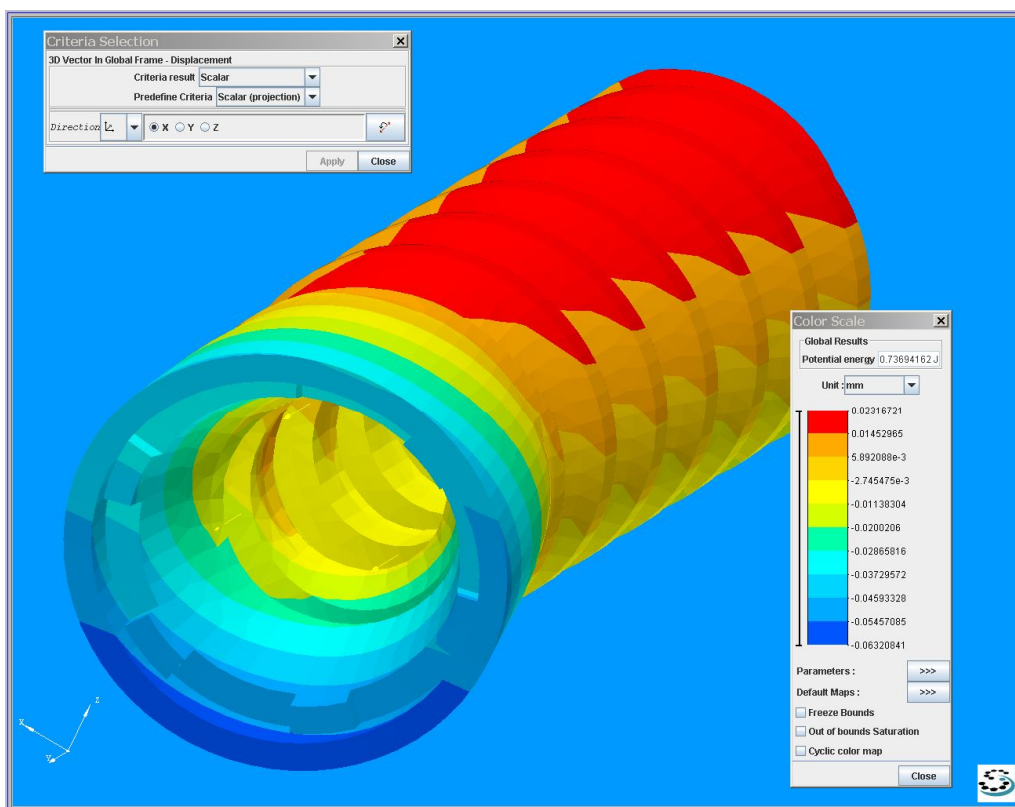
Obr. 44 Zatížení a okrajové podmínky transparentní pohled



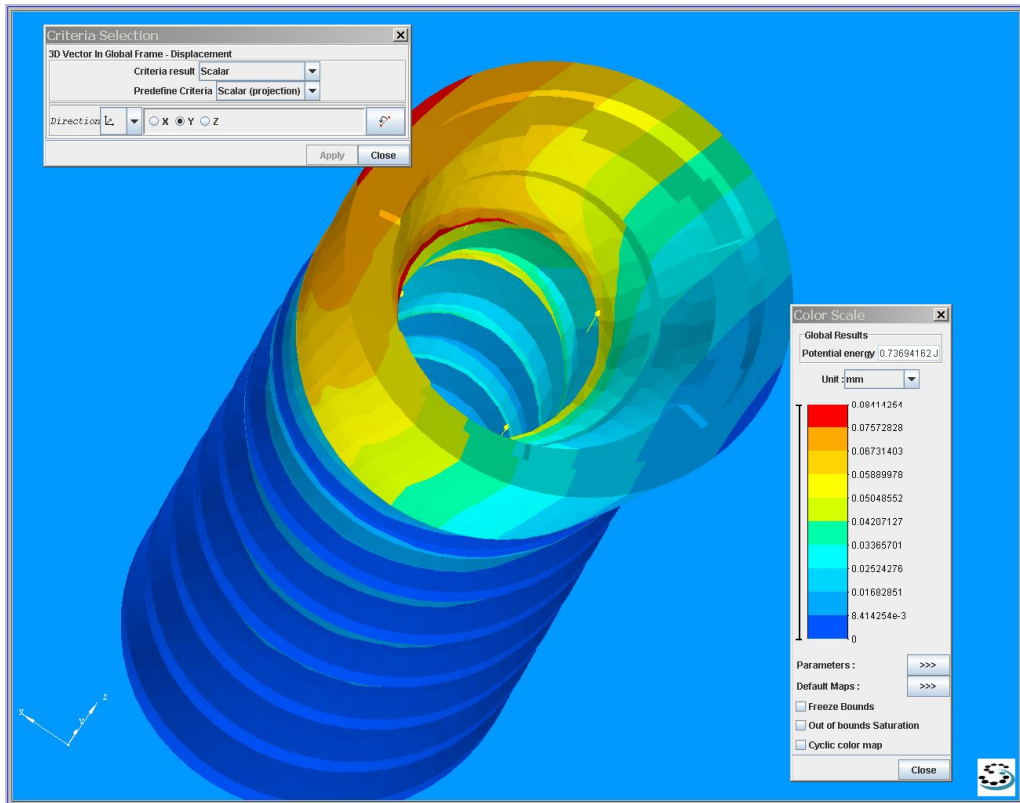
Obr. 45 Zatížení a okrajové podmínky



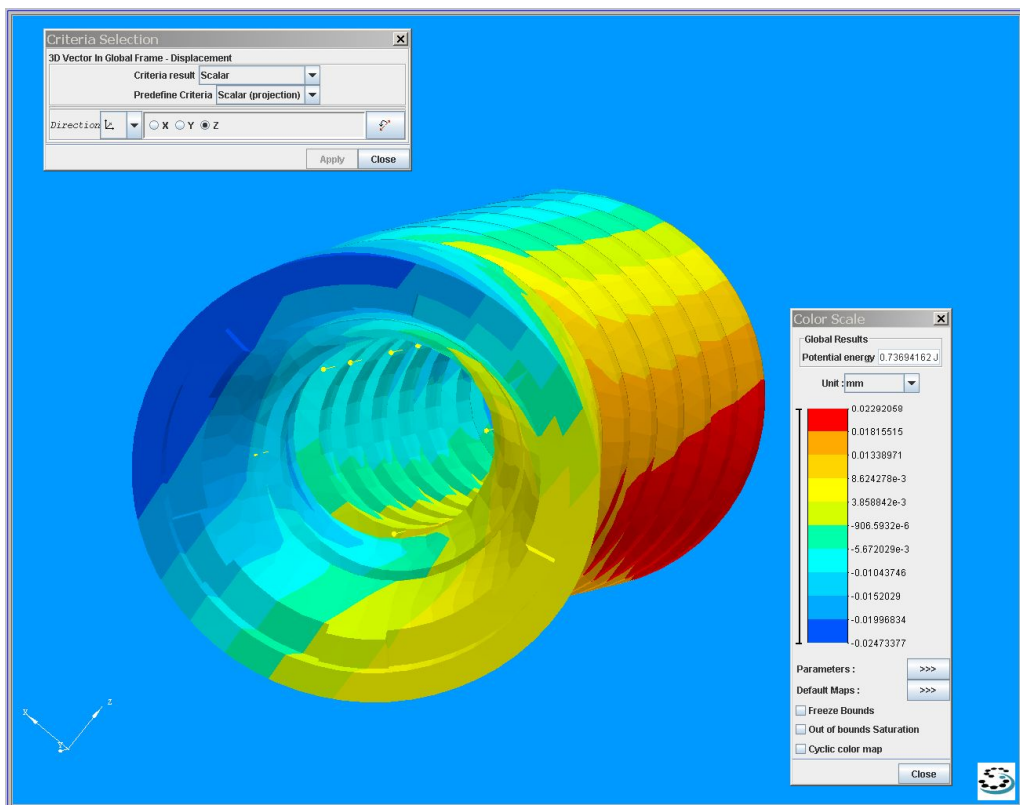
Obr. 46 Celková deformace



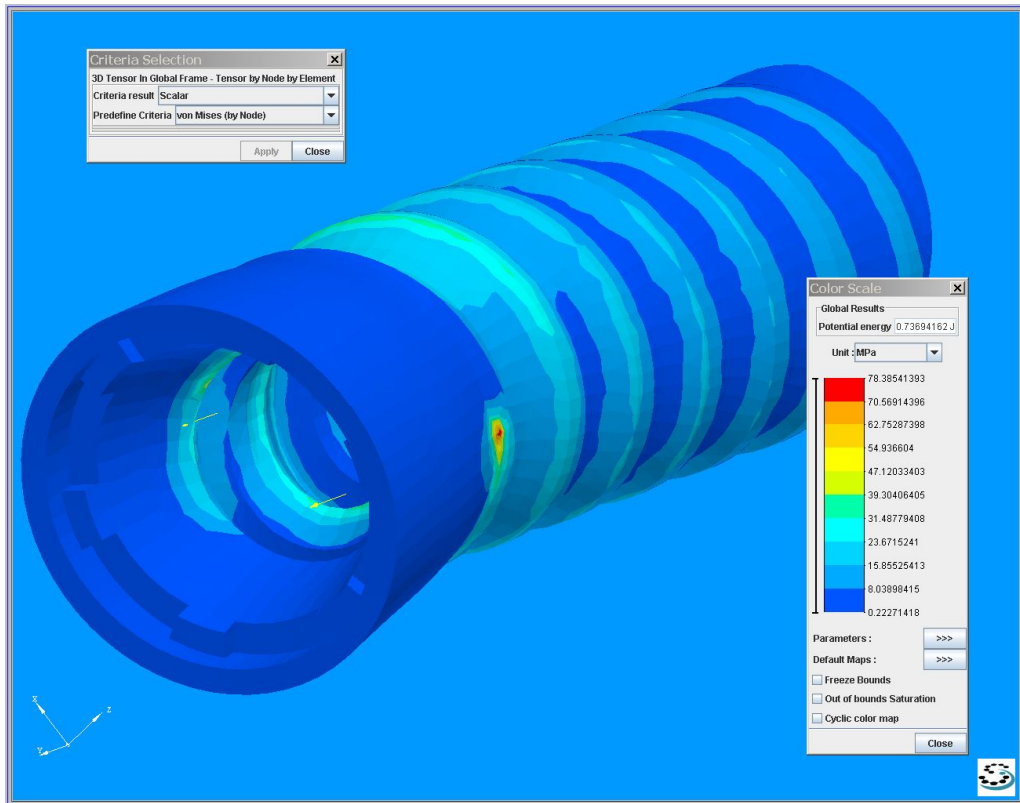
Obr. 47 Deformace v ose X



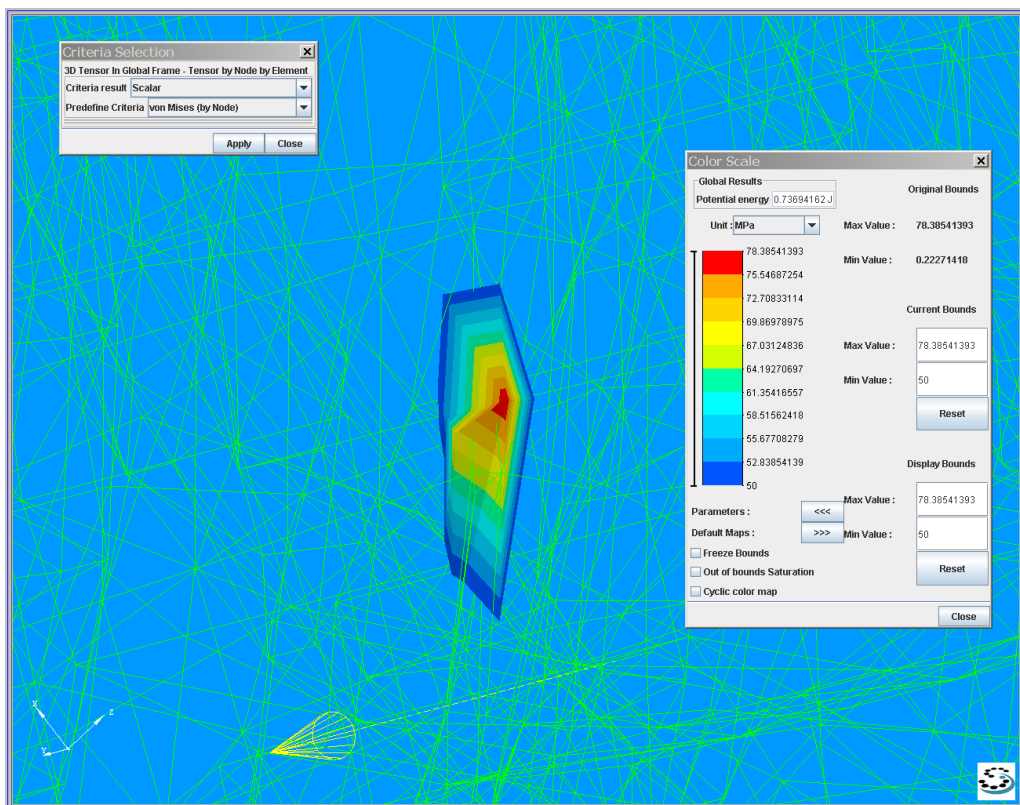
Obr. 48 Deformace v ose Y



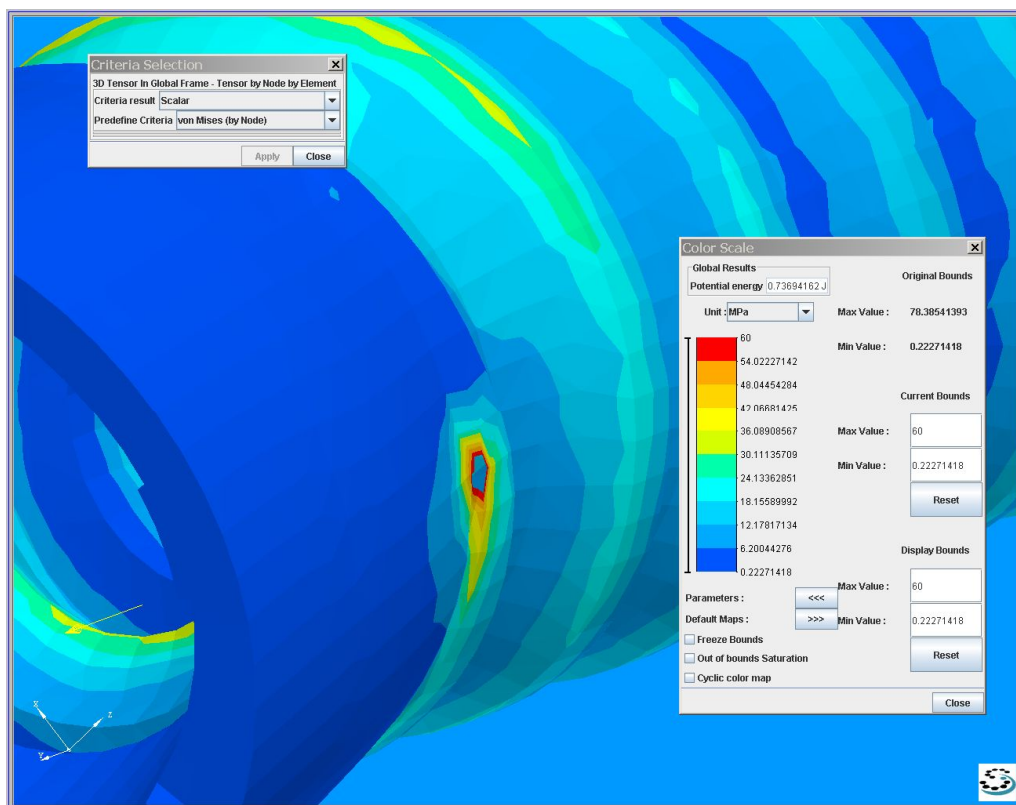
Obr. 49 Deformace v ose Z



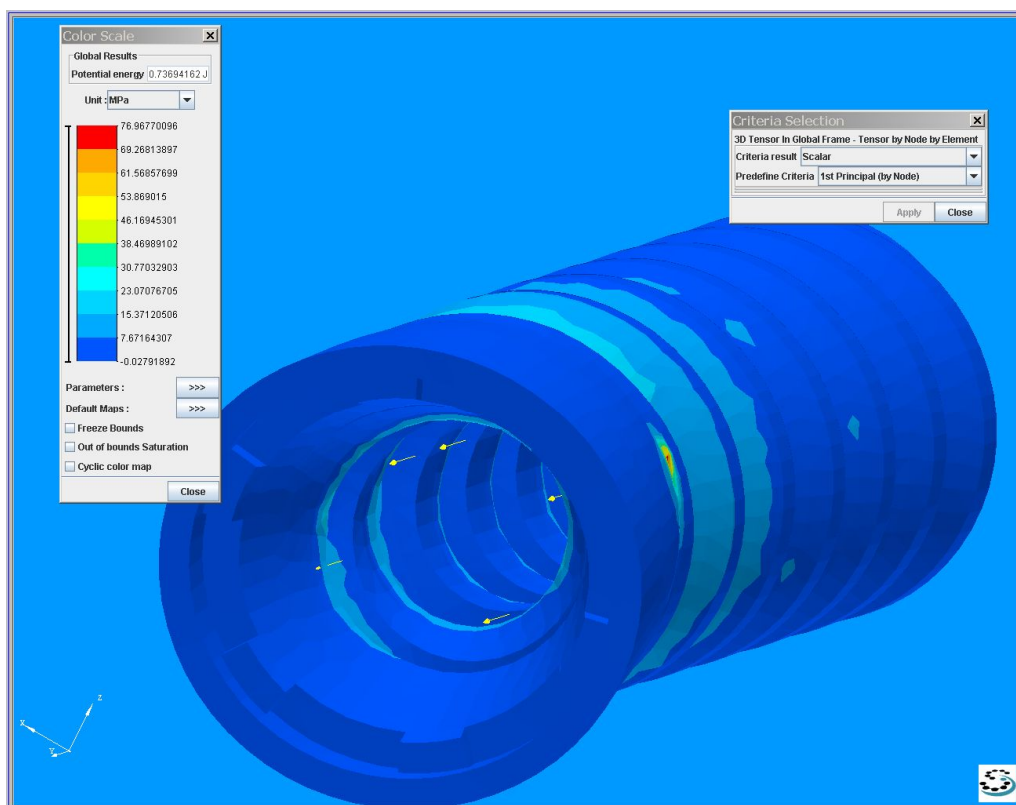
Obr. 50 HMH napětí



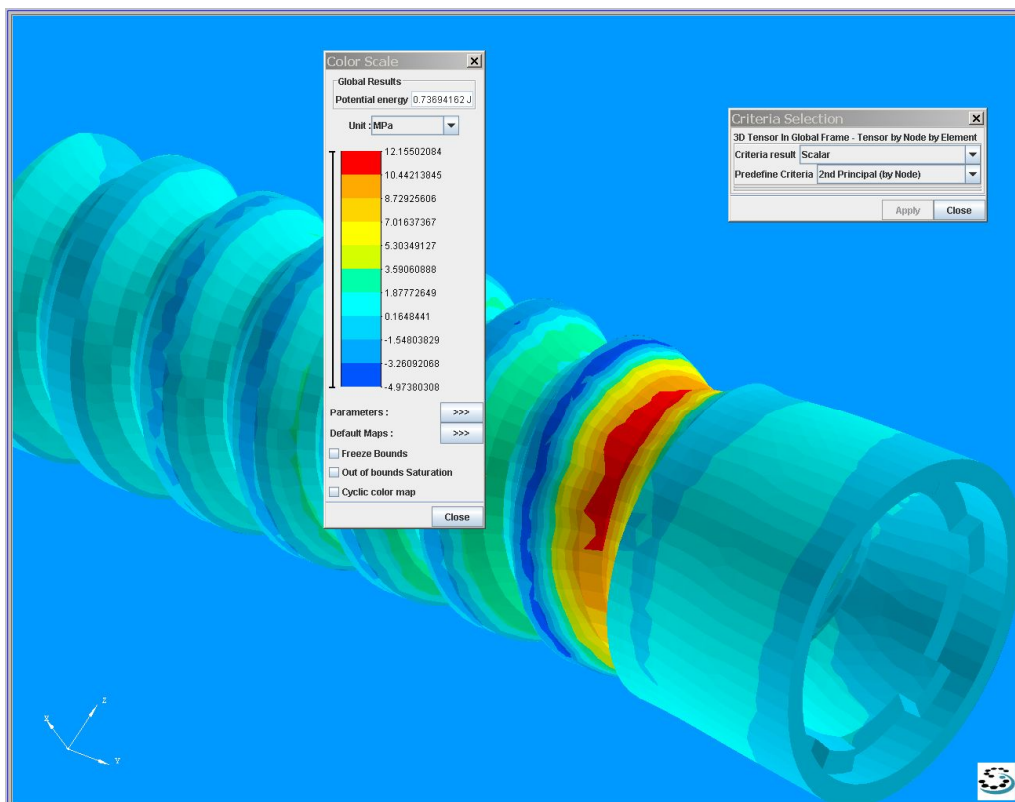
Obr. 51 Špičky HMH napětí



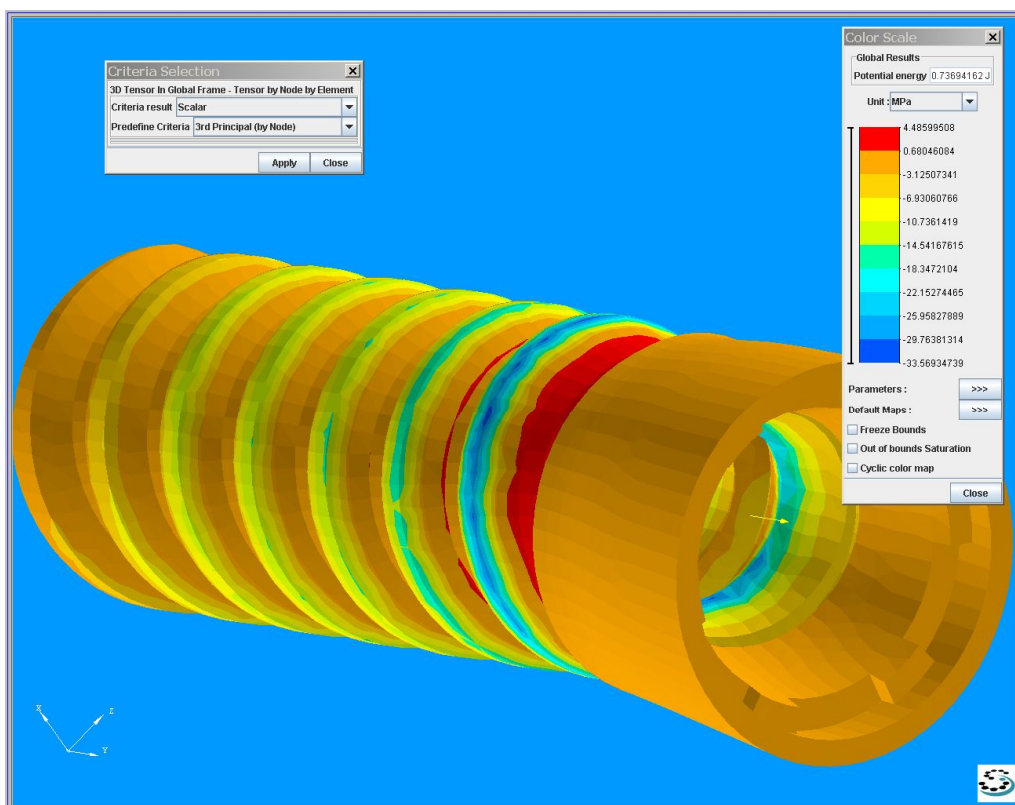
Obr. 52 HMH napětí bez napěťové špičky



Obr. 53 Hlavní napětí P1

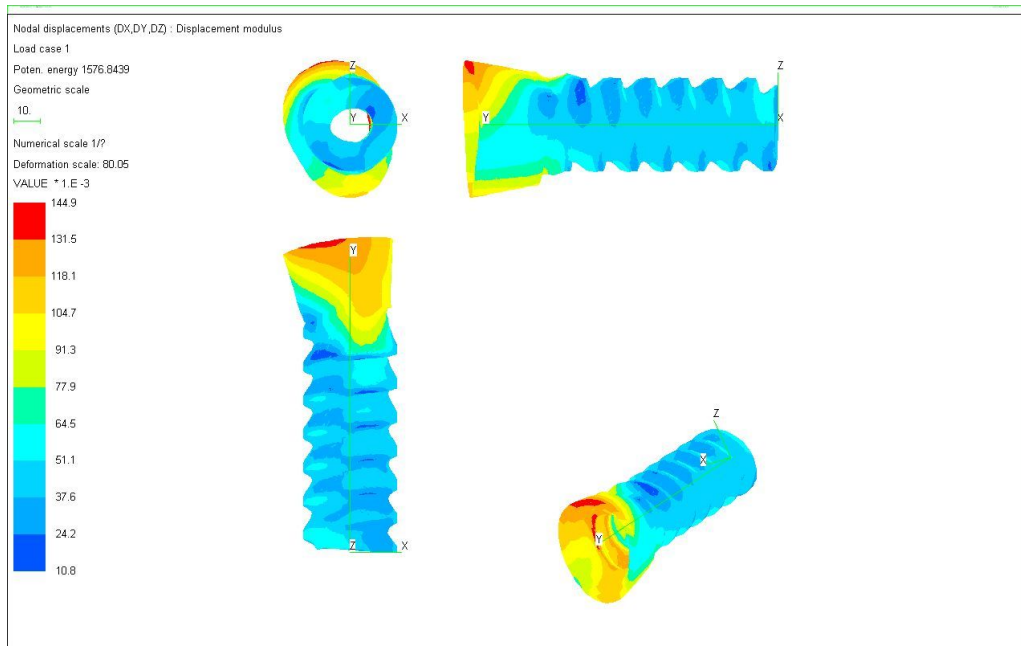


Obr. 54 Hlavní napětí P2

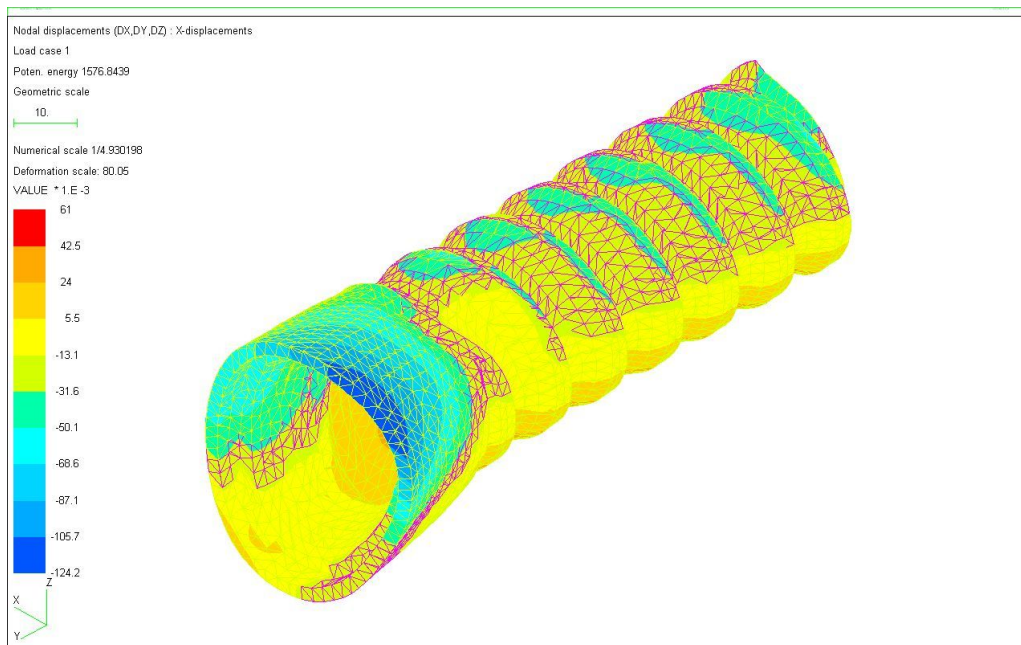


Obr. 55 Hlavní napětí P3

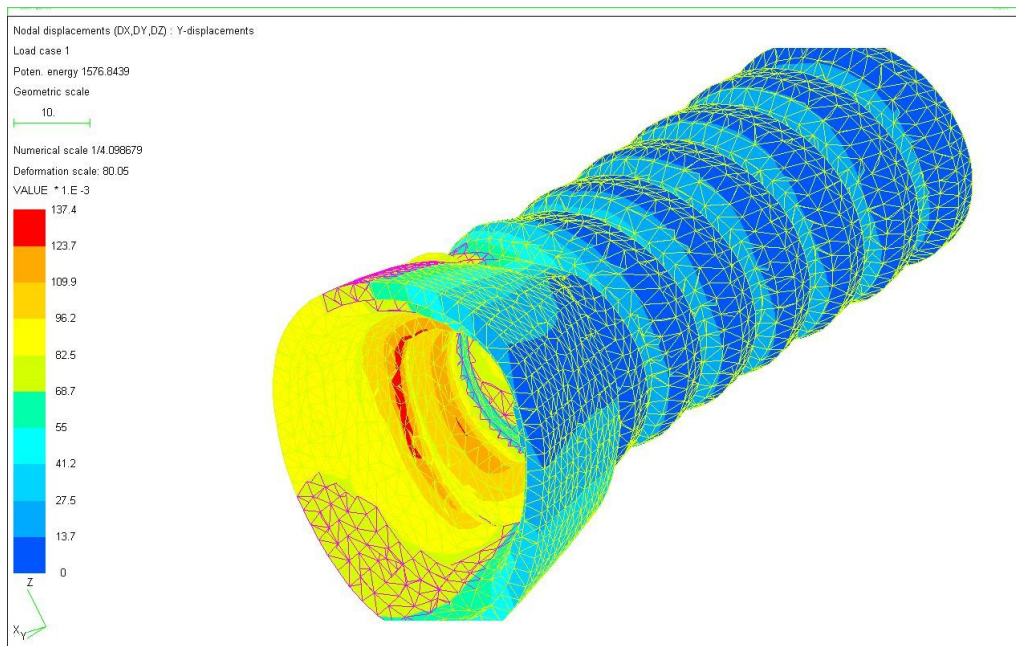
8.2.4 Vložka typu VT-1 materiál Nitren, ortotropie



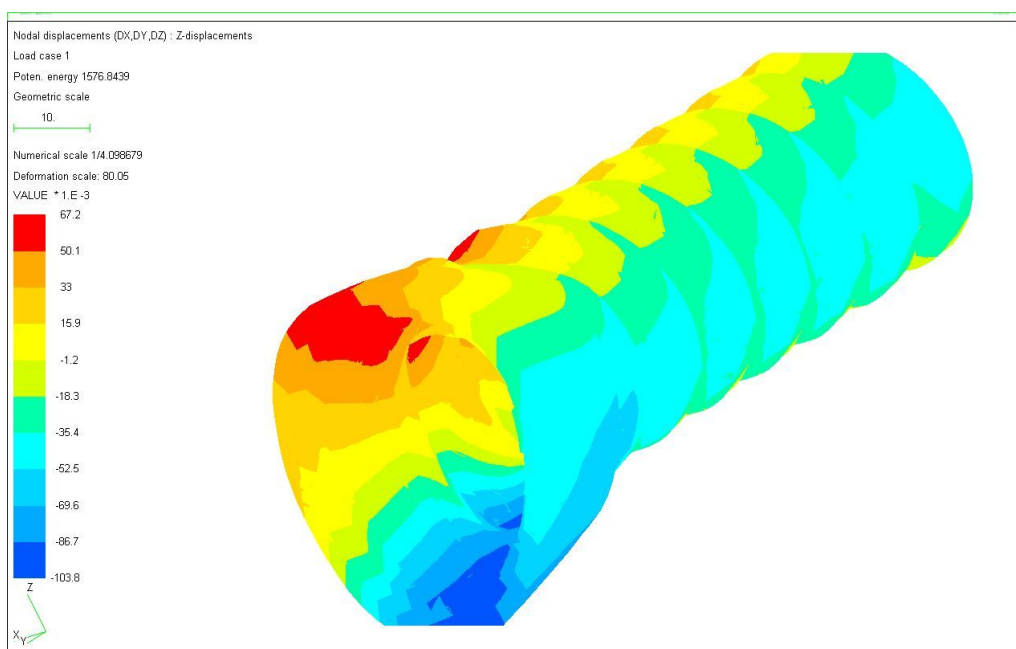
Obr. 56 Celková deformace



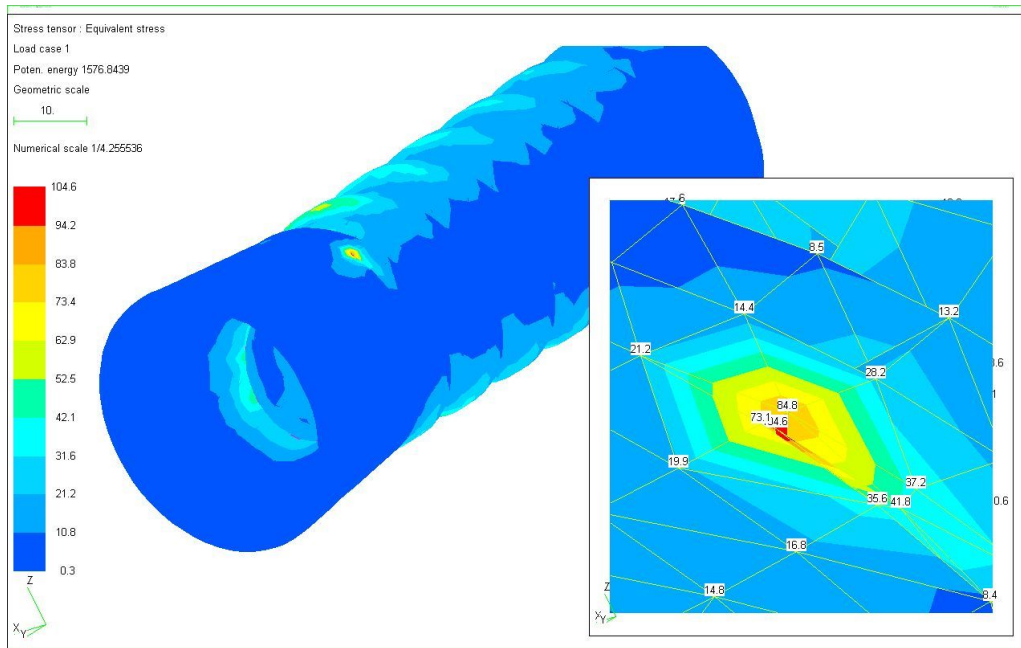
Obr. 57 Deformace v ose X



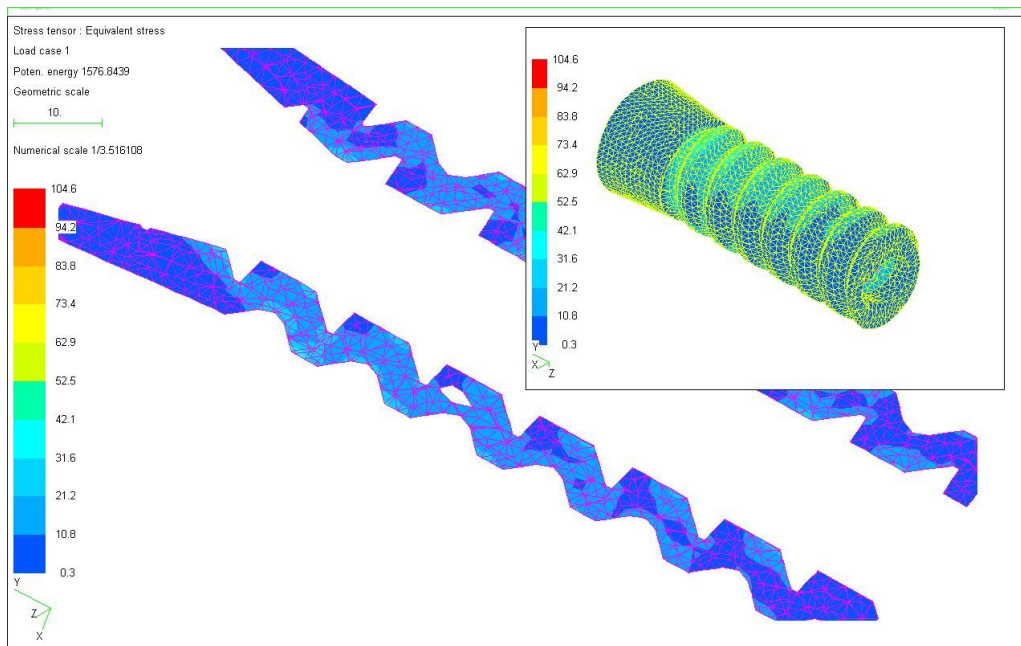
Obr. 58 Deformace v ose Y



Obr. 59 Deformace v ose Z



Obr. 60 HMH napětí špičky



Obr. 61 HMH napětí v řezu

ZÁVĚR

Byly provedeny analýzy dvou geometrických a materiálových typů vložek do betonových pražců jak z hlediska materiálové mikrostruktury, tak i z mechanického makrostrukturního hlediska.

Materiálové analýzy prokázaly předepsaný typ materiálu a to pro staré vložky používané u ČD materiál Silamid (Polyamid 6) a pro nové vložky typu VT-1 materiál Nitren (Polyethylen).

Oba materiály se na základě DTG analýzy ukázaly jako plněné, s největší pravděpodobností skelným vláknem. Tento materiál nelze z námi provedených materiálových analýz s jistotou určit, protože plnivo má vyšší teplotu tání, než byl námi měřený rozsah.

U materiálu Silamid (PA6) to bylo 29% hmotnostního obsahu, u materiálu Nitren jsme naměřili hodnotu 12%, přičemž předpokládaný a výrobcem stanovený obsah je 30%. Tento rozdíl mohl být způsoben jen malou velikostí vzorku, která byla cca 10mg a nerovnoměrným rozmístěním skelného vlákna v celém objemu hmoždinky.

Polyethylen se pro dané použití hodí více a to nejen z ekonomického hlediska, kdy je průměrně téměř o 50% levnějším materiálem, než Polyamid 6. Polyethylen celkově také lépe snáší působení okolních vlivů, je lyofobní a jeho nasákavost je maximálně do 0,5% objemu, kdežto u PA6 je to až 5% při vystavení 100% vlhkosti což může mít za následek jeho měknutí a korozi. PE je také imunní na působení vnějších vlivů a to různých rozpouštědel, těkavých látek, kyselin, olejů a jiných agresivních látek. PA6 je náchylný na vliv kyselého prostředí, kdy může docházet k leptání jeho povrchu a to může být způsobeno i interakcí materiálů použitých pro beton anebo i interakcí oxidujícího materiálu vrtule, která je do vložky zašroubována, tudíž nemá dlouhodobou výdrž jako PE.

Polyethylen také lépe odolává tlakům, které jsou na něj vyvíjeny a jako semikrystalická až krystalická látka nemá tendenci téci jako PA6.

U polyamidu za působení napětí, zvýšené teplotě a vlhkosti může docházet v krajním případě i k depolymeraci a zhoršení jeho mechanických vlastností.

Polyethylen se jeví jako mnohem lepší volba materiálu a to s ohledem na všechny aspekty. V dřívějších dobách, nebyla úroveň zpracování PE na tak vysoké úrovni a PE nevykazoval ani zdaleka tak dobré vlastnosti jako v současnosti. Také jeho velký pokles ceny má za následek jeho rozmáhání. Volbu původního materiálu PA6 můžeme zhodnotit jako zastara-

lou a v době, kdy byla učiněna to byla volba z běžně dostupných materiálů s vyhovujícími vlastnostmi.

Výpočty rozložení tenzoru deformace a napětí byly provedeny na modelech vložek pomocí MKP. Byly vytvořeny CAD modely pro oba dva typy hmoždinek (původní ČD a nový typ VT-1). MKP modely vložek uvažovaly stejný typ zatížení a stejné okrajové podmínky pro oba typy vložek. Výpočty pro určení mechanického chování obou vložek byly pro srovnání provedeny jak pro izotropní materiál, tak pro ortotropní. Bylo uvažováno zatížení vložek liniíovou silou 50N/mm po vnitřní hraně šroubovice ve směru osy Y. Okrajové podmínky byly stanoveny jako zamezení pohybu hmoždinky v ose Y a vnější válcové plochy ve směru normály. Z vypočtených výsledků je patrný rozdíl ve velikostech deformací a napětí pro izotropní a ortotropní materiál vložek. Rovněž geometrie nového typu vložky VT-1 vykazuje nižší hodnoty pro deformace i napětí oproti starému typu, zvláště v oblastech velkých diskontinuit tvaru. Pro simulaci chování vložek v reálných podmínkách by bylo nutné uvažovat mnohem složitější a komplikovanější model interaktivní struktury s vlivem kontaktů. Takové komplikované řešení přesahuje rámec diplomové práce i získané poznatky během studia a představuje vysoký stupeň interdisciplinárních znalostí z mnoha dalších oblastí.

Z pohledu materiálové i z pohledu mechaniky se ukazuje, že nový typ vložky VT-1 je jako spojovací prvek výhodnější pro použití v konstrukci bezpodkladnicového upevnění a to i z ekonomického hlediska.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Úvod do železnice* [online]. 2006 [cit. 2008-06-15]. Dostupný z WWW: <http://dc.fd.cvut.cz/material/ZELEZNICE_PREDNASKA.doc>.
- [2] *Železniční koridory ČR : Technologie* [online]. 2004 [cit. 2008-06-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.k-report.net/koridory/ktechnol.html#uvod>>.
- [3] UTINEK, P, ŠEVČÍK, Filip. *Rekonstrukce stavebních celků a recyklace odpadních materiálů vznikajících při železničních stavbách* [online]. 2003 [cit. 2008-06-15]. Dostupný z WWW: <http://envi.upce.cz/pisprace/prezenci/2C_SP_04.PDF>.
- [4] ČIHÁK, Jan, et al. *Ekologie v oblasti železniční dopravní cesty* [online]. 1998 [cit. 2008-06-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/606.pdf>>.
- [5] *Definice, rozdělení a historie kompozitních materiálů* [online]. 2002 [cit. 2008-06-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>>.
- [6] MAREŠ, Tomáš, VÝVODA, Luděk. *Kompozity* [online]. 2006 [cit. 2008-06-15]. Dostupný z WWW: <<http://student.fsid.cvut.cz/~vyvoda/D1.pdf>>.
- [7] Jančář, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*, VUT, Brno, 2003.
- [8] Agarwal, B.D., Broutman, L.J. *Vláknové kompozity*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1987.
- [9] *Metoda konečných prvků* [online]. 2001 [cit. 2008-06-15]. Dostupný z WWW: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf>.
- [10] BOUČNÍK, Pavel. *Matematické modely* [online]. 2003 [cit. 2008-06-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.boucnik.cz/kap6.pdf>>.
- [11] *Metoda konečných prvků* [online]. 1999 [cit. 2008-06-15]. Dostupný z WWW: <<http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/?q=node/32>>.
- [12] Plášek, O., Zvěřina, P. : *Závěrečná zpráva – Statická analýza napjatosti v okolí hmoždinky od předpětí betonu*. VUT Brno 1999.
- [13] Kolář, V., Němec, I., Kanický, V. *Principy a praxe metody konečných prvků*, Praha, 1997.
- [14] Bittnar, Z., Šejnoha, J. *Numerické metody mechaniky 1*, ČVUT, Praha, 1992.
- [15] Bittnar, Z., Šejnoha, J. *Numerické metody mechaniky 2*, ČVUT, Praha, 1992

- [16] Matthews, F.L., Davies, G.A.O., Hitchings, D., Soutis, C. *Finite element modeling of composite materials and structures*, CRC Press, England, 2000, ISBN 0-8493-0846-1
- [17] Segerlind, L.J., *Applied Finite Element Analysis*, John Willey, New York, 1984.
- [18] *Infračervená spektroskopie* [online]. 2005 [cit. 2008-06-15]. Dostupný z WWW: <<http://lms.vscht.cz/Zverze/Infrared.htm>>.
- [19] KOUT, Jan. *Spolehlivost, životnost a exploatační vlastnosti materiálů* [online]. 2005 [cit.2008-06-15].Dostupný z WWW:<<http://www.cd rail.cz /VTS/CLANKY/906.pdf>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ν_f		Poissonův poměr
ν_m		Poissonův poměr matrice
V_f		objemový podíl vláken
V_m		objemový podíl matrice
E	[Pa]	modul pružnosti v tahu
l_c	[mm]	kritická délka vlákna
l_t	[mm]	přenosová délka zatížení
$(\sigma_f)_{\max}$	[N]	maximální napětí vlákna
σ_{pf}	[N]	pevnost vlákna
Π^e	[J]	energetický funkcionál pro element
$\{d\}^T$	[m]	vektor složek uzlových posuvů
$\{P\}$	[N]	vektor soustředěných vnějších sil
Λ^e	[J]	deformační energie elementu
W_o^e	[J]	práce vykonaná objemovými silami
W_p^e	[J]	práce vykonaná rozloženým plošným zatížením
$[B]$		matice diferenciálních operátorů
$[D]$		matice tuhostních součinitelů
$\{e_T\}$		vektor přetvoření od teploty
Π	[J]	celková potenciální energie
$[K]$		matice tuhosti
$[f]$	[N]	vektor výsledných vnějších sil v uzlech
F	[N]	zatěžující síla
p	[Pa]	tlak

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Struktura železničního koridoru (2).....	11
Obr. 2 Bezšroubová svorka Pandrol FastClip (2).....	13
Obr. 3 Svorka Vossloh typ Skl 12 (2)	13
Obr. 4 Bezpodkladnicová svorka Skl 14 (2).....	13
Obr. 5 Rozdělení kompozitních materiálů dle geometrie a orientace výztuže (5)	19
Obr. 6 Popis vláknového kompozitu	21
Obr. 7 Orientace vláken v krátkovlákném kompozitu	22
Obr. 8 Rozdíl mezi nanokompozitem a mikrokompozitem (5).....	23
Obr. 9 Rovnováha na elementu diskontinuitního vlákna uloženého rovnoběžně se směrem zatížení (8).	24
Obr. 10 Idealizovaná křivka smykového napětí – smyková deformace pro matrici (8).....	25
Obr. 11 Průběhy napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní pro různé délky vlákna (8).....	26
Obr. 12 Ilustrační schéma DTA komory.....	31
Obr. 13 Vzorek umístěný do zkušební pánvičky.....	32
Obr. 14 Ukázka grafu DTA a TGA (DTG).....	33
Obr. 15 Záznam grafu termogravimetrie	34
Obr. 16 Sestava závitu vrtule R1, R2 a vnitřního závitu hmoždinky ČD (12).....	37
Obr. 17 Sestava závitu vrtule Ss25 DB a hmoždinky VT-1 (12)	38
Obr. 18 Měřené vzorky	38
Obr. 19 Schimadzu DTG-60.....	39
Obr. 20 DTA/DTG pro bílý vzorek.....	40
Obr. 21 DTA/DTG pro modrý vzorek	41
Obr. 22 DTA/DTG pro světle žlutý vzorek	42
Obr. 23 Vyrobené vzorky pro FTIR.....	43
Obr. 24 Srovnání naměřených hodnot jednotlivých vzorků.....	44
Obr. 25 Srovnání modrého vzorku s materiálem PA6	45
Obr. 26 Srovnání bílého vzorku s materiálem PA6.....	45
Obr. 27 Srovnání světle žlutého vzorku s materiálem PA6.....	46
Obr. 28: Zatížení a okrajové podmínky	51
Obr. 29 Zatížení a okrajové podmínky transparentní pohled	51
Obr. 30 Celková deformace	52

Obr. 31 Deformace v ose X	52
Obr. 32 Deformace v ose Y	53
Obr. 33 Deformace v ose Z.....	53
Obr. 34 HMH napětí.....	54
Obr. 35 HMH napětí bez špiček	54
Obr. 36 Špičky HMH napětí	55
Obr. 37 Hlavní napětí	55
Obr. 38 Celková deformace	56
Obr. 39 Deformace v ose X	56
Obr. 40 Deformace v ose Y	57
Obr. 41 Deformace v ose Z.....	57
Obr. 42 Špičky HMH napětí	58
Obr. 43 HMH napětí v řezu	58
Obr. 44 Zatížení a okrajové podmínky transparentní pohled	59
Obr. 45 Zatížení a okrajové podmínky.....	59
Obr. 46 Celková deformace	60
Obr. 47 Deformace v ose X	60
Obr. 48 Deformace v ose Y	61
Obr. 49 Deformace v ose Z.....	61
Obr. 50 HMH napětí.....	62
Obr. 51 Špičky HMH napětí	62
Obr. 52 HMH napětí bez napěťové špičky	63
Obr. 53 Hlavní napětí P1.....	63
Obr. 54 Hlavní napětí P2.....	64
Obr. 55 Hlavní napětí P3.....	64
Obr. 56 Celková deformace	65
Obr. 57 Deformace v ose X	65
Obr. 58 Deformace v ose Y	66
Obr. 59 Deformace v ose Z.....	66
Obr. 60 HMH napětí špičky	67
Obr. 61 HMH napětí v řezu	67

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Některé vlastnosti používaných termoplastových matric (7).....	20
Tab. 2 Typické vlastnosti vláken (7).....	22
Tab. 3 Hmotnosti vzorků pro DTA/DTG.....	39
Tab. 4 Rozměry plochy vzorků pro FTIR.....	43
Tab. 5 Materiálové charakteristiky použité pro výpočet.....	50