

Analýza mechanických vlastností kanálové vpusti

Bc. Radek Kučera

Diplomová práce
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek KUČERA**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Analýza mechanických vlastností kanálové vpusti**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše
2. Stanovení metod hodnocení soudržnosti pryže s kovem
3. Provedení experimentů
4. FEM analýza daného prvku
5. Vyhodnocení výsledků

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jakub Javořík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

20. února 2009

Termín odevzdání diplomové práce:

20. května 2009

Ve Zlíně dne 16. února 2009



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá studií metod pojení pryže s kovem. Literární studie je zaměřena na teorii hyperelasticity, technologie spojování pomocí pojiv a metody zkoušení hyperelastických materiálů.

Cílem práce je zhodnocení kvality spojovacích prostředků používaných při výrobě pryžokovových výrobků z recyklované pryže a analýza mechanických vlastností pryžokovové kanálové vpusti, pomocí FEA.

Klíčová slova:

kanálová vpust, pojivo, hyperelasticita, kompozit, recyklovaná pryž

ABSTRACT

This work deals with a study of methods bonding rubber with metal. A literary study is focused on theory of hyperelasticity, bonding technology using adhesives and the methods of testing hyperelastic materials.

The aim of this work is evaluation quality of bond mediums used for producing rubber-bonded metal products made from recycled rubber and the mechanical analysis of rubber-bonded metal road gulley, by applying the finite elements analysis.

Keywords:

road gulley, adhesive, hyperelasticity, composite, recycled rubber

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D. za důležité rady, připomínky a čas strávený při mé diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Zdeňku Dvořákovi, CSc. za poskytnuté praktické rady. V neposlední řadě bych chtěl též poděkovat panu Ing. Jaromíru Šmatlovi ze společnosti AB Elpo s r. o. za ochotnou spolupráci.

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

Ve Zlíně, 19.5.2009

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I. STUDIJNÍ A TEORETICKÁ ČÁST	10
1 Gumárenské směsi	11
1.1 KAUČUKY	11
1.1.1 Přírodní kaučuk	11
1.1.2 Syntetické kaučuky	12
1.1.3 Kaučuky pro všeobecné použití	13
1.1.4 Olejovzdorné kaučuky	14
1.1.5 Teplovzdorné kaučuky	15
1.2 PLASTIKAČNÍ ČINIDLA	15
1.3 VULKANIZAČNÍ ČINIDLA	15
1.4 AKTIVÁTORY VULKANIZACE	17
1.5 URYCHLOVAČE VULKANIZACE	17
1.6 ANTIDEGRADANTY	18
1.6.1 Antioxidanty	18
1.6.2 Antiozonanty	19
1.7 PLNIVA	20
1.8 ZMĚKČOVADLA	21
1.9 POMOCNÉ ZPRACOVATELSKÉ PROSTŘEDKY	21
2 Hyperelasticita	23
3 Napět'ově-deformační chování elastomerů	26
3.1 JEDNOOSÁ NAPJATOST	26
3.2 DVOUOSÁ NAPJATOST	27
3.3 ČISTÝ SMYK	27
4 Přehled hyperelastických modelů	29
4.1 POLYNOMICKÁ FUNKCE	29
4.2 NEO-HOOKEAN	29
4.3 MOONEY-RIVLIN MODEL	29
4.4 YEOH	31
4.5 ARRUDA-BOYCE	31
4.6 GENT	32
4.7 OGDEN	33
5 Pryžkovové výrobky	35

5.1	POŽADAVKY NA SPOJ PRYŽ – KOV	35
5.2	TYPY SPOJŮ	35
5.2.1	Typy spojů	35
5.2.2	Dělení spojů dle typu vazby	37
5.2.3	Dělení spojů dle technologie vzniku vazby	37
5.2.4	Struktura vulkanizačního spoje	38
6	Zálisky	39
6.1	TECHNOLOGIE SPOJOVÁNÍ	39
6.1.1	Mechanické spojování	39
6.1.2	Spojování lepením	40
6.1.3	Spojování vulkanizací	40
6.1.4	Spojování z vulkanizovaných elastomerů	40
6.2	POVRCHOVÉ ÚPRAVY ZÁLISKŮ	42
6.3	SPOJOVACÍ PROSTŘEDKY	43
6.3.1	Tvrdá pryž	43
6.3.2	Latex-Albuminová pojiva	43
6.3.3	Termoprenová pojiva	44
6.3.4	Pomosazení	44
6.3.5	Spojování samospojivých vulkanizátů s kovy	44
6.3.6	Halogenové deriváty kaučuku	44
6.3.7	Izokyanátová pojiva	45
7	Zkoušení hyperelastických materiálů	48
7.1	JEDNOOSÝ TAH	48
7.2	DVOUOSÝ TAH	50
7.3	ČISTÝ SMYK	52
8	Zkoušení soudržnosti pryže s kovem.....	53
8.1	ZKOUŠKA ODLUPU	53
8.2	DVOJITÝ SMYKOVÝ TEST	54
II.	PRAKTICKÁ ČÁST	56
1	Zadání.....	57
2	Měření soudržnosti pojiv	57
2.1	POUŽITÁ POJIVA	57
2.2	TAHOVÁ METODA	57
2.2.1	Podstata zkoušky	58
2.2.2	Zkušební vzorky	59

2.2.3	Zkušební zařízení	60
2.2.4	Výsledky měření tahové zkoušky	61
2.2.5	Dodatečná měření.....	67
2.2.6	Vliv velikosti plochy spoje na soudržnost.....	73
2.3	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	76
2.3.1	Ověření srovnávacích hypotéz	76
2.4	TĚLÁKOVÁ METODA.....	81
2.4.1	Podstata zkoušky	81
2.4.2	Zkušební vzorky.....	81
2.4.3	Zkušební zařízení	82
2.4.4	Výsledky měření tlakové zkoušky	84
2.5	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	90
3	Numerická analýza kanálové vpusti.....	91
3.1	ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍHO PRYŽOVÉHO MATERIÁLU	92
3.1.1	Zkoušení materiálu pro jednoosou napjatost.....	92
3.1.2	Výsledky měření	95
3.2	TVORBA 3D MODELU KANÁLOVÉ VPUSTI.....	97
3.2.1	Specifikace mechanických vlastností materiálů.....	98
3.2.2	Tvorba sítě.....	99
3.2.3	Okrajové podmínky	102
3.3	VÝSLEDKY NUMERICKÉ ANALÝZY	106
3.3.1	Kanálová vpust v litinovém rámu pod účinkem kolmého spojitého zatížení	106
3.3.2	Kanálová vpust v litinovém rámu pod účinkem šikmého spojitého zatížení	108
3.3.3	Kanálová vpust v pryžokovovém rámu zatížená kolmým spojitým zatížením	111
3.3.4	Kanálová vpust v pryžokovovém rámu zatížená šikmým spojitým zatížením	113
3.4	HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	116
	ZÁVĚR	117
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	118
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	120
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	123
	SEZNAM TABULEK	127
	SEZNAM PŘÍLOH	129

ÚVOD

Elastomery se řadí do speciální třídy polymerů, rozdělující se na přírodní a syntetické pryže. Dříve termín pryž označoval materiál získaný ve formě latexu ze stromů *Hevea Brasiliensis*. Dnes se jako pryže označují veškeré materiály s obdobnými mechanickými vlastnostmi, jako u přírodní pryže. Tyto materiály se pak obecně označují jako elastomery.

Elastomery se široce uplatňují v inženýrství jakožto nárazové a dopadové absorbéry a izolátory vibrací, dále při výrobě pneumatik, či výrobků nepropouštějící olej a vodu. Rostoucí využití pryží ve strojírenství klade velký důraz na přesnost analýz, jež předpovídají chování komplexního systému obsahující pryžové komponenty. Pro tyto komplexní charakteristiky je velmi důležité především stanovení mechanických vlastností pryžových materiálů.

Jelikož se elastomerní materiály vlastnostmi výrazně odlišují od kovů a jiných materiálů, vyžadují rovněž použití speciálních postupů zkoušení mechanických vlastností a vyhodnocení vztahů pro tahové a tlakové zatížení, pro které nelze aplikovat Hookův zákon z důvodu jejich výrazné nelinearity. Aby bylo možné aproximovat chování těchto materiálů při působení určitého napětí a při určitých deformacích, byla vytvořena řada materiálových modelů založených na deformačním energetickém potenciálu, které jsou pro vyhodnocování charakteristických vlastností elastomerů nezbytně nutné.

Vzhledem ke svým fyzikálně mechanickým vlastnostem potřebuje pryž v mnoha aplikacích podporu, nebo vyztužení různými druhy materiálů od polymerních vláken až po kovy.

Možnost spojování pryží s kovy byla objevena již záhy po objevení vulkanizace kaučuku, avšak nebyla průmyslově využita. Teprve od 40. let 20. století byly vypracovány a průmyslově aplikovány pojící systémy, jež umožnily rozvoj technologie výroby pryžokovových výrobků. Pryžokovové výrobky našly uplatnění především v průmyslu automobilovém, leteckém, železničním, chemickém při zpracování ropy a v některých dalších oblastech vědy a techniky.

Pro zaručení optimálních vlastností budoucích výrobků po celou dobu jejich životnosti je nezbytné zajistit vhodnou úroveň soudržnosti spojovaných materiálů.

S rozvojem nových materiálů a technologií rostou i požadavky na kvalitu, odolnost a funkčnost pryžokovových a pryžoplastových výrobků a s tím související spojení kovového nebo plastového dílu s pryží.

I. STUDIJNÍ A TEORETICKÁ ČÁST

1 Gumárenské směsi

Kaučuková směs obsahuje zpravidla tyto složky:

1. kaučuk – přírodní, syntetický nebo jejich směs, popř. doplněný regenerátem
2. plastikační činidla,
3. vulkanizační činidlo – nejčastěji síru,
4. aktivátor a retardér vulkanizace,
5. urychlovač (nebo směs urychlovačů) vulkanizace,
6. ochranné látky proti stárnutí a únavě (antioxidanty, antiozonanty, světelné stabilizátory),
7. plniva – neaktivní a aktivní,
8. změkčovadla.

Dále může kaučuková směs obsahovat

9. pigmenty
10. zvláštní přísady

[12]

1.1 Kaučuky

1.1.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk je obsažen v některých rostlinách v podobě latexu. Pro těžbu kaučuku má hospodářský význam prakticky jen strom *Hevea brasiliensis* z čeledi Euphorbiaceae (pryžovitě) pěstovaný na plantážích. [11]

Latex je uložen ve zvláštních buňkách, jež jsou umístěny ve spodní vrstvě kůry stromu po celém jeho povrchu včetně kořenů a větví. Získává se tzv. čepováním¹. [11]

¹ Pod šikmý zářez v kůře stromu (zasahující největší počet šikmo uložených buněk) se umístí nádobka, do níž odtéká latex vytlačovaný vnitřním tlakem.

Složení přírodního latexu není zcela stálé. Průměrný obsah kaučukového uhlovodíku činí přibližně 35 %. Voda představuje 60 %, zbytek připadá na bílkoviny (více než 2 %), pryskyřice (1,5 % až 2 %), popel (kolem 0,7 %) a cukry (asi 0,3 %). [11]

Během několika hodin stání přírodní latex samovolně koaguluje. Aby se předešlo tomuto jevu, čerstvý latex se konzervuje obvykle pomocí NH_3 . [11]

Přímé zpracování latexu má mnoho výhod. Kvalita produktů, zejména mechanické vlastnosti a odolnost vůči stárnutí, je značně vyšší než u zboží vyrobených z roztoků. Mnohé manipulace a zpracovatelské postupy jsou levnější a poskytují větší možnost využití kontinuálních procesů. [11]

Suchý kaučuk lze z latexu získat vysrážením, vymražením nebo odpařením vody. Na plantážích se vyrábí kaučuk téměř výhradně srážením kyselinou mravenčí nebo octovou. Srážené bloky se pak perou vodou a dále zpracovávají na celou řadu druhů přírodního kaučuku, z nichž klasickými jsou *uzený kaučuk* (Ribben smoked sheet RSS) a *světlá krepa* (pale crepe). Stále většího významu nabývá *standardní kaučuk*, jež vyrábějí např. Malajsie (Standard Malaysian Rubber – SMR), Indonésie (Standard Indonesian Rubber SIR), Thajsko (Standard Thai Rubber – STR), Vietnam (Standard Vietnam Rubber – SVR), nebo Jižní Korea (SPR). Počet výrobců se ovšem stále rozrůstá. [11]

1.1.2 Syntetické kaučuky

Velký počet různých druhů průmyslově vyráběných kaučuků si vynutil jejich klasifikaci. Jejich většinou poměrně dlouhé názvy zase vedly k častému používání zkratk. Mezinárodní zkratky vycházejí z třídění kaučuků do 8 základních skupin podle chemické struktury (Tab. 1). Tato klasifikace ovšem nemá přímou souvislost s hlavními oblastmi použití kaučuků, podle nichž je můžeme rozdělit na kaučuky pro všeobecné použití a kaučuky speciální a ty zase na olejovzdorné a teplovzdorné. Základní typy nejběžněji používaných kaučuků, jejich mezinárodně používané zkratky a relativní spotřebu uvádí Tab. 2. [11]

Tab. 1 Mezinárodní klasifikace kaučuků do základních skupin [11]

Označení skupiny	Chemická struktura makromolekulárního řetězce
M	nasycený uhlovodíkový řetězec
R	nenasycený uhlovodíkový řetězec
N	řetězec obsahující atomy dusíku
O	řetězec obsahující atomy kyslíku
Q	řetězec obsahující siloxanové vazby (-Si-O)
T	řetězec obsahující atomy síry
U	řetězec obsahující současně atomy dusíku i kyslíku
Z	řetězec obsahující současně atomy fosforu a dusíku

1.1.3 Kaučuky pro všeobecné použití

Uvedené označení má tato skupina kaučuků proto, že se z nich dá vyrábět většina běžných pryžových výrobků, od různých dílů technické pryže přes spotřební zboží až po pneumatiky, hadice a dopravní pásy. Hlavními představiteli jsou polymery a kopolymery izoprénu a butadienu. Nejběžnějším plnivem pro ně jsou saze. Obsahují v hlavních řetězcích svých makromolekul dvojně vazby, jsou tudíž nenasyčené. K jejich vulkanizaci se používá převážně síra. V důsledku své nenasyčenosti na druhé straně vyžadují ochranu proti degradaci, tj. přísadu antidegradantů. [11]

Výjimku tvoří kaučuky ethylenpropylenové, jež mají nasycený hlavní makromolekulární řetězec. *Kopolymery ethylenu s propylenem* (EPM) neobsahují dvojně vazby vůbec, *terpolymery ethylenu, propylenu a nekonjugovaného dienu* (EPDM), výhradně v bočních řetězcích. Proto jsou výborně odolné vůči stárnutí a nevyžadují nutně přídavek antidegradantů. [11]

Pro některé aplikace se používá vulkanizačních systémů, jež propůjčují pryži zvětšenou odolnost vůči zvýšeným teplotám. Jedná se především o vulkanizace pryskyřicemi (především pro butylkaučuk) a vulkanizace dialkylperoxydy (především pro EPM, omezeně i EPDM). [11]

Tab. 2 Zkratky a relativní spotřeba běžně používaných kaučuků [11]

Zkratka	Název	Spotřeba [%]	Určení
NR	přírodní kaučuk	32	pro všeobecné použití
IR	izoprenový kaučuk	3	
SBR	butadienstryrenový kaučuk	37	
BR	butadienový kaučuk	10	
EPM	ethylenpropylenový kaučuk	7	
EPDM			
IIR	butylkaučuk	3	
CR	chloroprenový kaučuk	3	olejovzdorné
NBR	butadienakrylonitrilový kaučuk	3	
ACM	akrylátový kaučuk	0,5	
OT	polysulfidový kaučuk	0,1	
MQ	silikonový kaučuk	0,1	teplavzdorné
FPM	fluorouhlíkový kaučuk	0,1	

Kaučuky pro všeobecné použití se rozpouštějí v alifatických a aromatických uhlovodících (např. benzínu, benzenu, toluenu) a chlorovaných rozpouštědlech (např. trichlorethylenu nebo tetrachlormethanu). Vulkanizáty v těchto rozpouštědlech botnají. [11]

Pryže pro všeobecné použití značně botnají i v olejích. Proto výrobky z těchto kaučuků nesmějí s oleji a uvedenými rozpouštědly přicházet do styku. Oleje jsou však pro směsi z kaučuků pro všeobecné použití dobrými změkčovadly. [11]

Mezi nejběžněji používané kaučuky pro všeobecné použití patří kromě přírodního, jehož spotřeba činí spolu s izoprenovým kaučukem více než třetinu celkové světové spotřeby kaučuku, především *butadienstryrenový*, kterého se spotřebuje více než další třetina celkové spotřeby, *butadienový*, *ethylenpropylenový* a *butylkaučuk* (Tab. 2). [11]

1.1.4 Olejovzdorné kaučuky

Tyto kaučuky se od kaučuků pro všeobecné použití liší především svou polaritou. V jejich odolnosti vůči olejům jsou však velké rozdíly. Čím polárnější olej, tím polárnější musí být kaučuk, z něhož vyrobená pryž má oleji odolávat. [11]

Pro nepolární oleje se často používá chloroprenový kaučuk, s výhodou velké odolnosti vůči povětrnostnímu stárnutí. Pro polárnější prostředí se používají butadienakrylonitrilové kaučuky a dražší typy, počínaje akrylátovými, přes chlorsulfonovaný polyethylen a konče kaučuky fluorovodíkovými, jež odolávají prakticky všem mazivům a tekutým palivům. Dokonce i zředěným kyselinám oxidační povahy, což se ovšem promítá ve výši ceny. Jeli-kož vynikají odolností vůči dlouhodobému působení vysokých teplot, bývají považovány především za reprezentanty kaučuků teplovzdorných. Největší odolnost vůči olejům vyka-zují pryže z polysulfidových kaučuků. Nejsou však teplovzdorné. [11]

1.1.5 Teplovzdorné kaučuky

Hlavními představiteli teplovzdorných kaučuků vedle flurouhlíkových jsou kaučuky sili-konové, označované též jako mrazuvzdorné. Jejich speciální typy jsou použitelné k výrobě pryží sloužících v teplotním rozmezí od $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž vlastnosti pryží se s teplotou mění jen velmi málo. Neodolávají však vlhkému prostředí, neboť podléhají hyd-rolýze. [11]

1.2 Plastikační činidla

Plastikační činidla jsou přísady usnadňující první zpracování kaučuku, tzv. plastikaci. Plas-tikační činidla zvětšují účinnost a rychlost plastikace, protože usnadňují štěpení makromo-lekul kaučuku, způsobené hnětením, stabilizací přechodně vzniklých radikálů. Proto se používají při zpracování odpadní pryže na tzv. regenerát. [11]

Nejrozšířenějšími plastikačními činidly jsou v současné době peptazin BAFD a peptazin BFT. [11]

Plastikační činidla se dávkuje pro plastikaci přírodního a izoprenového kaučuku v množství $0,05\text{ dsk}^2$ až $0,2\text{ dsk}$, pro plastikaci nitrilkaučuku a regeneraci odpadní pryže v koncentraci vyšší, od 1 dsk do 4 dsk . [11]

1.3 Vulkanizační činidla

Obecně patří mezi vulkanizační činidla všechny látky, které jsou schopny vytvářet reakcí mezi řetězci kaučukovitého uhlovodíku příčné vazby. Přestože s nástupem nových synte-

² dsk (dílů na sto kaučuku) – hmotnostní díly přísady na 100 hmotnostních dílů kaučuku.

tických kaučuků se objevila i nová vulkanizační činidla, zůstala nadále nepoužívanější elementární síra. [11]

Pro gumárenské účely se používá hlavně přírodní mletá **síra** krystalická, jejíž molekuly jsou tvořeny osmičlennými kruhy S_8 nebo v menší míře polymerní modifikace, tzv. síra nerozpustná. [11]

Síra slouží jako vulkanizační činidlo pro řadu nenasycených kaučuků, jako je kaučuk přírodní, butadienstyrenový, butadienakrylonitrilový, butadienový, butylkaučuk a některé další syntetické kaučuky. Pro měkkou pryž se dává v množství 0,5 dsk až 4 dsk, pro přírodní kaučuk nejčastěji od 2 dsk do 2,5 dsk, pro butadienstyrenové a butadienakrylonitrilové kaučuky většinou 1,5 dsk až 2 dsk. Pro tvrdou pryž se ke kaučuku přidává 35 dsk až 50 dsk síry. [11]

Jako doplňující vulkanizační činidlo se současně se sírou někdy používá též **selen** (Se) nebo **telur** (Te) v množství 0,5 dsk ke zlepšení odolnosti pryže vůči zvýšeným teplotám. [11]

Jako vulkanizační činidla se též používají **donory síry**. Jedná se o organické disulfidy a polysulfidy. Dávkují se v koncentraci 3 dsk až 4 dsk. [11]

Pro některé kaučuky se jako vulkanizační činidla používají **reaktoplastické pryskyřice**, např. fenolformaldehydové k vulkanizaci butylkaučukových směsí určených pro výrobu teplovzdorné pryže, nebo **epoxidové pryskyřice**, hlavně k vulkanizaci kapalných kaučuků a k vulkanizaci fluorokaučukových směsí určených na výrobky, jež mají vykazovat malou deformaci za zvýšených teplot. [11]

Rovněž i **peroxydy** jsou schopny síťovat kaučuky, nasycené i nenasycené. Používají se předně k vulkanizaci nasycených kaučuků, jež není možno vulkanizovat sírou. [11]

K vulkanizaci fluorovodíkových kaučuků se rozšířilo používání **diaminů**. [11]

Oxidy kovů jsou nejběžnější pro vulkanizaci chloroprenového kaučuku, a to většinou v kombinaci 5 dsk ZnO a 4 dsk MgO. Oxidy olova (PbO , PbO_2 a Pb_3O_4) zlepšují odolnost pryže vůči vodě. Hlavní použití nachází především při vulkanizaci polysulfidového kaučuku. [11]

1.4 Aktivátory vulkanizace

Jedná se o přísady, jež aktivují síťovací reakci, tj. zmenšují její aktivační energii. Projevuje se to nižší závislostí rychlosti síťování na teplotě. Druhou význačnou vlastností aktivátorů síťování je jejich podpora vzniku příčných vazeb (zahuštění sítě). [11]

Nejběžnějším aktivátorem vulkanizace sírou je **oxid zinečnatý** ZnO (zinková běloba), jež má největší účinek u přírodního a izoprenového kaučuku. U běžných směsí se dosahuje maximálního účinku přidávkem asi 3 dsk ZnO. [11]

Pro speciální potřeby (např. teplovzdornou pryž z butadienakrylonitrilového kaučuku) se používal **oxid kademnatý** CdO. Dnes se od něj ustupuje pro jeho zdravotní závadnost. [11]

Dobrym aktivátorem vulkanizace sírou je rovněž **oxid olovnatý** PbO, jež je však jedovatý a drahý. [11]

Oxidy jako aktivátory vulkanizace vyžadují přítomnost dostatečného množství **mastných kyselin**, jež je převádějí na formu kapalnou. [11]

1.5 Urychlovače vulkanizace

Urychlovače sírné vulkanizace podstatně zkracují vulkanizační doby (z hodin na minuty). Kupříkladu nepřilíš tlustostěnné výrobky lze produkovat i průběžnou vulkanizací (např. hadice, profilová těsnění apod.). Zároveň urychlovače umožňují snížit vulkanizační teplotu, čímž se nejen uspoří energie, ale také chrání jiné přísady přítomné v kaučukových směsích, jako jsou organické pigmenty nebo materiál s kaučukem kombinovaný, např. textilní výztuže. [11]

Za pomoci tzv. **ultraurychlovačů** lze k vulkanizaci použít např. teplé vody nebo vulkanizace proběhne odležením při běžné teplotě. Takovým kaučukovým směsím často říkáme samovulkanizující. Ultraurychlovače rovněž umožnily přímé zpracování latexu. [11]

Na trhu se vyskytuje přes 100 druhů urychlovačů, lišících se často od sebe jen obchodními názvy, čistotou, formou apod.. [11]

Urychlovače je možno klasifikovat různým způsobem, např. podle chemického složení (guanidiny, thiazoly, thiuramdisulfidy, dithiokarbamáty, xanthanáty), nebo podle jejich vlivu na vlastnosti pryže. Nicméně nejvhodnějším je rozdělení podle urychlovacího účinku (Tab. 3). [11]

Obecně platí pravidlo, že s rostoucí rychlostí urychlovače roste i účinnost. Je proto umožněno použít nižší dávkování síry a nižší teplotu vulkanizace. [11]

Tab. 3 Rozdělení urychlovačů sírné vulkanizace [11]

Skupina urychlovačů	Optimální koncentrace síry [dsk]	Optimální teplota vulkanizace [°C]
pomalé: <i>guanidiny</i>	3 až 4	145 až 155
rychlé: <i>thiazoly, sulfenamidy</i>	1,5 až 3	135 až 150
velmi rychlé: <i>thiuramsulfidy</i>	1 až 2	125 až 140
ultrarychlé: <i>dithiokarbamáty, xantháty</i>	0,5 až 1,5	100 až 125

1.6 Antidegradanty

Jako antidegradanty se označuje skupina přísad, jež dlouhodobě chrání výrobky před vnějšími vlivy během jejich používání. K těmto vlivům patří především účinek atmosférického kyslíku a ozonu a tepelné energie. [11]

1.6.1 Antioxidanty

Vzdušný kyslík způsobuje degradaci kaučuku. Za běžné teploty se toto tzv. *oxidační stárnutí* projeví až po velmi dlouhé době, např. po deseti a více letech. Za zvýšené teploty se však významně urychluje a mluvíme o tzv. *tepelně-oxidačním stárnutí*. [11]

Ochrana kaučuku proti stárnutí spočívá hlavně v zabránění řetězovému průběhu oxidace, jež má zpravidla autokatalytický průběh (je katalyzována vlastními reakčními produkty). [11]

Podle chemického účinku se antioxidanty dělí do dvou skupin na:

- ***látky, které přerušují řetězovou autooxidační reakci.*** Jejich představiteli jsou např. deriváty aminů a fenolů
- ***látky, jež zabraňují vzniku řetězové reakce.*** Patří k nim např. estery kyseliny fosforité a některé organické sloučeniny obsahující síru, zejména trioly a sulfidy. [11]

Antioxidanty se při svém ochranném působení mění na produkty, které jsou buď bezbarvé nebo různě, většinou tmavě zbarvené. Podle toho se pak rozeznávají antioxidanty:

- **nebarvící**, jejichž rozkladné produkty jsou bezbarvé,
- **barvící**, jejichž barevné produkty zbarvují polymer, ale toto zbarvení nepřechází na jiné předměty, s nimiž je výrobek v přímém styku a
- **zbarvující**, jejichž barevné produkty zbarvují nejen chráněný výrobek, ale i jiné předměty, zejména z polymerů, které se s nimi dostanou do bezprostředního kontaktu. [11]

Zbarvující antioxidanty jsou neúčinnější, ale vhodné jen pro černé výrobky. Používají se především do kaučukových směsí plněných sazemí. [11]

1.6.2 Antiozonanty

Ozon napadá především pryže vyrobené z nenasycených kaučuků. Ze všech degradačních faktorů má na pryž největší účinek. I když je přítomen ve vzduchu jenom ve velmi nepatrné koncentraci, reaguje velmi snadno s dvojnými vazbami makromolekulárního řetězce kaučukové sítě. Váže se na ně za vzniku velmi křehkého ozonidu, kterým pokrývá povrch vysoce elastické pryže. Pakliže je pryž v napnutém stavu, dochází k prasknutí vrstvy ozonidu. Následně se odhalí nový povrch pryže a ten je znovu napaden ozonem. I když ozon degraduje pouze povrch pryže, poškodí ji mechanicky stále rostoucími prasklinami, jež se šíří kolmo ke směru působení napětí. Přísady, jež brání praskání pryže ozonem se nazývají antiozonanty. [11]

Jejich významnou vlastností kromě schopnosti reagovat s ozonem ochotněji než řetězce kaučukové sítě je schopnost difundovat k povrchu pryže, kde uplatňují svůj ochranný účinek. Analogicky antioxydantům je lze dělit z hlediska barevného účinku zplodin jejich reakce s ozonem na **zbarvující** (nejúčinnější), **barvící** a **nebarvící**. [11]

Vůči ozonu lze pryž chránit také přísadou vosků nebo parafinů. Jelikož nejsou elastické, mohou ochraňovat pouze výrobky používané za statických podmínek (např. různá těsnění). Podobně působí fyzikálně i kombinace běžných (nenasycených) kaučuků s ozonuvzdornými.

Ozonuvzdornost kaučuků vzrůstá v řadě:

- polymery a kopolymery dienů - přírodní (NR) a izoprenový kaučuk (IR), butadienový (BR), butadienstyrenový (SBR) a butadienakrylonitrilový kaučuk (NBR),
- butylkaučuk (IIR),
- chloroprenový kaučuk (CR),
- ethylenpropylendienový kaučuk (EPDM),
- ethylenpropylenový kaučuk (EPM),
- silikonový kaučuk (MQ),
- fluorouhlíkový kaučuk (FPM),
- fluorosilikonový kaučuk (MFQ).

[11]

1.7 Plniva

Plniva jsou důležité přísady, které významně ovlivňují vlastnosti směsi a ještě více vlastnosti výrobků, jež právě lze volbou kvality a kvantity plniva upravovat v širokých mezích.

[11]

Obecně je možné říci, že plnivy lze zlepšovat mechanické vlastnosti materiálu (např. zvyšovat pevnost, odolnost vůči oděru, houževnatost, tuhost), jeho odolnost vůči teple, ohni, korozi stárnutí, ovlivňovat vzhled výrobků, ale i jejich cenu. [11]

Gumárenská plniva lze dělit podle barvy na *saze* a *světlá plniva*. Podle jejich vlivu na vlastnosti pryže pak plniva *aktivní*, *poloaktivní* a tzv. *neaktivní*. Toto dělení není přesné. Vystihuje však, že vliv různých plniv na vlastnosti pryže není stejný, ale mění se značně dle typu plniva. [11]

Hlavním druhem gumárenských plniv jsou *saze*. Saze jsou složeny z 96 % až 99 % z uhlíku, 0,1 % až 3,5 % z kyslíku a 0,3 % až 0,6 % vodíku. S rostoucím obsahem H₂ roste i jejich kyselost, jež má za následek zpomalování sírné vulkanizace. Nejběžnější surovinou pro výrobu gumárenských sazí jsou odpadní oleje a dehty z tepelného zpracování ropy a uhlí. [11]

Jednotlivé druhy sazí lze zařadit mezi aktivní nebo poloaktivní plniva. Zvyšují tuhost pryže, její pevnost, odolnost vůči oděru a botnání. S rostoucí aktivitou ale zhoršují většinou zpracovatelnost kaučukových směsí. Speciální typy tzv. vodivých sazí propůjčují pryži elektrickou vodivost, od úrovně antistatických materiálů až téměř po úroveň kovových vodičů elektrického proudu. [11]

Pro bílé a světle zbarvené gumárenské výrobky se k přípravě kaučukových směsí používají **anorganická plniva**. Velký ztužující účinek, srovnatelný s aktivními sazemi, vykazují speciální typy *oxidu křemičitého* (SiO_2). Svou značnou kyselostí zpomaluje sirnou vulkanizaci. Používá se hlavně u silikonového kaučuku. Poněkud méně aktivním plnivem na základě oxidu křemičitého je český Silicid, ještě méně aktivní je pak křemelina. Dále se v gumárenství používá **kaolin** (hydratovaný křemičitan hlinitý, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 + 2 \text{H}_2\text{O}$), **křemičitan vápenatý** (CaSiO_3) a řada dalších. Prakticky neaktivním a také nejlevnějším světlým plnivem je **mletá křída** (přírodní CaCO_3). Používá se i **mletý baryt** (BaSO_4), jež se používá především k výrobě ochranných pomůcek (rukavic, zástěr apod.) pro práci se zářením o vysoké energii (radioaktivní zářiče, rentgenové přístroje). [11]

1.8 Změkčovadla

Změkčovadla jsou málo těkavé organické látky. Používají se především k usnadnění zpracování kaučukových směsí (míchání, válcování, vytlačování atd.). Umožňují rovněž připravovat a zpracovávat kaučukové směsi s vysokým obsahem plniv. Jindy lze zlepšovat některé speciální vlastnosti pryže, jako např. přilnavost běhounů pneumatiky k vozovce. [11]

Pro nepolární a málo polární kaučuky (tj. kaučuky pro všeobecné použití) se jako změkčovadla používají olejovité produkty rafinace ropy, některých vedlejších produktů ze zpracování uhelných dehtů, případně chemického zpracování dřeva (smrkový dehet). [11]

Pro polární kaučuky (tj. především kaučuky olejovzdorné) se používají syntetická změkčovadla, nejčastěji estery dikarboxylových kyselin. [11]

1.9 Pomocné zpracovatelské prostředky

Jedná se o látky, jež zlepšují zpracovatelnost kaučukových směsí bez negativního ovlivnění užitných vlastností pryžového výrobku. Použití pomocných zpracovatelských prostředků

přináší významné technologické výhody, jež vyplívají převážně ze snížení viskozity kaučukových směsí. [11]

Podle chemického složení je možno pomocné zpracovatelské prostředky rozdělit do dvou základních skupin na:

- *mastné kyseliny a jejich deriváty* a
- *pryskyřičné produkty*.

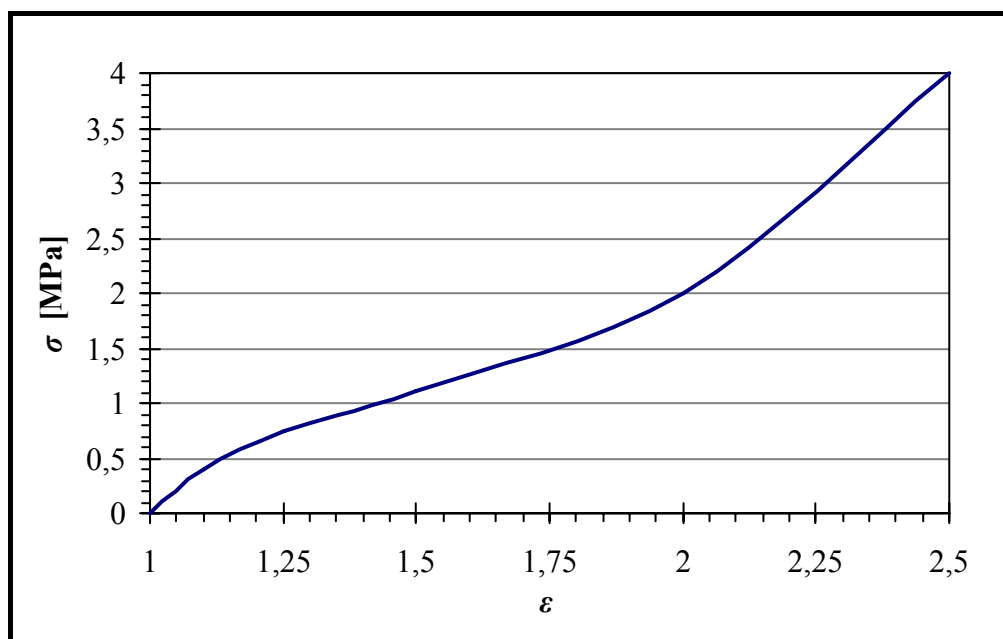
[11]

Mastné kyseliny a jejich soli se používají v gumárenství především jako aktivátory sírné vulkanizace. Až v nedávné době se začali uplatňovat i jako pomocné zpracovatelské prostředky. Jedná se o *směsi mastných kyselin, jejich esterů* nebo *zinečnatých* či *vápenatých solí*. Podle dávkování mohou zčásti nebo úplně nahradit kyselou složku aktivátoru sírné vulkanizace a současně umožňují snížení dávkování změkčovadla. [11]

Pryskyřičné produkty jsou směsi pryskyřic, jejichž složky jsou snášenlivé s různými polárními složkami kaučukové směsi. Výšemolekulární charakter pryskyřic zajišťuje vhodnou viskozitu i při teplotách míchání směsi (většinou kolem 100 °C), což je příhodné pro snazší vmíchávání plniv. [11]

2 Hyperelasticita

Elastomery se vyznačují vysokými deformacemi se silně nelineárním napět'ově-deformačním chováním (Obr. 1). Toto napět'ově-deformační chování je vhodně definováno vztahem pro výpočet hustoty deformační energie W . Dané materiály jsou často označovány jakožto hyperelastické. Hyperelastické chování elastomerů bývá popisováno matematickými modely, užívanými ve FEM komerčních kódech. Jedná se o *Polynomicnou funkci*, *Neo-Hookean*, *Mooney-Rivlin*, *Ogden*, *Arruda-Boyce*, *Gent* a *Yeoh* a mnohé další. [2]



Obr. 1 Tahový diagram elastomeru

Modely slouží k poskytování přesných výsledků vysoce elastických izotropních a nestlačitelných materiálů. Hyperelastické modely jsou založené na definici hustoty deformační energie W . Pro izotropní a nestlačitelný materiál W může být vyjádřena jako funkce hlavních protažení, či jako funkce deformačních invariantů:

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), \quad W = W(I_1, I_2, I_3). \quad (1)$$

Deformační invarianty jsou vyjádřeny vztahy:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= (\lambda_1 \cdot \lambda_2)^2 + (\lambda_2 \cdot \lambda_3)^2 + (\lambda_1 \cdot \lambda_3)^2 \\ I_3 &= (\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Pro nestlačitelné materiály platí předpoklad $I_3 = 1$, tudíž deformační energie bude funkcí pouze prvního a druhého deformačního invariantu. [2]

Složky Cauchyho tenzoru napětí jsou dány

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - p; i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

kde p je objemová část napětí. Pro nestlačitelné materiály lze spojit vztah (1) se vztahy

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1 \text{ a } \lambda_3 = (\lambda_1 \cdot \lambda_2)^{-1} \quad (4)$$

vyklučující λ_3 . W se pak stane pouze funkcí λ_1 a λ_2 . [2]

Zavedením vztahu

$$\tilde{W} = \tilde{W}(\lambda_1, \lambda_2) = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-2}), \quad (5)$$

jež se získá derivací vztahu (3), vzniknou závislosti

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \lambda_1 \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \lambda_1}, \quad \sigma_2 - \sigma_3 = \lambda_2 \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \lambda_2}, \quad (6)$$

kde neznámá objemová část napětí p je vyloučena. \tilde{W} je funkcí λ_1 a λ_2 . Pro shodu s klasickou teorií, \tilde{W} musí být podmíněna několika vztahy.

$$\begin{aligned} \tilde{W}(1,1) &= 0, \\ \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \lambda_1}(1,1) &= \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \lambda_2}(1,1) = 0, \\ \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial \lambda_1 \cdot \lambda_2}(1,1) &= 2 \cdot \mu, \\ \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial \lambda_1^2}(1,1) &= \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial \lambda_2^2}(1,1) = 4 \cdot \mu. \end{aligned} \quad (7)$$

μ je základní tvar smykového modulu. Pro případy dvouosé napjatosti, kde $\sigma_3 = 0$, lze vztah (6) upravit na:

$$\sigma_1 = \lambda_1 \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \lambda_1}, \quad \sigma_2 = \lambda_2 \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \lambda_2}. \quad (8)$$

Při jednoosém tahu (tlaku) můžeme předpokládat rovnost $\lambda_2 = \lambda_3$, přičemž pro nestlačitelné materiály platí:

$$\lambda_1 = \lambda, \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}. \quad (9)$$

Můžeme rovněž definovat deformační energii pomocí nezávislé deformace:

$$\hat{W} = \hat{W}(\lambda) \equiv \tilde{W}(\lambda, \lambda^{-1/2}). \quad (10)$$

V případě, že $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ a Cauchyho tenzor napětí je určen z λ , pak platí vztah:

$$\sigma = \lambda \cdot \frac{\partial \hat{W}}{\partial \lambda}. \quad (11)$$

Pro všechny hyperelastické modely platí zákonitosti uvedené vztahy (7). Ze znalosti W lze pak přímo získat explicitní vztahy vyplývající z rovnic (8) a (11). [2]

3 Napěťově-deformační chování elastomerů

3.1 Jednoosá napjatost

Jednoosý tah je definován protažením podle rovnic (9), přičemž se zároveň předpokládá nestlačitelnost materiálu, podle (4). Zvolí-li se zkušební těleso ve tvaru hranolu (Obr. 2), jehož boční strany jsou při jednoosém tahu nezatižené, pak platí že $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Rozšířením vztahu (3) na tvar:

$$\sigma_1 = 2 \left[\lambda_1^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left(\frac{1}{\lambda_1^2} \right) \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] + p \quad (12)$$

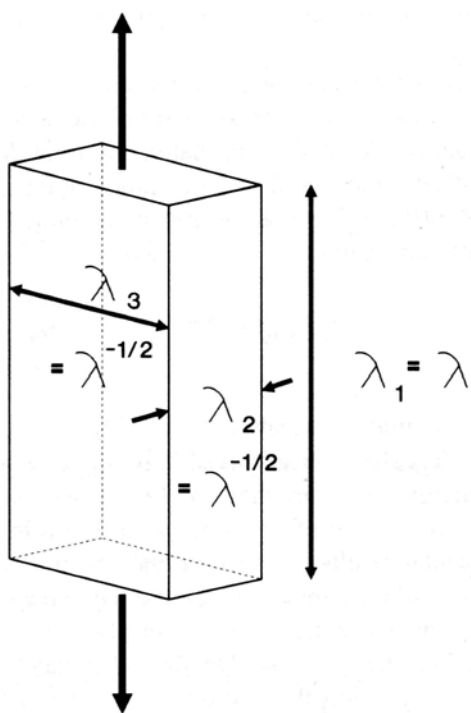
a s přihlédnutím k podmínce $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, získá se vztah pro neznámý tlak p :

$$p = -2 \left[\left(\frac{1}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) - \lambda \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) \right]. \quad (13)$$

Sloučením s rovnicí (12) se získá vztah pro výpočet napětí $\sigma_1 (= \sigma)$:

$$\sigma = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) + \left(\frac{1}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \cdot \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right). \quad (14)$$

[1]



Získaný vztah pro oblast vysokých deformací je analogií známému Hookově zákonu $\sigma = E \cdot \varepsilon$, vhodném pro malé deformace. Vztah podává informace o napěťově-deformační závislosti za podmínky, že materiál je charakterizován dvěma parametry, $\partial W/\partial I_1$ a $\partial W/\partial I_2$, označovanými též jako W_1 a W_2 , jež jsou analogické modulu pružnosti. Vztah (14) je možné pak uvést ve tvaru:

$$\sigma = 2 \cdot \left(W_1 + \frac{1}{\lambda} \cdot W_2 \right) \cdot \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right). \quad (15)$$

[1]

Obr. 2 Jednoosá napjatost [1]

3.2 Dvouosá napjatost

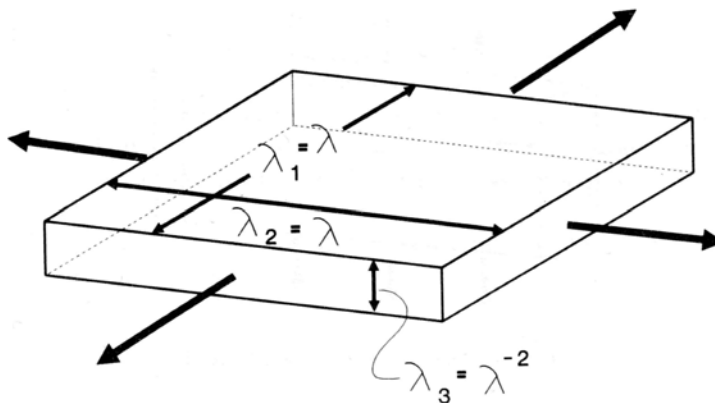
V tomto případě platí deformační vztahy $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, $\lambda_3 = 1/\lambda^2$ (Obr. 3). Opět napětí σ_3 je nulové, jelikož největší plochy daného plošného prvku jsou nezatíženy. Z toho důvodu pro tlak p , po dosazení do vztahu (12), platí rovnice:

$$p = -2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda^4} \cdot W_1 - \lambda^4 \cdot W_2 \right). \quad (16)$$

Napětí σ_1 a σ_2 se pak vypočítají dle vztahu:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 2 \cdot (W_1 + \lambda^2 \cdot W_2) \cdot \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right). \quad (17)$$

To opět potvrzuje vysoce nelineární závislost mezi napětím a deformací. [1]



Obr. 3 Dvouosá napjatost [1]

3.3 Čistý smyk

Čistý smyk je definován jako tah aplikovaný na tělese, jež je deformováno ve směru 1, přičemž ve směru 2 je zabráněno deformaci ($\lambda_2 = 1$) (Obr. 4). Obecně pro čistý smyk platí následující podmínky:

- při smykové deformaci nedochází ve směru shodném s hlavní osou k žádnému prodloužení.
- při čistém smyku pak nedochází k rotaci kolem hlavních os v průběhu deformování.

[1]

Co se týče samotného zkušebního vzorku, výška h (ve směru namáhání) by měla být mnohem menší nežli šířka vzorku w (směr 2). Dlouhé horizontální svorky zabraňují kontrakci

vedlejších stran vzorku a dochází pouze k napětí ve vertikálním směru, tudíž platí $\lambda_2 = 1$. [1]

Pro čistý smyk tedy platí vztahy pro protažení $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = 1$ a $\lambda_3 = 1/\lambda$, přičemž napětí $\sigma_3 = 0$. Začlenění do vztahu (11) se získá rovnice pro výpočet tlaku p :

$$p = -2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda^2} \cdot W_1 - \lambda^2 \cdot W_2 \right). \quad (18)$$

Napětí $\sigma_1 (= \sigma)$ ve směru tahu má pak tvar:

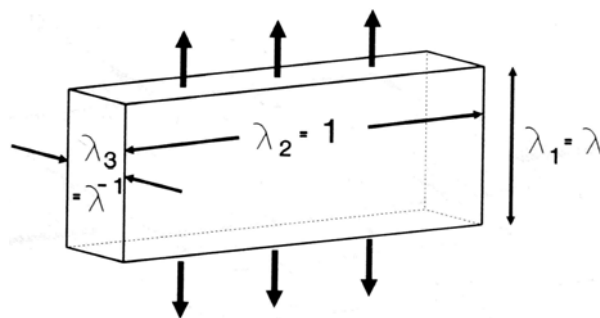
$$\sigma = 2 \cdot (W_1 + W_2) \cdot \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (19)$$

a napětí v příčném směru σ_2 :

$$\sigma_2 = 2 \cdot (W_1 + \lambda^2 \cdot W_2) \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right). \quad (20)$$

Pro výpočet tažné síly, vztažené na jednotku nezátíženého plochy tělesa, přechází rovnice (18) na tvar:

$$F = 2 \cdot (W_1 + W_2) \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^3} \right) \quad (21)$$



Obr. 4 Čistý smyk [1]

Opět se v případě čistého smyku jedná o vysoce nelineární závislost mezi napětím a deformací. [1]

4 Přehled hyperelastických modelů

4.1 Polynomická funkce

Polynomická funkce koncepčně předcházela Mooney-Rivlinovým modelům. Hustota deformační energie je funkcí prvního a druhého deformačního invariantu (I_1, I_2) ve tvaru:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j, \quad (22)$$

kde C_{ij} představují materiálové parametry a konstanta N obvykle nepřesahuje hodnotu 3. Model je použitelný pro deformace dosahující 300 %. [6]

4.2 Neo-Hookean

Hustota deformační energie může být definována pouze jako funkce prvního deformačního invariantu $I_1(C)$. Na tomto principu byl definován vztah pro Neo-Hookovský model výpočtu deformační energie:

$$W = C_{10}(I_1 - 3). \quad (23)$$

[8]

Tento model předpokládá konstantní smykový modul a podává dobré výsledky do deformace 40 % v případě jednoosého tahu. Pro deformaci čistým smykem je aplikovatelný až do protažení 90 %. [7]

4.3 Mooney-Rivlin model

Původní Mooney-Rivlinův model prvního řádu je reprezentován rovnicí:

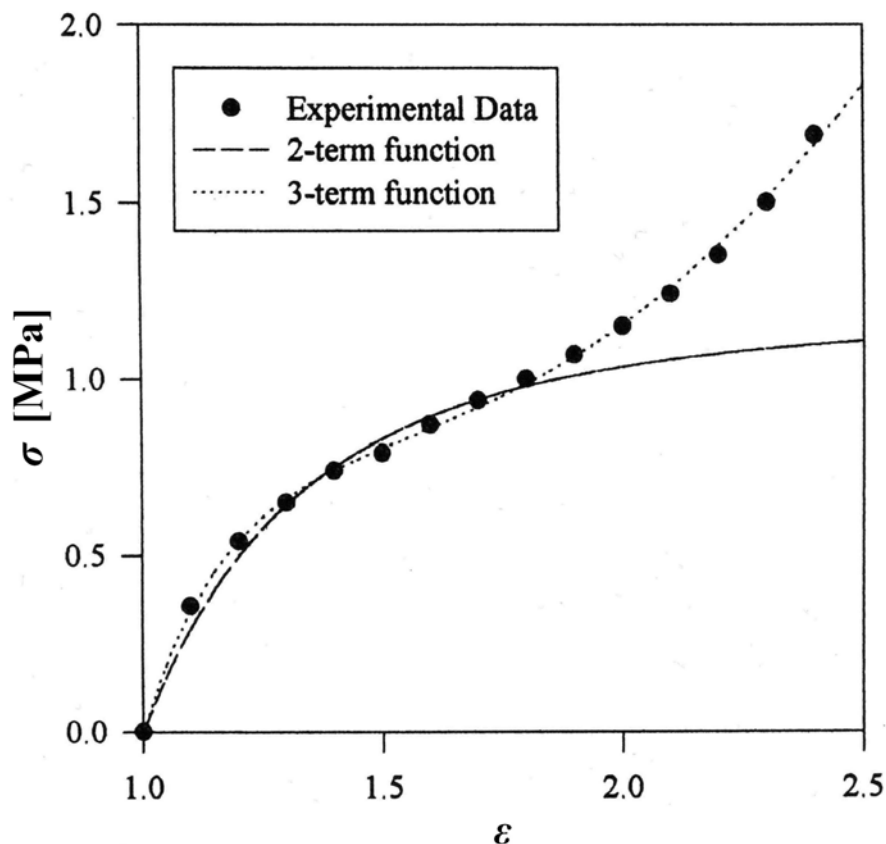
$$W = C_{10} \cdot (I_1 - 3) + C_{01} \cdot (I_2 - 3). \quad (24)$$

Ve vztahu, tak jako ve všech následujících vyjádření W , je uvažována pouze deviační část deformační energie. Rozšířením vztahu (24) o podmínky druhého řádu získáme rovnici:

$$W = C_{10} \cdot (I_1 - 3) + C_{01} \cdot (I_2 - 3) + C_{20} \cdot (I_1 - 3)^2 + C_{11} \cdot (I_1 - 3) \cdot (I_2 - 3) + C_{20} \cdot (I_2 - 3)^2. \quad (25)$$

Tato forma představuje závislost W na dalších třech materiálních parametrech a je často užitečná pro popis napětově-deformační odezvy při velkém protažení. Zvláště to umožňuje lepší predikci změn při vyšších úrovních napínání. Rozšířením vztahu (25) o další proměnné lze získat n -tou formu *Polynomického modelu*. Obvykle se tímto krokem nedocílí žád-

ného zlepšení. Proložení Mooney-Rivlinova modelu (2. a 3. řádu) experimentálními daty z jednoosého tahu jsou zobrazeny na Obr. 5.



Obr. 5 Proložení Mooney-Rivlinova modelu experimentálními daty jednoosého tahu [10]

Parametry C_{ij} jsou materiálové konstanty stanovené z experimentálních dat. Souvisí se základním tvarem smykového modulu podle rovnice:

$$2 \sum_{ij} C_{ij} = \mu. \quad (26)$$

Vložením základních vztahů (4) do rovnic (2) a dosazením invariantů I_1 a I_2 do vztahů (24) nebo (25) se získá funkce deformační energie \tilde{W} , ze které je možné stanovit explicitní napěťově-deformační vztahy. Kupříkladu Mooney-Rivlinův model prvního řádu pro jednoosý tah lze vyjádřit rovnicí:

$$\sigma = 2 \cdot (\lambda - \lambda^{-2}) (C_{10} \cdot \lambda + C_{01}). \quad (27)$$

Při aplikaci závislostí

$$\sigma_1 = \sigma_2, \sigma_3 = 0, \lambda_1 = \lambda_2 \text{ a } \lambda_3 = \frac{\lambda_1^{-1}}{\sqrt{2}}, \quad (28)$$

se získá rovnice pro dvouosý tah

$$\sigma_1 = 2 \cdot (\lambda_1^2 - \lambda_1^{-4}) \cdot (C_{10} + C_{01} \cdot \lambda_1^2). \quad (29)$$

[2]

Ačkoliv model podává věrohodné výsledky až do deformace 100 % pro jednoosý tah, nepostihuje věrohodně kompresní fázi deformace. [7]

4.4 Yeoh

Model vychází pouze ze závislosti na prvním deformačním invariantu, čímž se odlišuje od modelů vyšších řádů:

$$W = C_{10} \cdot (I_1 - 3) + C_{20} \cdot (I_1 - 3)^2 + C_{30} \cdot (I_1 - 3)^3. \quad (30)$$

Model se vyznačuje všestranností aplikace, nicméně je schopen postihnout různé stavy deformace, pokud jsou aplikována pouze data z jednoosého tahového testu. Nicméně je potřeba dbát zvýšené opatrnosti při aplikaci pro deformaci nízkým napětím. [7]

Pro tento případ byl model (30) rozšířen o exponenciální člen:

$$W = C_{10} \cdot (I_1 - 3) + C_{20} \cdot (I_1 - 3)^2 + C_{30} \cdot (I_1 - 3)^3 + \frac{\alpha}{\beta} \cdot [1 - e^{-\beta(I_1 - 3)}], \quad (31)$$

kde konstanty C_{10} , C_{20} , C_{30} , α a β vyjadřují materiálové parametry. [8]

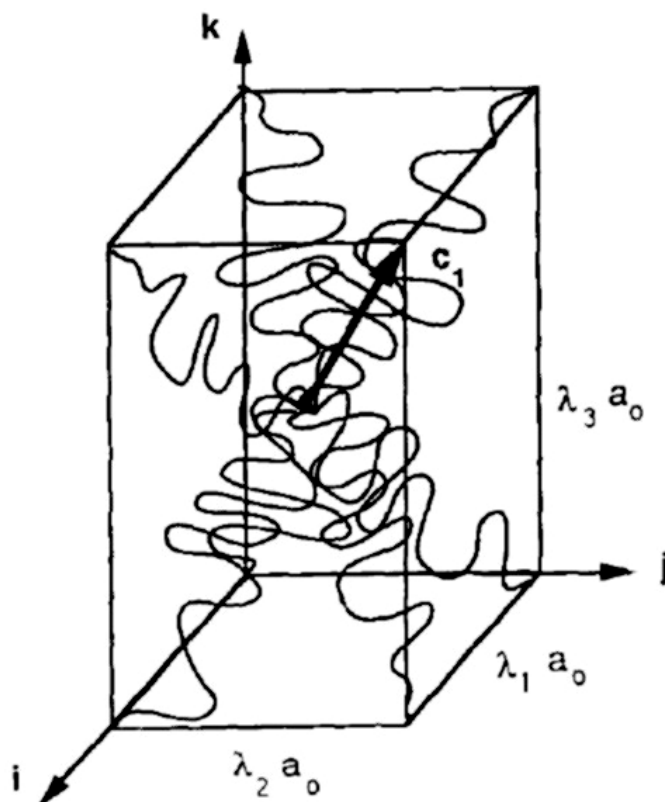
4.5 Arruda-Boyce

Jedná se o model založený na mikromechanice vnitřní struktury materiálu. Model byl vyvinut statistickou úpravou řetězců negaussového charakteru vedoucích ze středu do rohů elementu. Proto je model někdy označován za osmi-řetězcový model (Obr. 6). [6]

Artura-Boyce model má tvar

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} \cdot (I_1^i - 3^i), \quad (32)$$

přičemž počáteční smykový modul $\mu = n \cdot k \cdot T$. Konstanta n vyjadřuje hustotu řetězců, k Boltzmannovu konstantu a T teplotu. Konstanta λ_L značí limitní protažení sítě, kdy se hodnota napětí blíží nekonečnu. [9]



Obr. 6 Osmi-řetězcová síť ve zdeformovaném stavu [9]

Deformační energie je pak po vyjádření všech hodnot vztahu (32) definována rovnicí:

$$W = n \cdot k \cdot T \cdot \left[\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot (I_1 - 3) + \frac{1}{20N} \cdot (I_1^2 - 9) + \frac{11}{1050N^2} \cdot (I_1^3 - 27) \\ & + \frac{19}{7000N^3} \cdot (I_1^4 - 81) + \frac{519}{673750N^4} \cdot (I_1^5 - 243) \end{aligned} \right], \quad (33)$$

kde $N = \lambda_L^2$. [9]

Model je použitelný do deformace 300%. [6]

4.6 Gent

Obdobně jako Arruda-Boyce model je i Gentův model založen na mikromechanice vnitřní struktury, přičemž rovněž využívá principu limitního protažení vnitřní sítě. [6]

Model Gent je vyjádřen následujícím vztahem:

$$W = \frac{-E \cdot I_m}{6} \cdot \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m} \right), \quad (34)$$

kde I_m vyjadřuje limitní hodnotu členu $(I_I - 3)$, jež analogicky odpovídá λ_L modelu Arruda-Boyce. Konstanta E vyjadřuje počáteční modul pružnosti a jeho hodnota přibližně odpovídá 3μ . [6]

4.7 Ogden

Velmi užívaný způsob vyjádření deformační energie byl stanoven Ogdenem:

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} \cdot (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3), \quad (35)$$

kde N je přirozené číslo, obvykle rovné 3 (ovšem může nabýt hodnot větších i menších). α_i a μ_i jsou reálné konstanty, kladné nebo záporné, přičemž splňují podmínku

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \mu_i \cdot \alpha_i = \mu, \quad (36)$$

kde μ je opět základní tvar smykového modulu. [2]

Dosazením vztahů (4) do rovnice (35) lze získat ekvivalentní vyjádření:

$$\tilde{W}(\lambda_1, \lambda_2) = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} \cdot (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_1^{-\alpha_i} \cdot \lambda_2^{-\alpha_i} - 3). \quad (37)$$

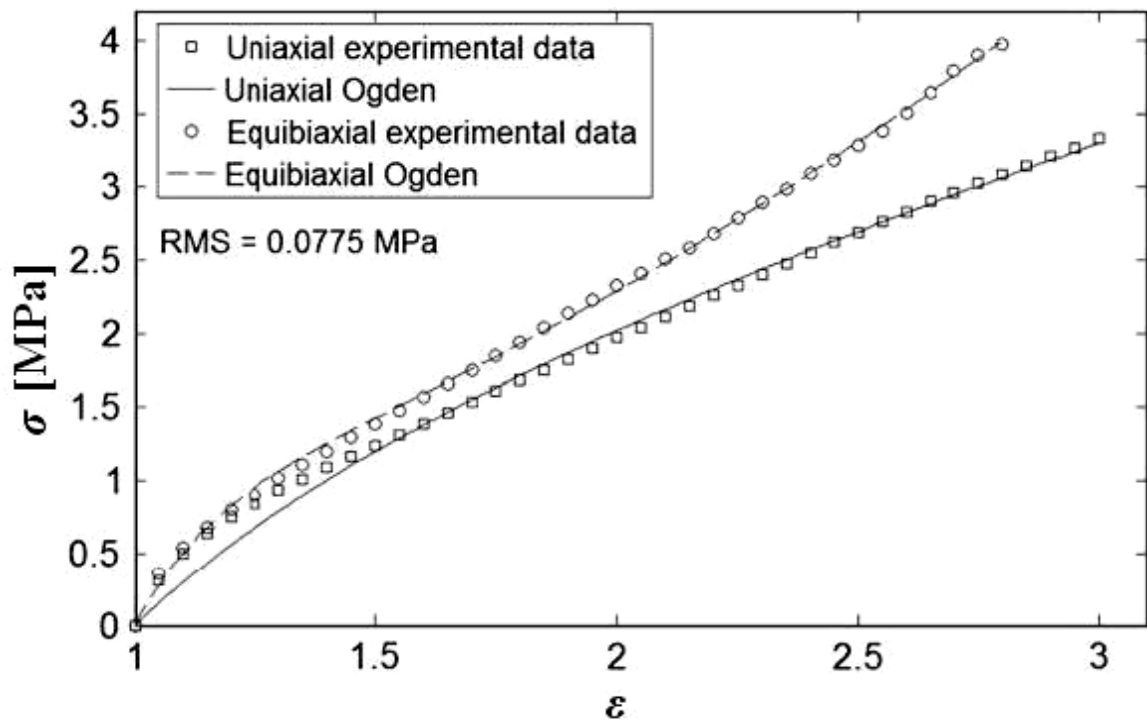
Při dosazení $N = 2$, $\alpha_1 = 2$ a $\alpha_2 = -2$ do vztahu (37) vznikne funkce:

$$\tilde{W}(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{1}{2} \mu_1 \cdot (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2} - 3) - \frac{1}{2} \mu_2 \cdot (\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_1^2 \lambda_2^2 - 3), \quad (38)$$

jež je ekvivalentní *Mooney-Rivlinově* funkci prvního řádu (24) s konstantami $C_{10} = \frac{1}{2} \mu_1$,

$$C_{01} = \frac{1}{2} \mu_2. \quad [2]$$

Proložení Ogdenova modelu experimentálními daty z jednoosé a dvouosé tahové zkoušky jsou zobrazeny na Obr. 7.



Obr. 7 Proložení Ogdenova modelu experimentálními daty z jednoosé a dvouosé tahové zkoušky [2]

Hlavní předností modelu je jeho aplikovatelnost pro deformace až 700 %. [6]

5 Pryžokovové výrobky

Pryžokovové výrobky se začaly používat postupem času s rozvojem průmyslu – strojírenství a hlavně automobilového průmyslu. Zpočátku se používaly hlavně celopryžové díly, jež byly zamontovány do montážních celků. Konstrukce těchto celků byla mnohdy složitá, díly byly náročné na montáž a neplnily často spolehlivě nároky na ně kladené. Proto byla snaha co nejvíce díly konstrukčně zjednodušit a přitom vytvořit kvalitní spoje. [3]

5.1 Požadavky na spoj pryž – kov

Nároky na takovéto výrobky nejsou nikterak malé. Kvalitní spoj musí mít:

- pevnost vyšší než je pevnost použité pryže,
- musí být odolný působení chemikálií,
- musí být odolný působení tepla, UV záření, ozonu,
- nesmí poškozovat životní prostředí,
- residua vzniklá při likvidaci pryžokovových dílů nesmí zatížit životní prostředí.

[3]

5.2 Typy spojů

Typy spojů mezi pryží a zálisky můžeme rozdělit do několika kategorií:

- dle pevnosti spoje,
- dle typu vytvořené vazby,
- dle technologie vytváření vazby.

[3]

5.2.1 Typy spojů

V zásadě se dá za vyhovující považovat taková pevnost spoje, jež umožňuje spolehlivou funkci daného výrobku. Kvalitní pevný spoj má vyšší pevnost než je pevnost použité pryže. Pevnost spoje lze laboratorně testovat na standardních tělískách dle různých norem. Minimální pevnosti spoje a postup zkoušení jsou definovány v normě ČSN 633010. [3]

Soudržnost pryže s kovem na hotovém výrobku musí dosahovat minimálně statických hodnot uvedených v Tab. 4. [3]

Soudržnost pryže s kovem se zkouší na trhacím stroji s rychlostí posuvu $v = (20 \sim 50)$ mm.min⁻¹ při teplotě $t = (23 \pm 2)$ °C a musí odpovídat hodnotám uvedeným v Tab. 4. U výrobků, jež nelze zkoušet na trhacím stroji, se soudržnost zkouší ručním odtlačováním okrajového pásma pryže od zálisku pomocí tupého hrotu s minimálním zaoblením hran hrotu $r = 0,8$ mm. [3]

Nesoudržnost pryže s kovem v okrajových pásmech se vyhodnocuje podle Tab. 5.

Tab. 4 Soudržnost pryže s kovem [3]

Tvrdost pryže ShA (jmenovitá hodnota)	Tvrdost pryže IRHD (jmenovitá hodnota)	Soudržnost [MPa]	
		v tahu	ve smyku
≤ 50	< 55	1	0,5
≥ 50	> 55	1,5	0,75

Tab. 5 Nesoudržnost pryže s kovem [3]

Vzhledový znak	Dovolené mezní úchytky pro výrobky			
	Jemné (do 50 mm)	Běžné (50 až 100 mm)	Hrubé (nad 100 mm)	Speciální (různé – dle požadavků)
Nesoudržnost pryže s kovem v okrajových pásmech v délce celkem max. 10 % celkové délky spoje, přičemž jednotlivé nespojitosti jsou: - do hloubky max. - v délce max. Jednotlivé nespojitosti jsou od sebe vzdáleny minimálně o dvojnásobek uvedené délky	0,5 2	1 5	2 10	Podle zvláštních dohod, případně výkresové dokumentace

5.2.2 Dělení spojů dle typu vazby

Spoj mezi pryží a záliskem může být vytvořen několika různými postupy:

- Na čistě mechanické bázi: Pryž je zakotvena v prolisech nebo otvorech v zálisku a pevnost spoje je závislá pouze na tření a mechanické pevnosti pryže proteklé otvory v zálisku. Pryžová část může být na zálisek dokončována dodatečně. V tomto případě nevznikají na kontaktní ploše mezi výliskem a záliskem žádné chemické ani fyzikální vazby. [3]
- Lepení: Spoj mezi záliskem a zvulkanizovanou pryží je vytvořen dodatečně pomocí lepidla. Zálisek i výlisek musí být pro lepení již upraveny a musí být použit správný typ lepidla. Při tomto procesu se vytvářejí chemické a fyzikální vazby mezi záliskem a lepidlem a mezi lepidlem a pryží. Tímto způsobem lze vytvořit relativně pevné spoje. [3]
- Vulkanizací: Spoj mezi záliskem a pryží je vytvořen speciálním postupem při vulkanizaci ve formě. Je nutná správná příprava zálisku. Při tomto procesu se vytvářejí vazby na chemické a fyzikální bázi. Spoje vytvořené tímto postupem vykazují nejvyšší hodnoty pevnosti ze všech tří uvedených typů spojů. [3]

5.2.3 Dělení spojů dle technologie vzniku vazby

Technologie vytváření vazby úzce souvisí i s typem vytvořené vazby:

- Při vytváření spoje na mechanické bázi se používá dodatečná montáž předlisovaného pryžového dílu na zálisek. Lze použít různé automatizované systémy pro tuto operaci. [3]
- Navulkanizované pryže na zálisek bez jakékoliv povrchové úpravy. Na zálisku jsou otvory, jimiž pryž při vulkanizaci proteče a tímto zakotví na zálisku. [3]
- Dodatečné lepení předlisovaných pryžových dílů na zálisek pomocí speciálních lepidel. Zálisek i výlisek mají již provedenou povrchovou úpravu. Používá se na dílech, kde má být dosažena vyšší pevnost spoje, ale není možno tento spoj vytvořit vulkanizací ve formě (buďto se celek do formy nevejde nebo z ekonomických důvodů). [3]

- Vulkanizace rozměrných dílů v kotli. Zálisek je již povrchově upraven, je na něj nanesena nezvulkanizovaná pryž a požadovaného tlaku pro vulkanizaci je dosaženo bandážováním. Pevnost takto vytvořených spojů je asi na úrovni pevnosti lepením. [3]
- Vulkanizací ve vulkanizační formě. Zálisek je speciálním postupem, povrchově upraven, je k němu přiložena nezvulkanizovaná pryž a během vulkanizace dochází k vytvoření spoje mezi pryží a záliskem. Tímto způsobem se dosahuje nejkvalitnějších spojů. [3]

5.2.4 Struktura vulkanizačního spoje

Spoj mezi záliskem a pryží se vytváří během vulkanizace. Vlastní struktura spoje obsahuje několik částí – zálisek, povrchová vrstva zálisku s povrchovou úpravou, primární spojovací prostředek, sekundární spojovací prostředek a pryž. Mezi jednotlivými částmi se vytvářejí vazby na fyzikální a chemické bázi. Obecně platí, že spoj je tak pevný, jak je pevný jeho nejslabší článek. Při vulkanizaci je snahou vytvořit tak pevné spoje, že jejich pevnost je vyšší než pevnost pryžového materiálu. [3]

Spoj zálisek – povrchová úprava zálisku je závislý na typu povrchových úprav zálisku, je tvořen chemickými vazbami mezi materiálem a chemickými sloučeninami, jež obsahuje (např. fosfát). [3]

Spoj povrchová úprava zálisku – primární spojovací prostředek je vytvořen kombinací mechanického zakotvení spojovacího prostředku ve zdrsňeném povrchu a fyzikálních sil. [3]

Spoj mezi primárním a sekundárním spojovacím prostředkem je vytvořen na základě chemických vazeb. [3]

Spoj spojovací prostředek – pryž je vytvořen chemickými vazbami. Na tomto spoji se také vytváří přechodová vrstva, jelikož sekundární spojovací prostředek při vulkanizaci difunduje do pryže. Tato přechodová vrstva je tvrdší než vlastní pryž. [3]

Rychlost vytváření jednotlivých vazeb je různá. Proto složením kaučukové směsi a podmínkami vulkanizace se musí vždy dosáhnout toho, aby chemické reakce probíhaly současně. Pokud tomu tak není, ať již z důvodu různé reakční rychlosti, nebo proto, že nezačínají současně, nedojde k vytvoření kvalitního spoje a objeví se separace vrstev. Kvalitně

vytvořený spoj musí pokrývat celou styčnou plochu. Kontrola kvality spojů se provádí na speciálních laboratorních tělískách při trhacích zkouškách. Přitom dochází k destrukci tělíska a dle umístění lomu na tělísku se hodnotí jednotlivé vady:

- *M* – jedná se o separaci mezi povrchovou úpravou zálisku a spojovacím prostředkem.
- *CP* - jedná se o separaci mezi spojovacím prostředkem a primerem
- *RC* – jedná se o separaci mezi spojovacím prostředkem a pryží
- *R* – jedná se o lom v pryži. Lom mezi přechodovou vrstvou pryže a vlastní pryží spadá do této kategorie. [3], [10]

U pryžokovových dílů s kvalitně vytvořenými spoji dochází při destrukci vždy k lomům v pryži. [3]

6 Zálisky

Zálisky vytvářejí pevnou výztužnou část a jsou svými mechanicko-fyzikálními vlastnostmi odlišné od pryže. Zpravidla jsou kovové nebo plastové. V případě plastů se používají pouze typy schopné snášet bez tvarových deformací podmínky vulkanizace. Zálisky jsou zpravidla upevněny na vyšší montážní celek a přenášejí namáhání na pryžovou část. [3]

6.1 Technologie spojování

6.1.1 Mechanické spojování

Požadovaný pryžokovový díl se získá mechanickým upevněním pryže na kovový díl. Typ upevnění je dán celkovou konstrukcí dílu, zpravidla je pryž navlečena na kovový díl. Takto vytvořené spoje nemají na styk pryže se záliskem žádnou soudržnost a jejich funkčnost je závislá na konstrukčním ztvárnění kompletu nebo na pevnosti pryže. Obvyklým typem těchto spojů je pryž převléknutá svým okrajem přes výztužný díl, pryžový výlisek mechanicky stažený mezi dvěma výstužnými díly, pryžový díl připevněný na výstužný díl pomocí „pryžových knoflíků“, nebo je zálisek bez jakékoliv povrchové úpravy zalisován v pryžovém dílu a soudržnost je zajištěna otvory v zálisku. Při tomto způsobu spojování se může uplatnit robotizace či automatizace, pokud to velikost série umožňuje. [3]

6.1.2 Spojování lepením

Při tomto typu spojování pryže se zálisky je spoj vytvořen mezi záliskem s povrchovou úpravou a zvulkanizovaným pryžovým výliskem v následující operaci. Vzniká spoj mezi oběma díly v celé styčné ploše, přičemž je založen na fyzikálních a chemických vazbách.

Pro vytvoření vazeb se používá speciální typ lepidla. Díly musejí být pro vytvoření kvalitní vazby napřed povrchově upraveny. Bez této povrchové úpravy není možno dosáhnout kvalitního spoje. Používané povrchové úpravy u zálisků jsou v tomto případě shodné s povrchovými úpravami používanými při vulkanizaci. Povrch zvulkanizovaných pryžových výlisků je nutno před lepením zdrsnit, čímž se zvětší styčná plocha vhodná k zakotvení lepidla a současně mechanicky odstraní z povrchu nečistoty a produkty stárnutí pryže. Následující operací je ještě očištění povrchu organickými rozpouštědly, kdy dochází k naleptání povrchu pryže a odstranění chemických nečistot. Ne každé organické rozpouštědlo je pro tento účel vhodné. [3]

6.1.3 Spojování vulkanizací

Při tomto typu spojování pryže se zálisky dochází k tvorbě velmi kvalitního spoje mezi záliskem a pryží v jedné jediné operaci – při vulkanizaci. Povrch zálisku je přitom opatřen povrchovou úpravou, kaučuková směs se dostává do kontaktu se záliskem ještě v nezvulkanizovaném stavu. Během vulkanizace se vytvářejí fyzikální vazby mezi záliskem a vznikající pryží. [3]

6.1.4 Spojování zvulkanizovaných elastomerů

Spojování zvulkanizovaných elastomerů, ať již vzájemné, či s jinými materiály je založené na aplikaci tlakově citlivých pojiv odvozených ze samotného spojovaného elastomeru. Variabilní vytvrzovací pojiva jako jsou epoxy-polyamidová a izokyanátová pojiva zaručují vysokou pevnost spoje u většiny elastomerů. Diagram na Obr. 8 znázorňuje srovnání nejběžnějších a speciálních pojiv. [4]

Povrchové úpravy před samotným spojováním se skládají z praní v rozpouštědle, pískování, či pro nejnáročnější aplikace, cyklizace kyselinou. Standardní pojiva jsou obvykle používána pro spojování pryží jako jsou NR, CR, BR, NBR, SBR, PU, OT i regenerát. Nejpoužívanější jsou pojiva založené na bázi akrylátových, kyanoakrylátových, polyesterových izokyanátových, epoxidových pryskyřic, resorcinol-formaldehydové pryskyřice, silikonu,

polyizokyanátu, furanu, fenolického nitrilu, fenolického neoprenu, fenolického PVF a flexibilních epoxidových polyamidů. [4]

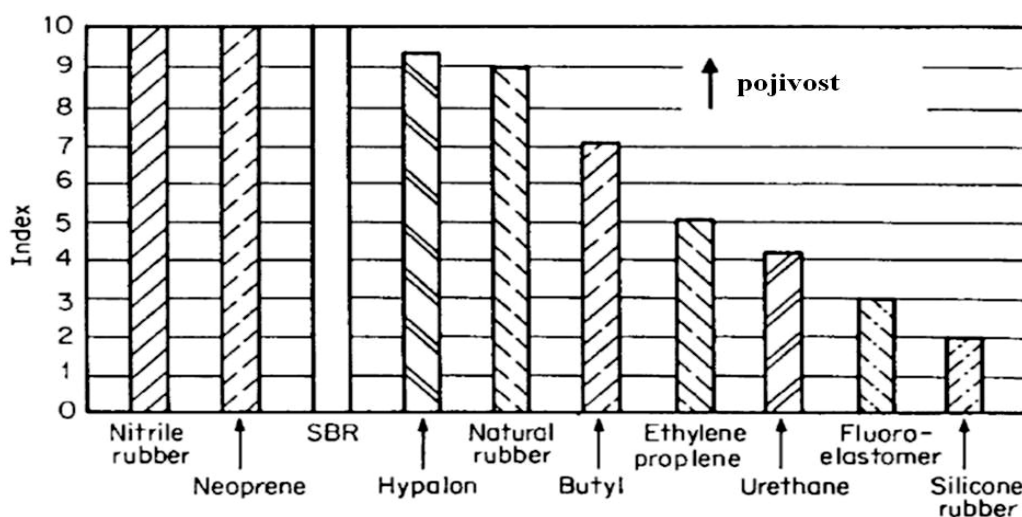
Tab. 6 Komerční pojiva pro spojování z vulkanizovaných materiálů [4]

Použití	Produkt (pojivo / primer)	Elastomer
Spojení mezi pojivem a z vulkanizovanou matricí – pouze pro spojování	Chemlok 234 B Chemlok 236 Chemlok 234	NR, SBR, CR, NBR, EPM, EPDM NR, CR, NBR, IIR, EPDM univerzální
z vulkanizované pryžové výrobky	Chemlok 252 Ty Ply BC Ty Ply S Thixon OSN-2 Thixon 508 Thixon 552 Thixon 403/404 Thixon 405 Thixon 412/413 Thixon 814	univerzální IIR CR, NBR pryž automobilových motorů univerzální nesení vody AU ³ , EU ⁴ s kovy AU, EU s kovy AU, EU vzájemně, či s jinými mat. EPDM, IIR

Dodavatelé: Chemlok: Hughson Chemicals, Lord Corporation, Cary, NC;

Ty Ply: Hughson Chemicals, Lord Corporation, Cary, NC;

Thixon: Dayton Coatings and Chemicals, Whittaker Corp., West Alexandria, OH



Obr. 8 Srovnání pojivosti běžných i speciálních pojiv [4]

³ polyuretanové polyestery

⁴ polyuretanové polyetery

Vzájemné pojení vulkanizované pryže může být provedeno pomocí nezvulkanizované pryže, jež poslouží jako pojivo. Proces spojování se v tomto případě podobá pojení nezvulkanizované směsi. Nejčastěji užívané pojiva jsou uvedeny v Tab. 6. Působením lokálního ohřevu a tlaku spoj zvulkanizuje. Obvyklá pevnost spoje činí 50 až 100 %, což závisí na spojované elastomerní směsi a geometrii spoje. [4]

Nejčastěji jsou tímto způsobem spojovány NR, SBR, PU, CR, BR a NBR. Obtížněji se dosahují kvalitní spojení u silikonů, fluorouhlíků, chlorsulfonovaného PE a polyakrylátu. Teprve nedávno výzkum zdokonalil technologii spojování těchto vulkanizovaných elastomerů s kovy. [4]

6.2 Povrchové úpravy zálisků

Zálisky je možno rozdělit do několika kategorií, přičemž jejich pojení má své zákonitosti. Obecně lze zálisky rozdělit na kovové a plastové. [3]

Povrchová úprava kovových zálisků patří mezi nejpropracovanější, jelikož má nejdelší historii. Obecně lze říci, že pro pojení lze použít každého kovu, jež prodělá vhodnou povrchovou úpravu. Nejvhodnější a nejpoužívanější k pojení jsou oceli a hliníkové slitiny. Čím je ocel z hlediska materiálového složení kvalitnější, tím je náročnější na provedení povrchové úpravy, aby se dosáhlo kvalitního spoje. [3]

Při povrchové úpravě dochází k odstranění chemických a mechanických nečistot z povrchu zálisků a k nánosu speciálního spojovacího prostředku. [3]

Pod pojmem mechanické nečistoty si můžeme představit např. prach, zamaštění povrchu nebo jiným způsobem ulpěné cizorodé částice na povrchu zálisku. Ty jsou na povrchu zálisku udržovány pouze fyzikálními silami (adhezí), nikoliv silami chemickými. [3]

Chemické nečistoty jsou korozní zplodiny na povrchu zálisku vzniklé při výrobě zálisku či jeho polotovaru nebo vzniklé působením chemikálií na povrch zálisku (např. znečištěného ovzduší). Oba typy nečistot musí být při povrchové úpravě odstraněny, jinak není možno dosáhnout kvalitního spoje. [3]

6.3 Spojovací prostředky

Spojovací prostředek je látka, jež umožňuje vytvoření kvalitního spoje mezi upraveným povrchem zálisku a pryží. Její složení prochází stále vývojem. Jako spojovací prostředky se používají (nebo používaly) následující látky:

- tvrdá pryž,
- latex-albuminová pojiva,
- termoprenová pojiva,
- mosaz (pomosazení),
- halogenové deriváty kaučuku,
- izokyanáty.

[3]

6.3.1 Tvrdá pryž

Jako první byl tento materiál použit k pojení pryže s kovem. Proces spojování pomocí tvrdé pryže byl objeven již v polovině 19. století. Jedná se o pryžovou směs s vysokým obsahem síry (25 – 47 dsK) – tzv. ebonit. Pro spojování se nanáší na předem upravený povrch kovového dílu v nevulkanizovaném stavu, a to buď ve formě fólie, nebo ve formě gumárenského cementu. K vlastnímu spojení dochází při vulkanizaci. Soudržnost je možno ještě zvýšit přidávkem oxidů železa (nejlépe dávkováním 20 dsK). Vulkanizace probíhá v kotlích vyhřívaných tlakovou parou. Takto nanesená vrstva pryže sice chrání povrch nádoby před agresivními látkami, avšak tvrdá pryž křehne a ztrácí vlastnosti při teplotách nad 70 °C. Při této teplotě společně s měknutím tvrdé pryže dochází k destrukci spoje. Dnes se tohoto spojovacího prostředku používá velmi zřídka, většinou byl již nahrazen modernějšími prostředky na bázi halogenovaných kaučuků. [3]

6.3.2 Latex-Albuminová pojiva

Základem těchto pojiv byla směs latexu, běžných vulkanizačních přísad a sušeného hemoglobinu. Latex způsobuje adhezi k pryži, hemoglobin ke kovu. tato pojiva se v dnešní době již nepoužívají. [3]

6.3.3 Termoprenová pojiva

Jedná se o tvrdé, křehké termoplastické pryskyřice, tzv. cyklokaučuky. Vznikají působením silných kyselin, např. sírové na přírodní kaučuk za zvýšené teploty. Na spoji se vytváří tvrdá, křehká vrstva a spoj neodolává teplotám nad 70 °C. V dnešní době se rovněž již nepoužívají. [3]

6.3.4 Pomosazení

Tato metoda využívá schopnosti pryžové nezvulkanizované směsi vytvářet během vulkanizace spoj mezi pryží a vrstvou mosazi vyloučené elektrolyticky na povrchu kovového dílu. Daná schopnost byla objevena již v roce 1911. K podstatnému rozšíření metody došlo především před druhou světovou válkou. výhodou metody je výborná tepelná odolnost spoje. Nejlepší výsledky se dosahovaly při spojování pryží z přírodního kaučuku. Dobré výsledky byly rovněž dosaženy s butadien-styrenovým a chloroprenovým kaučukem. Bylo nutno dodržet určitou skladbu kaučukové směsi. Směsi bez síry nebo s nízkým obsahem síry neposkytovaly téměř žádnou pevnost spoje. Tato metoda je velmi citlivá na přesné dodržení technologického postupu a vyžaduje přítomnost galvanické linky v blízkosti gumárenského podniku. V současnosti se aplikuje hlavně pro pojení pryže s ocelovými kordy. [3]

6.3.5 Spojování samospojivých vulkanizátů s kovy

Při tomto způsobu vytváření spoje jsou spojovací látky součástí kaučukové směsi. Spoj vzniká při vulkanizaci. Jako spojovací aktivní látky lze použít např. komplexní kobaltové soli merkaptobenzothiazolu. Kvalita takto vytvořených spojů však zdaleka nedosahuje současných požadavků kladených moderním průmyslem na kvalitu spoje. [3]

6.3.6 Halogenové deriváty kaučuku

Tyto spojovací prostředky se vyrábějí působením halogenu, většinou Cl, nebo halogenovodíku na roztok kaučuku, většinou přírodního. Izolovaný produkt je dále smíchán s polymerní maticí a naředěn rozpouštědly na požadovanou viskozitu. Tím se získá velmi kvalitní spojovací prostředek. Spoj neabsorbuje vodu, poměrně dobře odolává stárnutí a je odolný proti působení řady chemikálií i mořské vody. Tato pojiva velmi dobře pojí pryžové směsi, kde kaučukovou složku tvoří polární kaučuk (např. chloroprenový nebo butadien-akrylonytrylový). Pokud se mají pojit nepolární kaučuky (např. přírodní), je třeba jako mezivrstvu mezi kovem a nepolárním kaučukem použít fólii ze směsi polárního kaučuku.

Tato pojiva lze nanášet štětcem, stříkáním i válečkováním. Nejsou významně citlivá na podmínky skladování jako izokyanátová. Jsou dobře odolná při přehřevu. Stala se výchozím produktem při vývoji moderních spojovacích prostředků. [3]

6.3.7 Izokyanátová pojiva

Polyuretanová reaktivní pojiva obsahují systém, jež se používá ve formě tuhé, či jako roztok (v jednosložkové, či dvousložkové podobě). Pojiva jsou schopné vulkanizace při běžné (pokojové) i zvýšené teplotě. Polyuretanová pojiva mají rovněž relativně vysokou pevnost ve smyku a soudržnost spojení. [4]

Základem polyuretanových pojiv je izokyanátová stavební jednotka. Pojiva jsou nejčastěji vyráběna buďto na bázi toluen diizokyanátu (TDI), či methylen difenyl diizokyanátu (MDI). Alifatické izokyanáty jsou méně využívány než MDI, především kvůli vysoké ceně. [4]

Polyuretanová pojiva vytváří tuhé spoje o vysoké soudržnosti. Spoje vykazují dobrou pevnost i při velmi nízkých teplotách. Pouze silikonová pojiva vykazují lepší vlastnosti při nízkých teplotách, nicméně pevnost spojení je mnohem menší. Polyuretanové spoje se rovněž vyznačují dobrou pružností a odolností vůči abrazi. Jsou chemicky odolné, avšak ne tolik jako epoxidová a akrylátová pojiva. Vlastnosti pojiv se při vyšší teplotě velmi zhoršují. Maximální teplota použití je kolem 150 °C, ovšem mnohé směsi se používají pod teplotou 120 °C. [4]

Některé polyuretanové pojiva značně degradují ve vlhkém prostředí. Citlivost vůči vlhkosti postihuje z vulkanizované i nezvulkanizované směsi. Proto je také nutné po aplikaci pojiva na styčnou plochu co nejdříve provézt spojení, aby se zamezilo degradaci vlivem vzdušné vlhkosti. [4]

Nevýhodou těchto pojiv je rovněž jejich určitá termoplastičnost, takže při zalisování dochází k jejich smývání vlivem toku kaučukové směsi. Dochází pak k navulkanizování pryže i na nežádoucích místech. To se dá částečně omezit dvouvrstvým nánosem – izokyanátového pojiva a chlorkaučukového roztoku, přičemž první vrstva se za zvýšené teploty usuší. Tím dojde k její předpolymeraci a tato vrstva potom brání smývání vrstvy druhé. Tento způsob spojení je vhodný pro všechny druhy výrobků, vykazuje velmi dobré hodnoty i na dynamicky namáhaném zboží. [3]

Kvůli dobré přilnavosti a flexibilitě, polyuretanová pojiva spojují dobře směsi složené z obtížně spojitelných plastů. PU pojiva jsou často používány k pojení filmů, folií a pryží. PU pojiva jsou často uplatňována v automobilovém průmyslu při výrobě kompozitních textilií (*Sheet Molding Komponent, SMC*) a reakčním vstřikování (*Reaction Injecton Moulded, RIM*). Výjimečně se pojiva používají i na spojování dřevěných směsí. Vlastnosti některých komerčně vyráběných pojiv jsou uvedena v Tab. 7. [4]

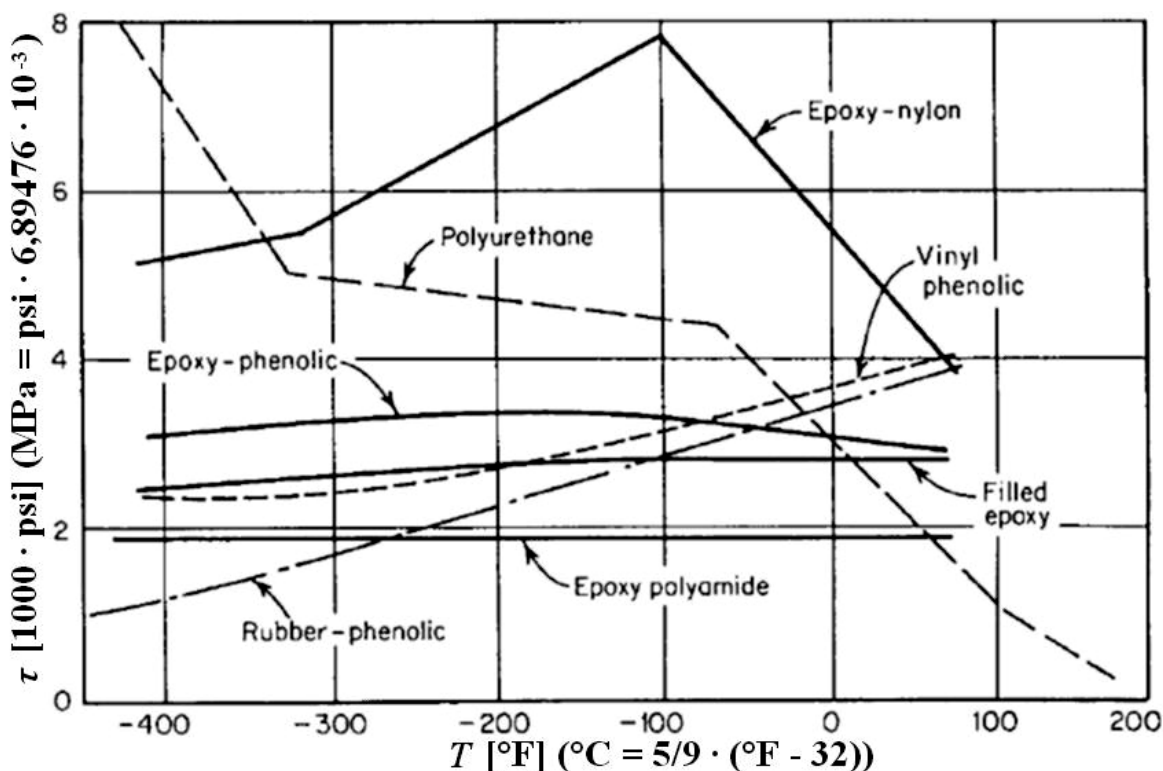
Tab. 7 Vlastnosti některých komerčních polyuretanových pojiv [4]

Obchodní název	Dodavatel	Typ	Parametry vulkanizace	Vlastnosti	Aplikace
22005	Swift	jednosložkové, vulkanizace vlhkem	16 hodin, 21 °C, atm. tlak		spojování čistých plastů či filmů
Pliogrip 6600	Ashland	dvousložkové, pasta	různé podle vulkanizace	vysoká pevnost, odolnost vůči zvýšené teplotě a kapalinám	RV, námořní a průmyslové aplikace
7070	Bostik	dvousložkové, pasta	8 hodin, 25 °C, atm. tlak	flexibilní, chemická odolnost	univerzální, textilie, čalounění
Conathane EN-4	Conap	dvousložkové, pasta	7 dní, 25 °C, atm. tlak (30 minut, 25 °C, atm. tlak)	odolnost vůči vodě, vůči teplotním výkyvům, nízká teplotní roztažnost	elektrotechnika, nepromokavé výrobky
Scotchweld 3532 B/A	3M	dvousložkové, pasta	2 dny, 23,9 °C, atm. tlak (9 minut, 18,3 °C, atm. tlak)	velmi důkladná vulkanizace, odolnost vůči rázům a otěru, Shore D65, pevnost 1,7 – 16,5 MPa	

Nejnověji byly vyvinuty pojiva s vysokou teplotou tání. Tyto horké taveniny se vyznačují pevností ve smyku 17,5 až 27,5 MPa a protažením 500 - 700 %. Vyrábí se z polyuretanových polymerů s koncovými izokyanátovými skupinami. Tyto horké taveniny mají obdobné vlastnosti jako horké taveniny termoplastů. Aplikují se ve formě taveniny při teplotě přibližně 100 °C. Jakmile je PU pojivo aplikováno na podklad, koncové izokyanátové skupiny zreagují s vlhkostí obsaženou v podkladu i ve vzduchu a tavenina zesítuje. [4]

Po nanesení taveniny se spojované části musí pevně zafixovat. Ke pevnému spojení dojde za několik sekund, k plnému vytvrzení spoje dojde za 1 až 3 dny. Pevnost spoje dále neustále zesiluje, čímž dalece překonává pevnost a životnost běžných tavných pojiv. V textilním průmyslu mají tyto pojiva široké uplatnění při laminování tkaniv, nahrazují sešívání spoje a slouží k výrobě lehčených pěn. [4]

Srovnání pevnosti běžných pojiv ve smyku při nízkých teplotách do $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-400\text{ }^{\circ}\text{F}$) je znázorněno na Obr. 9. [4]

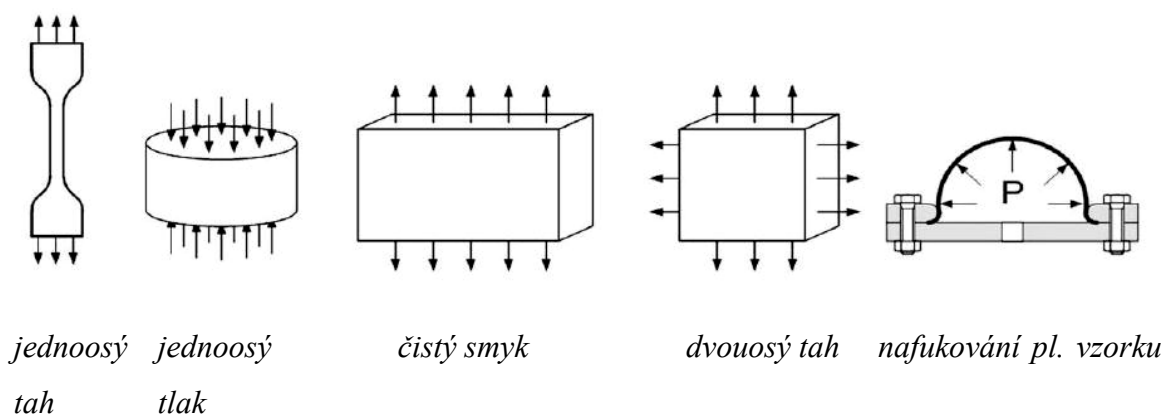


Obr. 9 Srovnání pevnosti ve smyku běžných pojiv při nízkých teplotách [4]

Pevnost ve smyku polyuretanového spojení s hliníkovým dílem dosahuje při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($77\text{ }^{\circ}\text{F}$) hodnoty $12,4\text{ MPa}$ (1800 psi). Při poklesu na teplotu $-73,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-100\text{ }^{\circ}\text{F}$) pevnost vzroste na 31 MPa (4500 psi) a roste dále až na $55,2\text{ MPa}$ (8000 psi) při teplotě $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-423\text{ }^{\circ}\text{F}$). Spoje vykazují výborné napětí při odlupu jak při pokojové teplotě, tak i při nízkých teplotách. Napětí při odlupu se pohybuje v rozmezí od $0,15\text{ MPa}$ (22 piw) při $23,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $0,18\text{ MPa}$ (26 piw) při teplotě $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. [4]

7 Zkoušení hyperelastických materiálů

Nejčastěji se na pryžových materiálech aplikují mechanické zkoušky tahové a tlakové. Zatímco u tlaku se jedná převážně jen o jednoosou zkoušku. Tahové zkoušky se provádí s jednoosým, dvouosým zatížením, či zatížením čistým smykem. Přehled nejběžnějších metod je znázorněn na Obr. 10. [2]



Obr. 10 Tahové zkoušky [2]

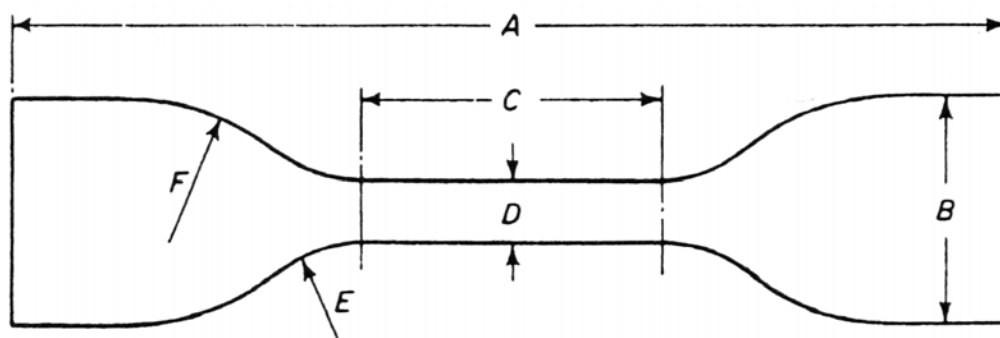
7.1 Jednoosý tah

V zásadě se používají zkušební tělesa ve tvaru tzv. osmičky, či méně často ve tvaru prstence. Zkušební tělesa jsou protahována konstantním zatížením, přičemž je monitorována odpovídající síla a velikost protažení. Z naměřené síly vztažené na plochu průřezu nezátíženého vzorku se vyjadřuje tahové napětí. Obě zkušební varianty jsou popsány normou ISO 37, popřípadě normou ASTM D412. [10]

Výhodou prstencových zkušebních těles je odstranění problémů s upnutím vzorků. Prsteneček se upíná mezi dvě kladky. Protažení vzorku je jednoduše dáno vzdáleností mezi osami kladek. Principiální nevýhoda zkoušky spočívá ve skutečnosti, že napětí je v prstenci rozloženo nerovnoměrně. [10]

Osmičková zkušební tělesa se obtížněji uchycují, navíc měření pozbývá platnost pokud dojde k přetržení v uchycení. Příčinou je nerovnoměrné rozložení napětí podél celého tělesa. Nicméně napětí je rovnoměrné v centrální části, což je hlavní přednost oproti prstencovému zkušebnímu tělesu. [10]

Tvar zkušebního tělesa je znázorněn na Obr. 11, rozměry jsou pak uvedeny v Tab. 8.



Obr. 11 Zkušební těleso, tzv. osmička [10]

Tab. 8 Rozměry zkušebního tělesa, tzv. osmičky [10]

Rozměr [mm]	Typ 1	Typ 1A	Typ 2	Typ 3	Typ 4
A – celková délka (min.)	115	100	75	50	35
B – šířka konců	25 ± 1	$25 \pm 0,5$	$12,5 \pm 1$	$8,5 \pm 0,5$	$6 \pm 0,5$
C – délka zúžené části	33 ± 2	$20 + 2/-0$	25 ± 1	16 ± 1	$12 \pm 0,5$
D – šířka zúžené části	$6 + 0,4/-0$	$5 \pm 0,1$	$4 \pm 0,1$	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$
E – přechodové zaoblení vnější	14 ± 1	11 ± 1	$8 \pm 0,5$	$7,5 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$
F – přechodové zaoblení vnitřní	25 ± 2	25 ± 2	$12,5 \pm 1$	$10 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$
měřená délka	$25 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$

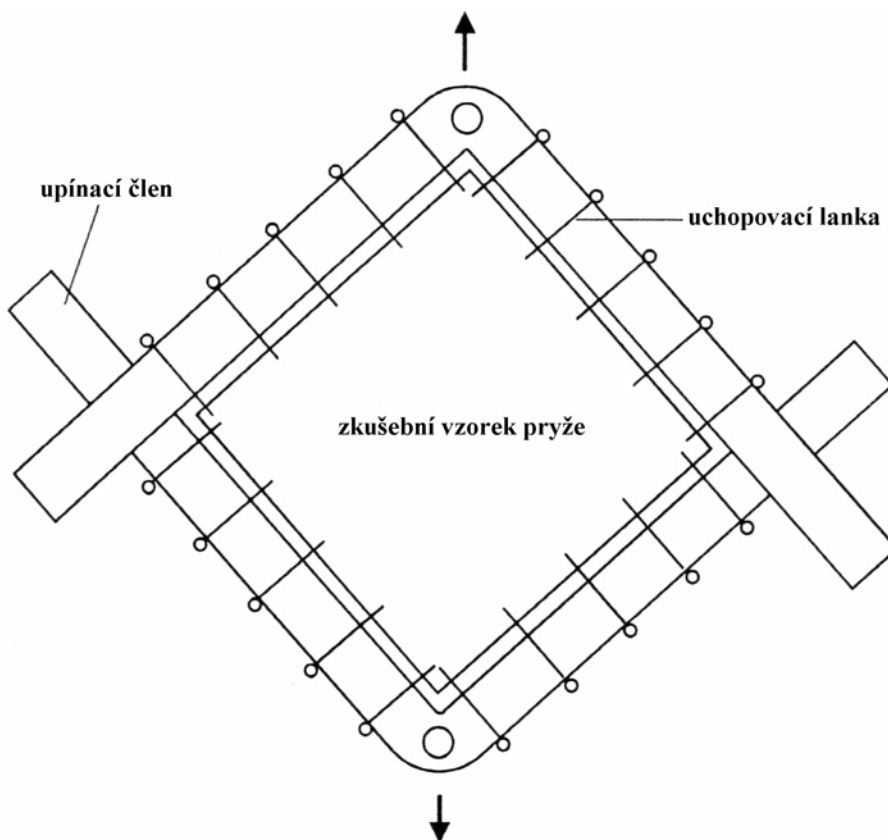
Volbě vhodné geometrie a rozměru zkušebního tělesa se přikládá nemalý význam. Velmi užívaný je typ 1. Nicméně typ 2 získává na popularitě kvůli jeho malým rozměrům a tím pádem i úspoře materiálu. Vhodným kompromisem je pak typ 1A, užívaný kupř. v Japonsku, jež vhodnou velikostí přechodových zaoblení eliminuje možnost přetržení mimo pracovní část vzorku. [10]

Měření je realizováno na trhacím stroji, přičemž je sledována šířka pracovní části vzorku až do jeho přetržení. Hojně jsou využívány bezkontaktní měřicí zařízení. [10]

7.2 Dvouosý tah

V současnosti neexistuje žádná standardizovaná ISO metoda měření pro dvouosý tah. Měřící metoda je ojediněle používána především v průmyslových laboratořích. Nicméně výsledky měření dvouosé napjatosti jsou důležité pro teorii elasticity a jsou mnohdy nezbytné jakožto vstupní parametry pro FEM⁵ aplikace. Existují dvě varianty dvouosé tahové zkoušky: metoda tahového namáhání plochého prvku (vrstvy) a metoda nafukování plochého prvku (Obr. 10). [10]

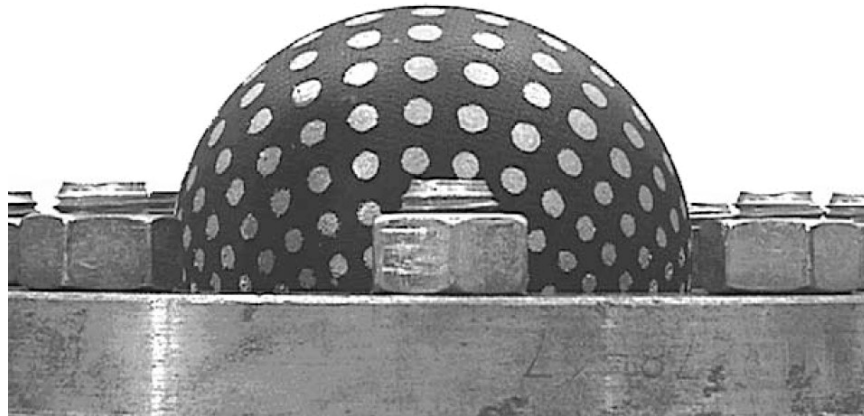
U zkoušky zatěžující tahem tvoří upínací zařízení dva členy, k nimž se zkušební těleso upíná uchopovacími lankami (Obr. 12). Tyto členy se vzájemně pohybují ve směru šipek. Pro zajištění rovnoměrného napínání vzorku, ve směru kolmém k hranám vzorku, jsou uchopovací lanka přes kladky napínána nezávisle na posouvajících členech. Napínání způsobuje deformaci v blízkosti hran vzorku. Deformace je měřena např. pomocí optického extenzometru, jež sleduje na měřeném vzorku vyznačenou mříž. [10]



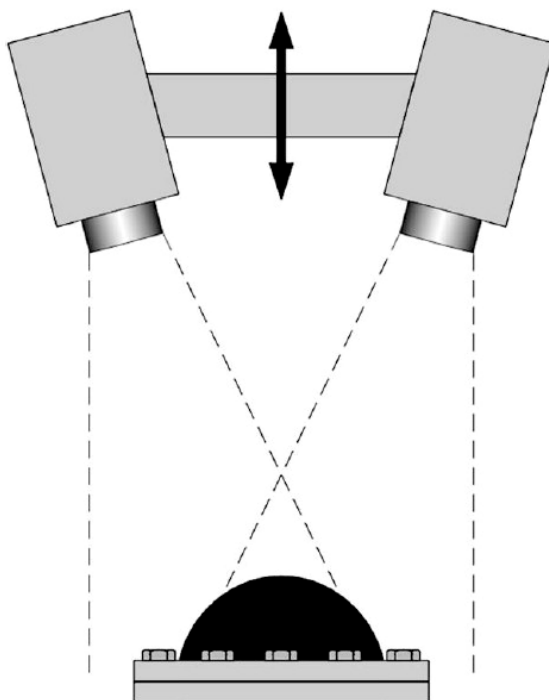
Obr. 12 Upínací systém pro dvouosý tah [10]

⁵ *Finite Elements Method* – metoda konečných prvků

V případě metody nafukování plochého prvku je vzorek uchycen po okrajích kruhovým prstencem k desce a nafukován tlakovým vzduchem přiváděným středovým otvorem desky. Měří se opticky poloměr vyboulení vzorku (Obr. 14), či deformace podle sítě namalované na měřeném vzorku. [10]



Obr. 13 Metoda nafukování plochého vzorku [2]



Obr. 14 Princip optického měření poloměru vydutí vzorku [2]

Pro výpočet nominálního napětí platí vztah:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t} = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t_0 \cdot \lambda_3}, \sigma_3 \approx 0 \quad (39)$$

Symbol p značí tlak plynu, r poloměr vyboulení, t_0 počáteční tloušťku vzorku, t tloušťku vzorku v okamžiku přírůstku a λ_3 deformaci ve směru radiální osy 3. [2]

7.3 Čistý smyk

Ideální případ čistého smyku lze dosáhnout tahovou zkouškou plochého vzorku, kdy šířka zatěžovaného vzorku je mnohem větší nežli jeho výška. Při zatěžování se příčné deformace blíží nule pouze uprostřed vzorku, kdežto rozložení napětí je poměrně nerovnoměrné. [2]



Obr. 15 Upínací zařízení pro měření čistého smyku [2]

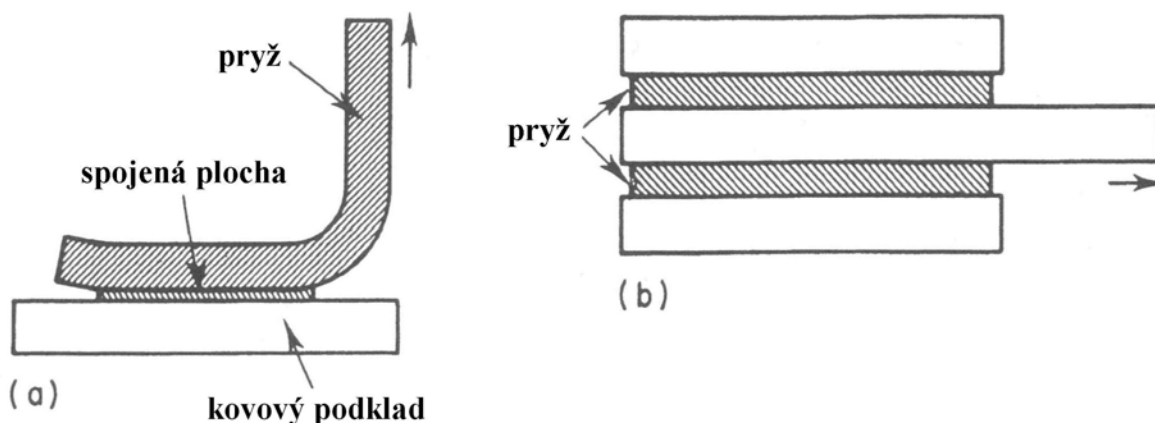
Testovací zařízení je velmi jednoduché, jelikož způsob měření napětí není složitý. Plochý pryžový vzorek je upnutý (popř. nalepený) na kovové čelisti (Obr. 15). [2]

Tímto způsobem upnutí vzorku lze volit velikost zatížení nezávisle na smršťování vzorku mezi čelistmi. Dodržením těchto okrajových podmínek lze uvažovat konstantní tloušťku a šířku na horním a spodním okraji vzorku. Tyto předpoklady jsou pak aplikovány ve FEM modelech.

Zatížení je realizováno konstantním posuvem, přičemž je monitorována poloha vedení a velikost zatížení.

8 Zkoušení soudržnosti pryže s kovem

Existuje několik způsobů testování soudržnosti mezi kovem a elastomerem. Nejjednodušší a nejefektivnější je pravděpodobně zkouška odlupu (Obr. 16a) a tzv. dvojitý smykový test (Obr. 16b). [1]



Obr. 16 Nejužívanější zkoušky soudržnosti pryže s kovem [10]

8.1 Zkouška odlupu

Metoda je definována normou ISO 813 pro odlup pod úhlem 90° . Zkušební vzorek pryže o tloušťce $6 \pm 0,1$ mm a šířce $25 \pm 0,1$ mm je spojen s 1,5 mm tlustým kovovým páskem po délce 25 mm. Pryž je odlupována konstantní rychlostí 50 ± 5 mm.min⁻¹ na trhacím stroji. Před započítáním zkoušky se vzorek nařízne v místě spojení. Tato operace slouží ke snížení pravděpodobnosti vzniku vad v pryži v průběhu testu. [10]

Britská norma BS 903: část A21.1 je shodná s normou ISO 813. Ekvivalentem je i norma ASTM D429 varianta B, lišící se pouze tloušťkou pryžové vrstvy, jež činí 6,3 mm. Norma ASTM D429 varianta E rovněž aplikuje shodnou geometrii. Vzorek je ale zatížen buďto břemenem konstantní hmotnosti nebo je protahován pod úhlem 90° rychlostí 50 mm.min⁻¹. [10]

Hodnota soudržnosti R se vyjádří vztahem:

$$R = \frac{F}{b} \cdot (\lambda - \cos \varphi) - W \cdot t_0, \quad (40)$$

kde W značí hustotu deformační energie, φ úhel odlupování, λ poměrné prodloužení, t_0 tloušťku nezatíženého pryžové vrstvy, b šířku vzorku a F zatěžující sílu. [1]

Pro případ lineárního napěťově-deformačního chování a za předpokladu, že odlupovaná část se nedeformuje, čili platí $\lambda = 1$, pak vztah (40) přechází na tvar:

$$R = \frac{F}{b} \cdot (1 - \cos \varphi). \quad (41)$$

Potom pro $\varphi = 90^\circ$ se vypočítá soudržnost dle vzorce:

$$R = \frac{F}{b} \quad (42)$$

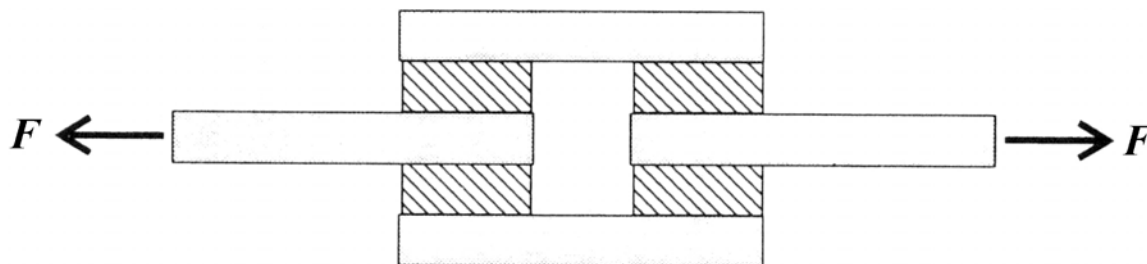
a pro $\varphi = 180^\circ$ je soudržnost vyjádřena vztahem:

$$R = 2 \cdot \frac{F}{b}. \quad (43)$$

Zkoušky prováděné při uspořádání pod úhlem odlupu 180° odstraňují nepřesnosti spojené se změnami úhlu odlupu při zkoušce s $\varphi = 90^\circ$. [1]

8.2 Dvojitý smykový test

Základ testu je popsán normou ISO 1827, vztahující se ke smykové zkoušce čtyřnásobné sendvičové konstrukce vzorku (Obr. 17). Obecně dvojitá sendvičová konstrukce zkušebního tělesa (Obr. 16b) je určena pro velmi tuhé pryžové materiály, jež se pod velkým zatížením výrazně nedeformují. V případě čtyřnásobné sendvičové konstrukce činí tloušťka pryžové vrstvy 4 ± 1 mm a délka 20 ± 5 mm. Zkušební těleso je zatěžováno rychlostí $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Měřená soudržnost je mnohem méně závislá na tvarovém faktoru zkušebního tělesa nežli u tahových zkoušek. Britským ekvivalentem je norma BS 903 část A14. [10]



Obr. 17 Čtyřnásobná sendvičová konstrukce zkušebního tělesa [1]

Stejnou geometrii užívá i norma ASTM D429 varianta H. Zde však není měřena soudržnost. Místo toho je mezi dva centrální kovové bloky umístěn nylonový hranol, načež je celý vzorek následně vystaven definovanému vlivu stárnutí. Po určité době expozice je vzorek odlehčen a měří se stupeň oddělení pryže od kovu. [10]

Norma ASTM D429 varianta G používá stejný princip expozice zkušební vzorku pod zatížením. Avšak v tomto případě má zkušební těleso geometrii dvojnásobného sendviče v sériovém uspořádání, nikoliv paralelním. [10]

Metody G a H nelze srovnávat s ostatními zkouškami soudržnosti. Lze je označit jako statické únavové zkoušky. Jejich hlavní účel spočívá v možnosti zkoušení v agresivním prostředí. [10]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

1 Zadání

Cílem diplomové práce je experimentální stanovení soudržnosti pojiv aplikovaných při výrobě pryžokovových kanálových vpustí společnosti AB Elpo s.r.o a numerická analýza mechanických vlastností kanálové vpusti typu 1 A.

2 Měření soudržnosti pojiv

2.1 Použitá pojiva

Plaston PP 010

Výrobce je firma Plastor spol. s r. o.. Jedná se o polyuretanový dvousložkový prepolymer na bázi MDI a PPG⁶ s 10 % volných izokyanátových skupin. MDI izokyanáty používané při výrobě pochází od společnosti Bayer MaterialScience. Nesou obchodní označení Desmodur 3230.

MDI

Základem pojiva jsou izokyanáty, konkrétně methylen difenyl diizokyanát.

2.2 Tahová metoda

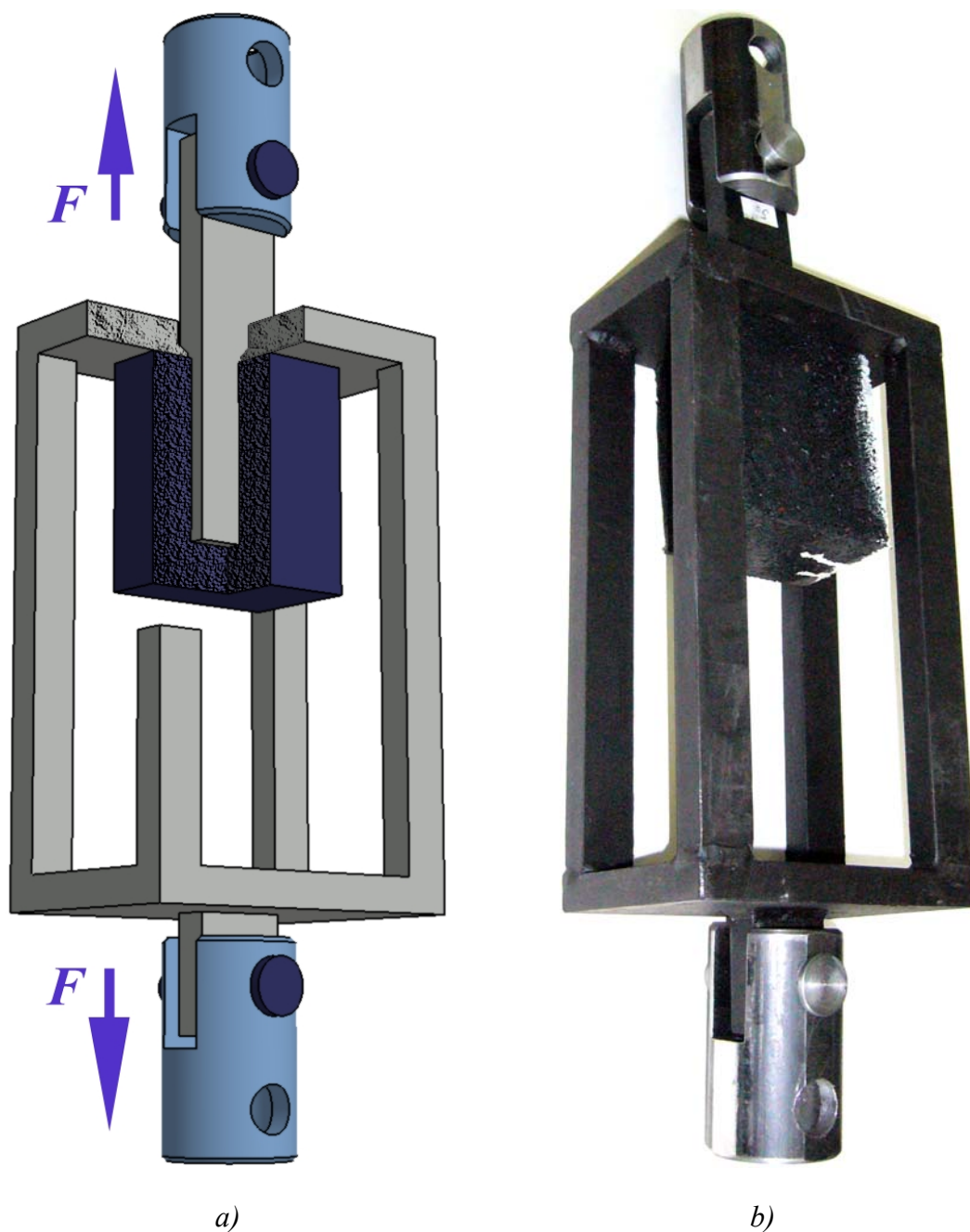
Společnost AB Elpo zpracovává při výrobě svých produktů recyklovanou pryž. Jemná drť odpadní pryže z pneumatik se zpracovává ve směsi s pojivem Plaston PP 010. Maximální podíl pojiva ve směsi činí 10 %. Podíl se ovšem různí podle konkrétního výrobku. Hustota směsi se pohybuje v rozmezí 950 – 1000 kg.m⁻³. Lisování probíhá při teplotě 80 °C. Tlak se různí podle tvaru výrobku a odvíjí se od požadované homogenity a hustoty výsledného materiálu.

Vylisovaný kompozitní materiál se vyznačuje výbornými tlumícími vlastnostmi a velkou odolností vůči tlakovému namáhání. Nevýhodou kompozitu je nízká strukturní pevnost v tahu. Z toho důvodu, pro objektivní posouzení kvality spojení při tahovém namáhání, nebylo možné měření soudržnosti provádět dle normovaných zkoušek odlupu (dle ISO 813), či dvojitého smykového testu (dle ISO 1827). Zcela jistě by docházelo při měření k lomu v pryžovém kompozitu (tzv. vadě R [3]).

⁶ polypropylen glykol

2.2.1 Podstata zkoušky

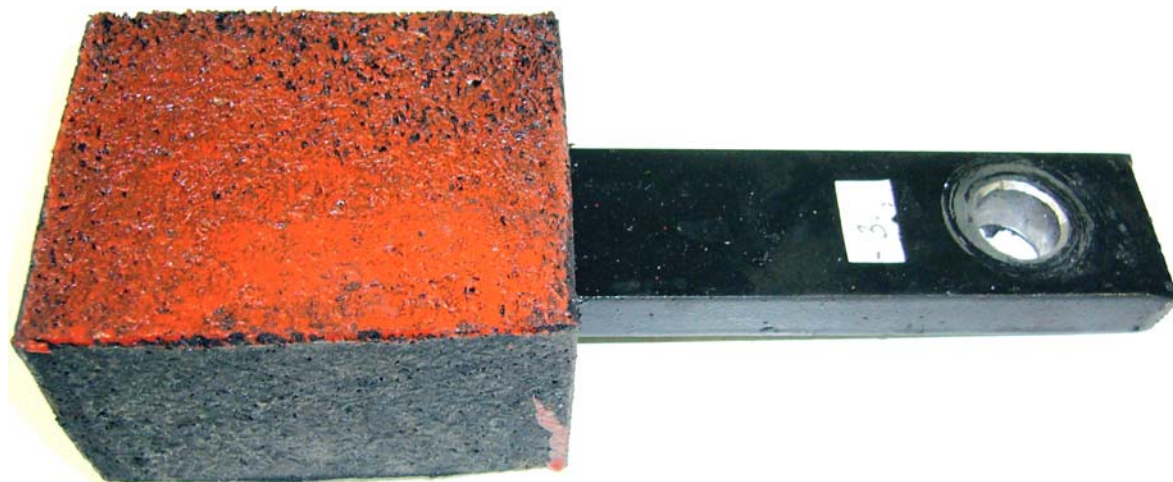
Bylo nutné navrhnout speciální přípravek pro měření soudržnosti spojení mezi ocelovým jádrem a nalisovanou kompozitní vrstvou daných vzorků (Obr. 18b). Zkušební přípravek umožňuje cíleně měřit pevnost spojení mezi ocelovým jádrem a nalisovanou vrstvou kompozitního materiálu. Na Obr. 18a je znázorněn princip zkoušky. Výkresová dokumentace navrženého zkušebního přípravku a zkušebního tělesa je uvedena v přílohách P I – IX.



Obr. 18 Zkušební přípravek

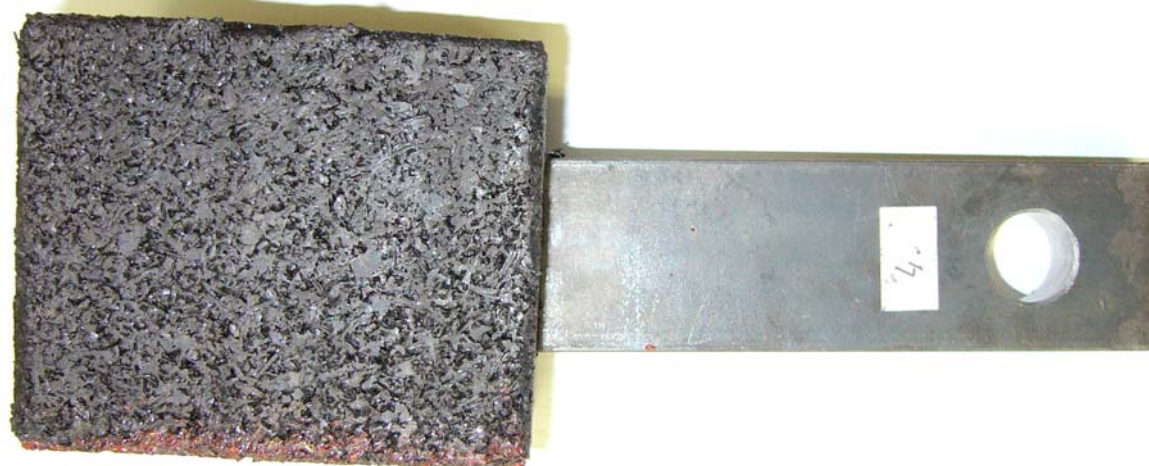
2.2.2 Zkušební vzorky

Zkušební tělesa byla vyrobena firmou AB Elpo v provizorní lisovací formě. Skládají se z ocelového jádra, na němž je nalisována kompozitní pryžová vrstva (Obr. 19). Jádro je vyrobeno z ploché tyče, oceli S355JO (11 523). Šířka profilu tyče činí 40 mm a tloušťka 15 mm. Rozměry profilu jsou shodné s tyčovinou používanou pro výrobu výztuhy kanálových vpustí. Tloušťka nalisované vrstvy kompozitního materiálu činí přibližně 20 mm.



Obr. 19 Zkušební těleso

Při vyjímání vylisovaných vzorků občas docházelo ke vzniku vad. Příčinou byla vysoká teplota při vyjímání z formy. Docházelo k posunutí jádra a tím pádem i k narušení spoje a celkové souměrnosti vzorku (Obr. 20). Tyto vady měly zásadní vliv na výsledky měření.



Obr. 20 Vadné zkušební těleso

Vyrobena bylo 6 sad zkušebních těles s různými kombinacemi pojiv a povrchových úprav. Pro každou sadu bylo vyrobeno 5 zkušebních vzorků. Dodatečně pak byly vyrobeny 3 sady zkušebních těles, po deseti kusech, pro typy spojů s nejlepšími naměřenými výsledky.

2.2.3 Zkušební zařízení

Trhací stroj

Při měření byl použit trhací stroj Zwick 1456 s maximálním zatížením 22 kN.



Postup zkoušky

Zkušební těleso bylo vloženo do zkušebního přípravku tak, aby tah byl rozložen rovnoměrně na zatěžovanou plochu nalisované vrstvy tělesa (Obr. 21). V průběhu měření se průběžně zaznamenávala změna deformace a síly s přesností $\pm 2\%$. Jmenovitá rychlost příčnicku s pohyblivou upínací čelistí byla $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Zkušební teplota

Zkouška probíhala ve všech případech při laboratorní teplotě.

Obr. 21 Zkušební přípravek na trhacím stroji

Použitá měřidla

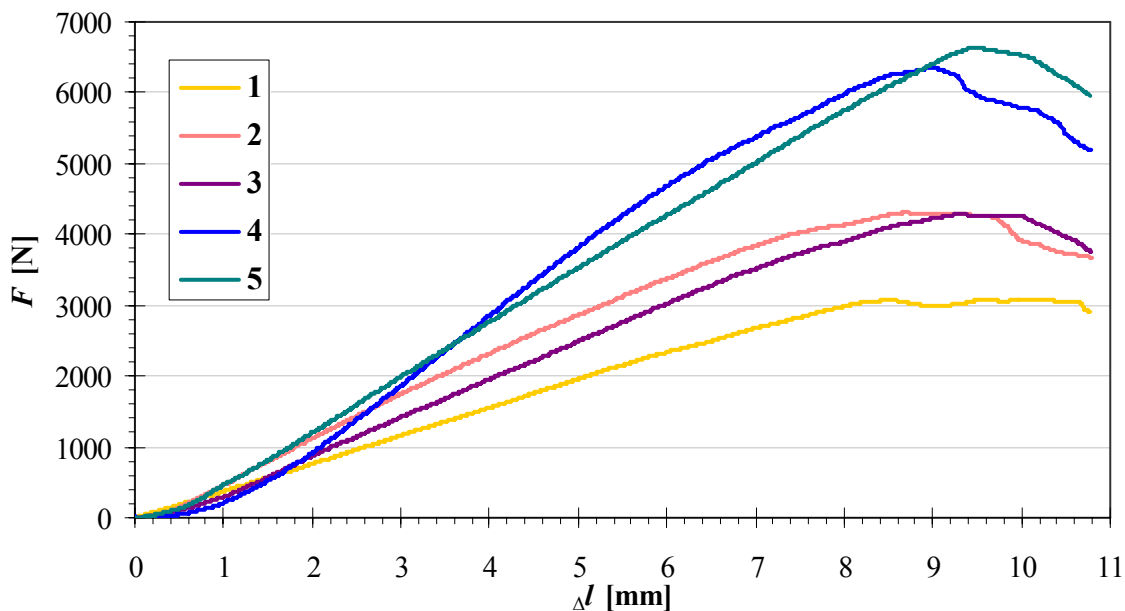
Posuvné měřidlo Mitutoyo 500 – 181U (přesnost: 0,01 mm, měřicí rozsah: 0 – 150 mm)

Zpracování naměřených dat

Naměřená data byla zaznamenána počítačem. Příslušným programem byla graficky vyhodnocena závislost síly na deformaci pro každé zkušební těleso. Program dále prováděl statistické zpracování pro jednotlivé typy spojů. Výsledky jsou uvedeny v tab. 9 - 17.

2.2.4 Výsledky měření tahové zkoušky

1. Pískované jádro, opatřené nátěrem ředěného prepolymeru Plaston PP 010



Obr. 22 Závislost síly na deformaci pro 1. typ spojení

Z výsledků měření je patrné, že pískovaný povrch jádra v kombinaci s nátěrem prepolymeru zvýšil pevnost spojení, obzvláště u 4. a 5. vzorku (Obr. 22). Geometrické nepřesnosti polohy jádra u některých těles nicméně způsobily nesouměrné zatížení spojení, a tudíž i nepřesnosti ve výsledcích.

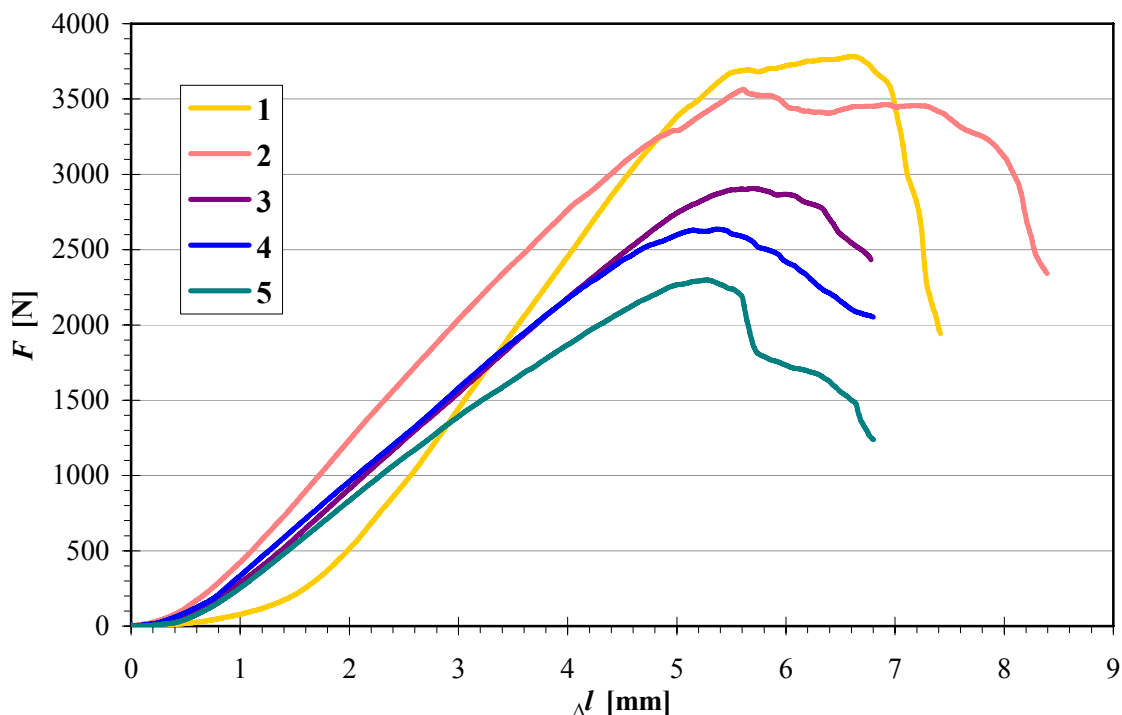
Tab. 9 Naměřené hodnoty pro 1. typ spojení

n	F_{max} [N]	$\Delta l_{F_{max}}$ [mm]	l [mm]	S [cm ²]
1	3081,72	10,12	66,5	79,48
2	4310,83	8,71	67,15	80,20
3	4281,42	9,31	66,6	79,59
4	6358,69	8,98	69,3	82,57
5	6645,06	9,48	69,6	82,90
\bar{x}	4935,54	9,32	67,83	80,95
s	1516,79	0,54	1,50	1,66
\tilde{x}	4310,83	9,31	67,15	80,20
v [%]	30,73	5,76	2,2	2,1

V uvedené tabulce l značí zalisovanou délku jádra, S pak celkovou plochu spojení.

2. Pískované jádro, bez nátěru

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 23.



Obr. 23 Závislost síly na deformaci pro 2. typ spojení

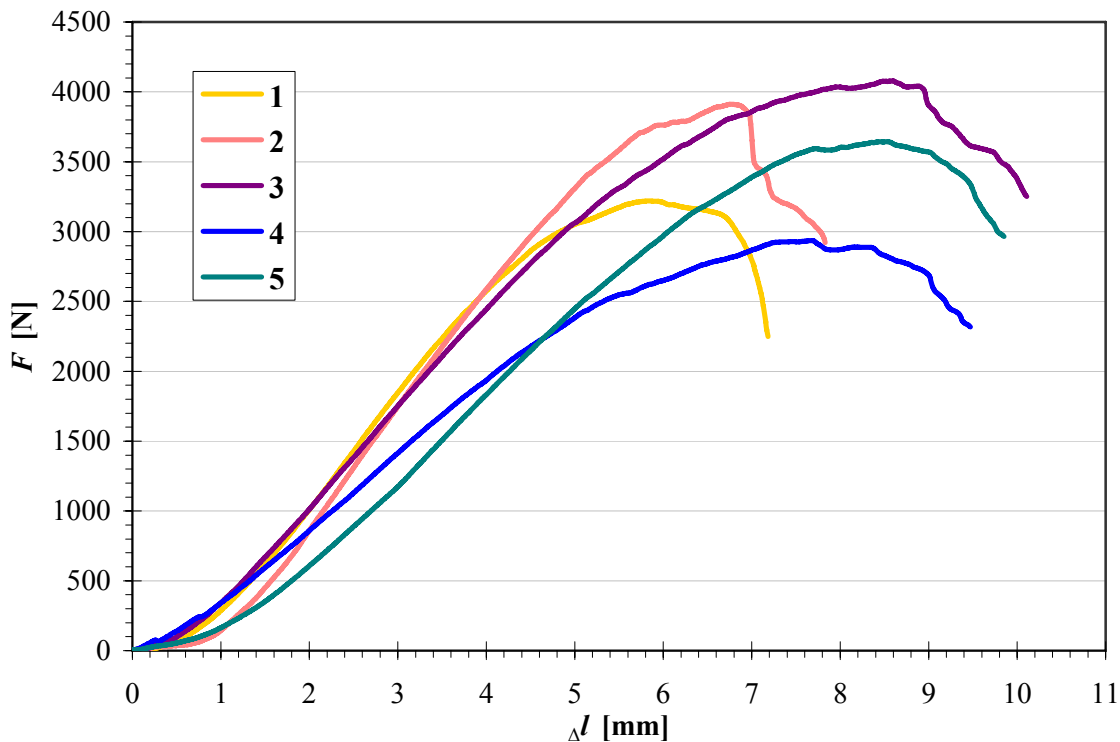
Spojení realizované pouze pískovaným povrchem jádra bez nátěru pojiva vykazuje průměrnou pevnost. U některých měření se navíc opět projeví větší odchylky v důsledku nepřesné polohy jádra zkušebních těles.

Tab. 10 Naměřené hodnoty pro 2. typ spojení

n	F_{max} [N]	Δl_{Fmax} [mm]	l [mm]	S [cm ²]
1	3781,4	6,62	69,05	82,30
2	3563,83	5,61	68,64	81,84
3	2905,58	5,69	67,46	80,54
4	2635,64	5,37	67,43	80,51
5	2298,14	5,28	64,73	77,53
\bar{x}	3036,918	5,714	67,46	80,54
s	623,690	0,534	1,686	1,86
\tilde{x}	2905,580	5,610	67,460	80,54
v [%]	20,54	9,34	2,5	2,31

3. Nepískované jádro, opatřené nátěrem ředěného prepolymeru Plaston PP 010

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 24.



Obr. 24 Závislost síly na deformaci pro 3. typ spojení

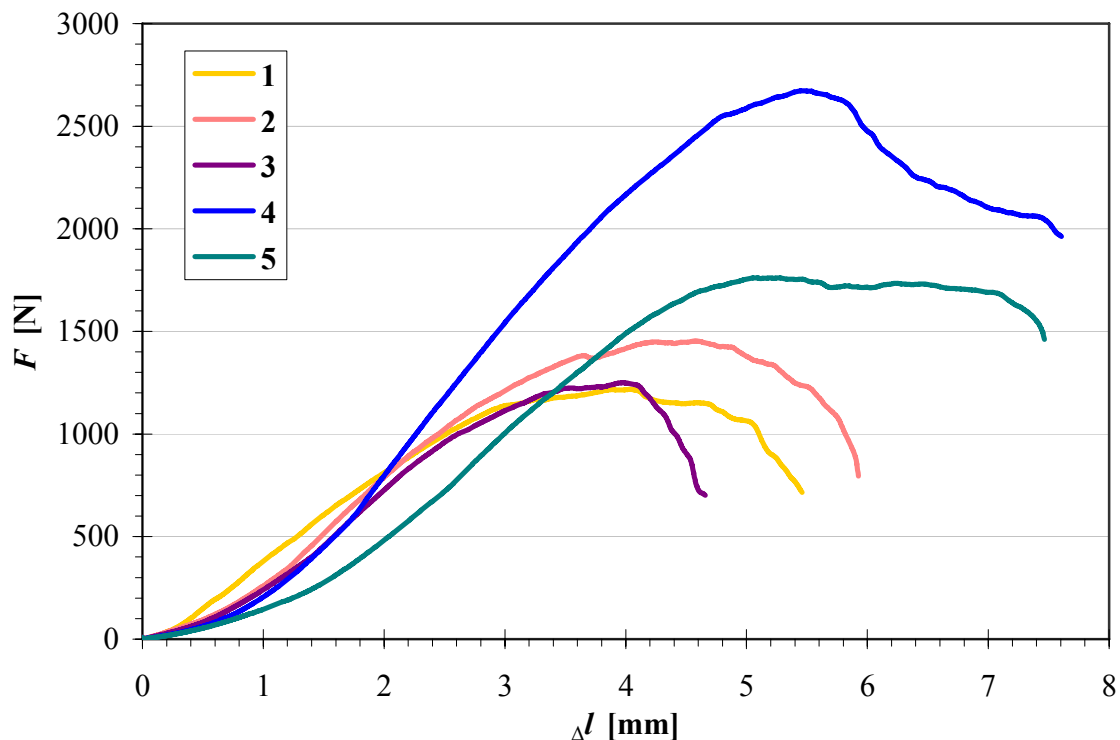
U vzorků pojených pouze prepolymerem Plaston PP 010 se neprojevovalo výrazné zvýšení soudržnosti spoje oproti předchozímu typu spoje. V průběhu měření došlo pouze v jednom případě ke vzniku odchylky. Příčinou byla tentokrát malá hloubka zalisování jádra.

Tab. 11 Naměřené hodnoty pro 3. typ spojení

n	F_{max} [N]	Δl_{Fmax} [mm]	l [mm]	S [cm ²]
1	3219,74	5,82	69,11	82,36
2	3911,66	6,76	69,62	82,93
3	4079,32	8,59	70,81	84,24
4	2936,58	7,67	66,8	79,81
5	3643,3	8,53	69,2	82,46
\bar{x}	3558,12	7,474	69,108	82,36
s	475,581	1,188	1,457	1,61
\tilde{x}	3643,300	7,670	69,200	82,46
v [%]	13,37	15,89	2,11	1,95

4. Nepískované jádro, bez nátěru

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 25.



Obr. 25 Závislost síly na deformaci pro 4. typ spojení

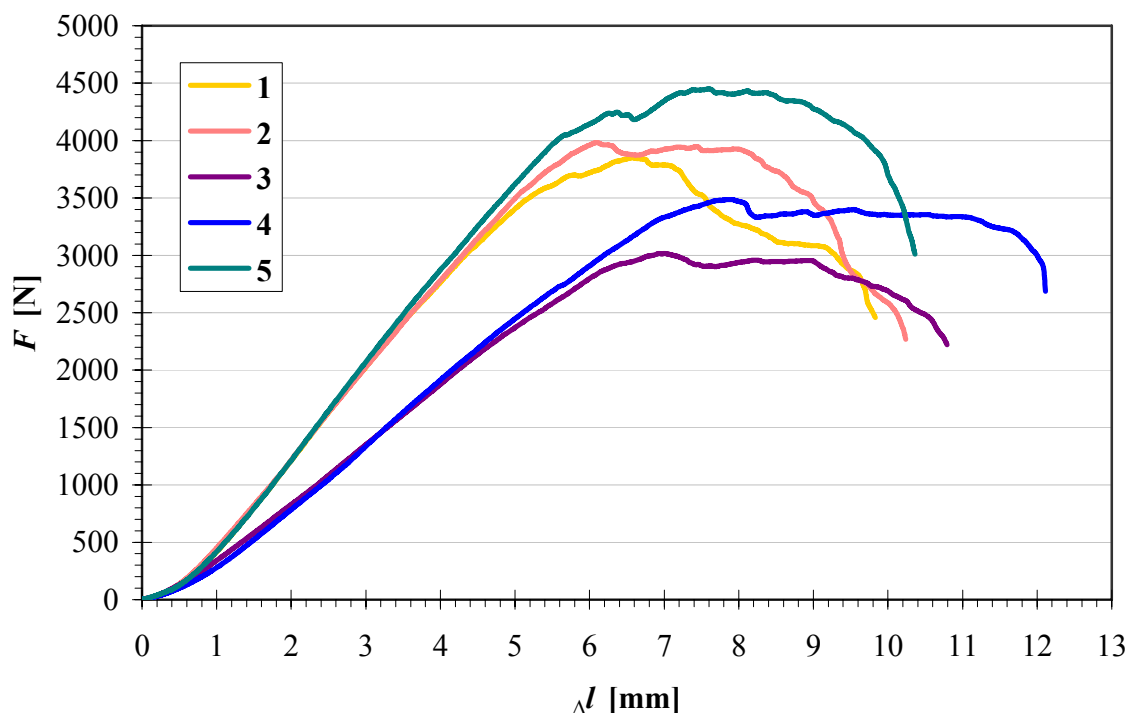
Vzorky bez jakéhokoliv pojiva, či úpravy povrchu jádra vykazovaly vůbec nejnižší hodnoty pevnosti spojení. V průběhu měření došlo pouze v jednom případě k naměření vyšší soudržnosti spoje.

Tab. 12 Naměřené hodnoty pro 4. typ spojení

n	F_{max} [N]	$\Delta l_{F_{max}}$ [mm]	l [mm]	S [cm ²]
1	1217,6	4,03	67,61	80,71
2	1452,5	4,58	69,75	83,07
3	1249,8	3,98	67,81	80,93
4	2673,33	5,46	69,51	82,80
5	1761,1	5,08	69,75	83,07
\bar{x}	1670,866	4,626	68,886	82,12
s	600,730	0,647	1,080	1,19
\tilde{x}	1452,500	4,580	69,510	82,80
v [%]	35,95	13,99	1,57	1,45

5. Nepískované jádro, opatřené nátěrem polyuretanového pojiva MDI

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 26.



Obr. 26 Závislost síly na deformaci pro 5. typ spojení

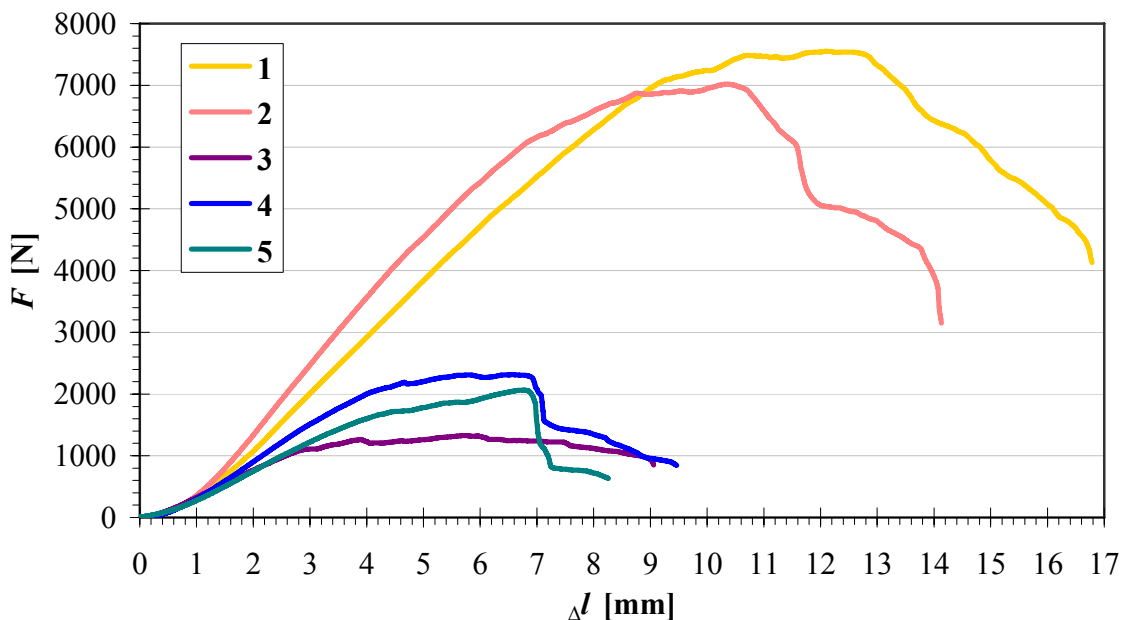
Nátěr polyuretanového pojiva MDI dopomohl ke zvýšení pevnosti spojení. U tří těles byla naměřená hodnota soudržnosti přibližně srovnatelná. Odchylky u zbylých dvou byly opět způsobeny nepřesnou geometrií vzorku.

Tab. 13 Naměřené hodnoty pro 5. typ spojení

n	F_{max} [N]	Δl_{Fmax} [mm]	l [mm]	S [cm ²]
1	3851,04	6,56	67,63	80,73
2	3983,58	6,1	68,6	81,80
3	3015,19	7,01	62,28	74,82
4	3487,63	7,91	67,55	80,64
5	4450,29	7,61	69,25	82,52
\bar{x}	3757,546	7,038	67,062	80,10
s	539,369	0,741	2,765	3,05
\tilde{x}	3851,040	7,010	67,630	80,73
v [%]	14,35	10,53	4,12	3,81

6. Pískované jádro, opatřené nátěrem polyuretanového pojiva MDI

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 27.



Obr. 27 Závislost síly na deformaci pro 6. typ spojení

Kombinací pískovaného jádra a nátěru polyuretanového pojiva MDI se docílilo u dvou měření vysoké hodnoty soudržnosti spoje. U zbylých tří byla naměřena spíše podprůměrná hodnota soudržnosti. Tyto odchylky byly opět zapříčiněny vadnými zkušebními tělesy. Měření je tudíž zatíženo poměrně velkou chybou, což lze vydedukovat z hodnoty variačního koeficientu měření sil $v = 73,39\%$ (Tab. 14).

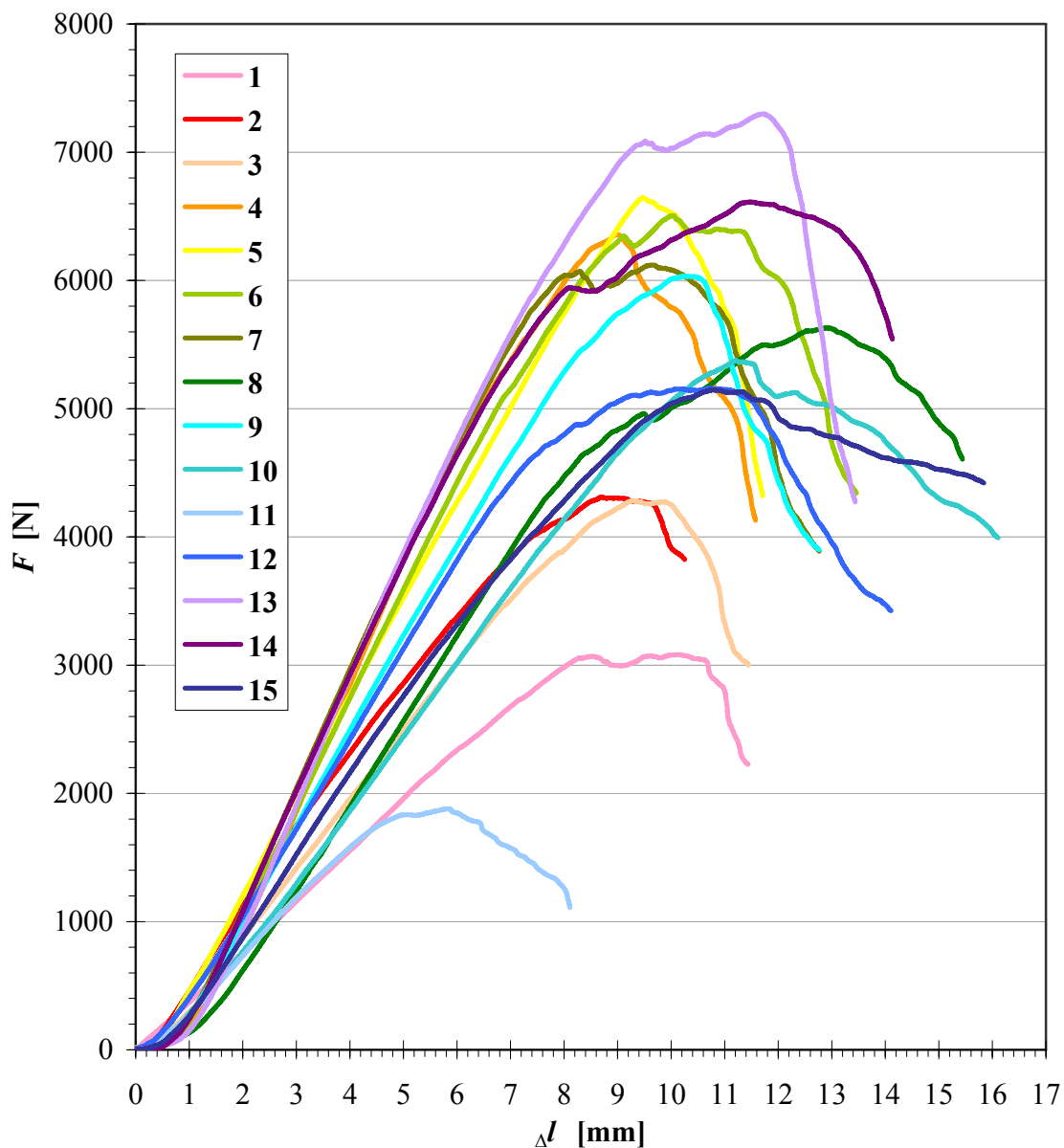
Tab. 14 Naměřené hodnoty pro 6. typ spojení

n	F_{max} [N]	Δl_{Fmax} [mm]	l [mm]	S [cm ²]
1	7552,84	12,09	69,81	83,14
2	7020,15	10,33	68,86	82,09
3	1326,8	5,72	68,16	81,31
4	2315,71	6,57	68,44	81,62
5	2065,92	6,78	68,4	81,58
\bar{x}	4056,284	8,298	68,734	81,95
s	2977,064	2,759	0,652	0,72
\tilde{x}	2315,710	6,780	68,440	81,62
v [%]	73,39	33,25	0,95	0,88

2.2.5 Dodatečná měření

Z předchozích měření projevily nejlepší výsledky sady č. 1, 3 a 5. Pro zpřesnění výsledků byly pro tyto varianty spojů dodatečně vyrobeny tělesa po deseti kusech.

1. Pískované jádro, opatřené nátěrem ředěného prepolymeru Plaston PP 010



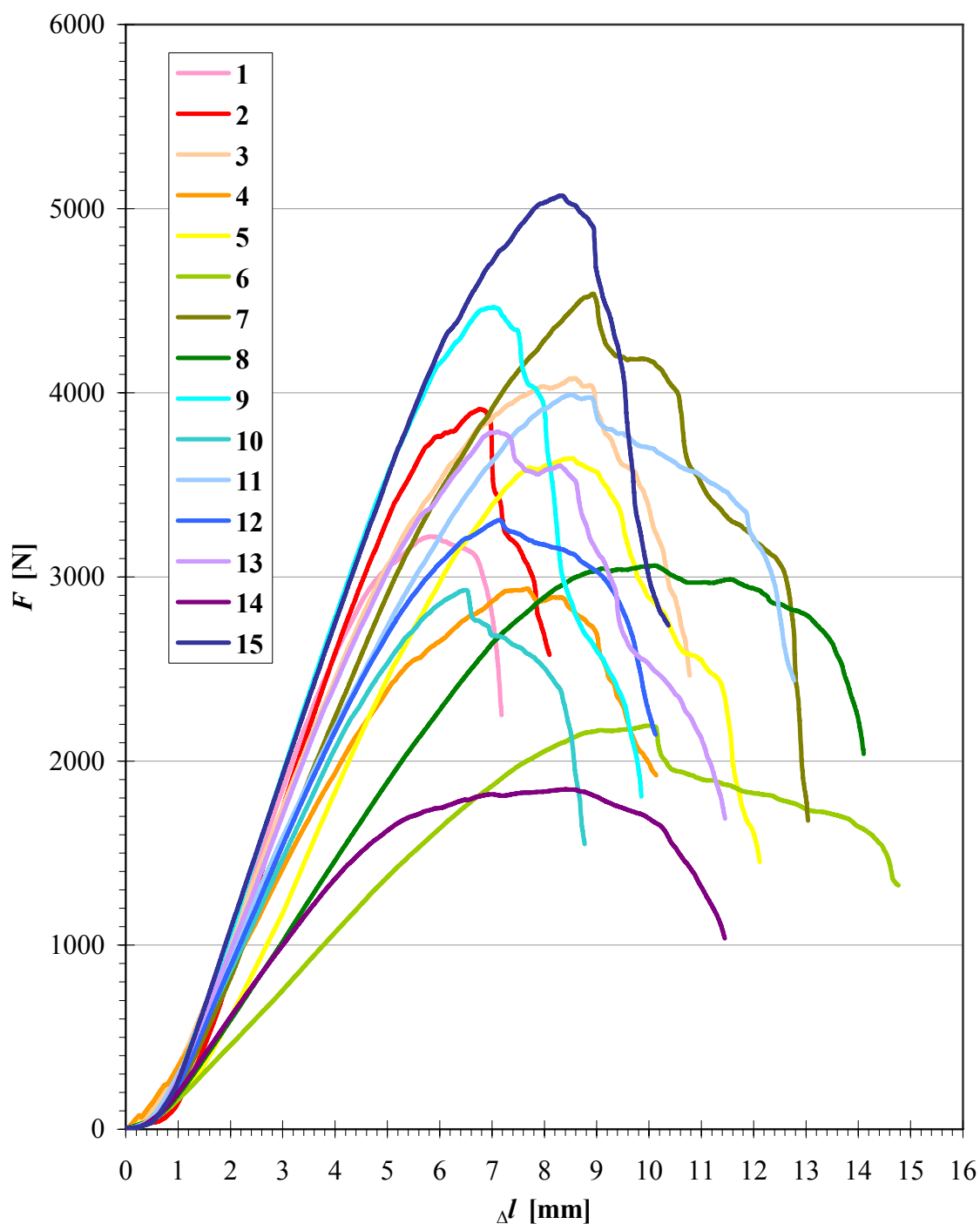
Obr. 28 Závislost síly na deformaci pro 1. typ spojení

Výsledky dodatečných měření prokázaly vyšší pevnost spojení. U většiny vzorků se maximální zatížení spoje pohybuje v rozmezí 5 až 6,6 kN (Tab. 15). V ostatních případech vadná geometrie zkušebních těles způsobila při měření nesouměrné zatížení spojení a tudíž i nepřesnosti ve výsledcích.

Tab. 15 Naměřené hodnoty pro 1. typ spojení

n	F_{max} [N]	Δl_{Fmax} [mm]	l [mm]	S [cm ²]
1	3081,72	10,12	66,5	79,48
2	4310,83	8,71	67,15	80,20
3	4281,42	9,31	66,6	79,59
4	6358,69	8,98	69,3	82,57
5	6645,06	9,48	69,6	82,90
6	6506,14	10,05	67,44	80,18
7	6119,31	9,66	68,7	81,57
8	5629,15	12,89	67,52	80,27
9	6612,22	11,48	69,48	82,43
10	6034,69	10,24	68,96	81,86
11	5373,96	11,21	69,49	82,44
12	1878,67	5,82	68,73	81,60
13	5160,89	10,73	68,9	81,79
14	7298,87	11,69	68,23	81,05
15	5145,71	10,8	70,24	83,26
\bar{x}	5362,49	10,08	68,46	81,30
s	1465,16	1,63	1,16	1,28
\tilde{x}	5629,15	10,12	68,73	81,60
v [%]	27,32	16,14	1,69	1,57

3. Nepískované jádro, opatřené nátěrem ředěného prepolymeru Plaston PP 010



Obr. 29 Závislost síly na deformaci pro 3. typ spojení

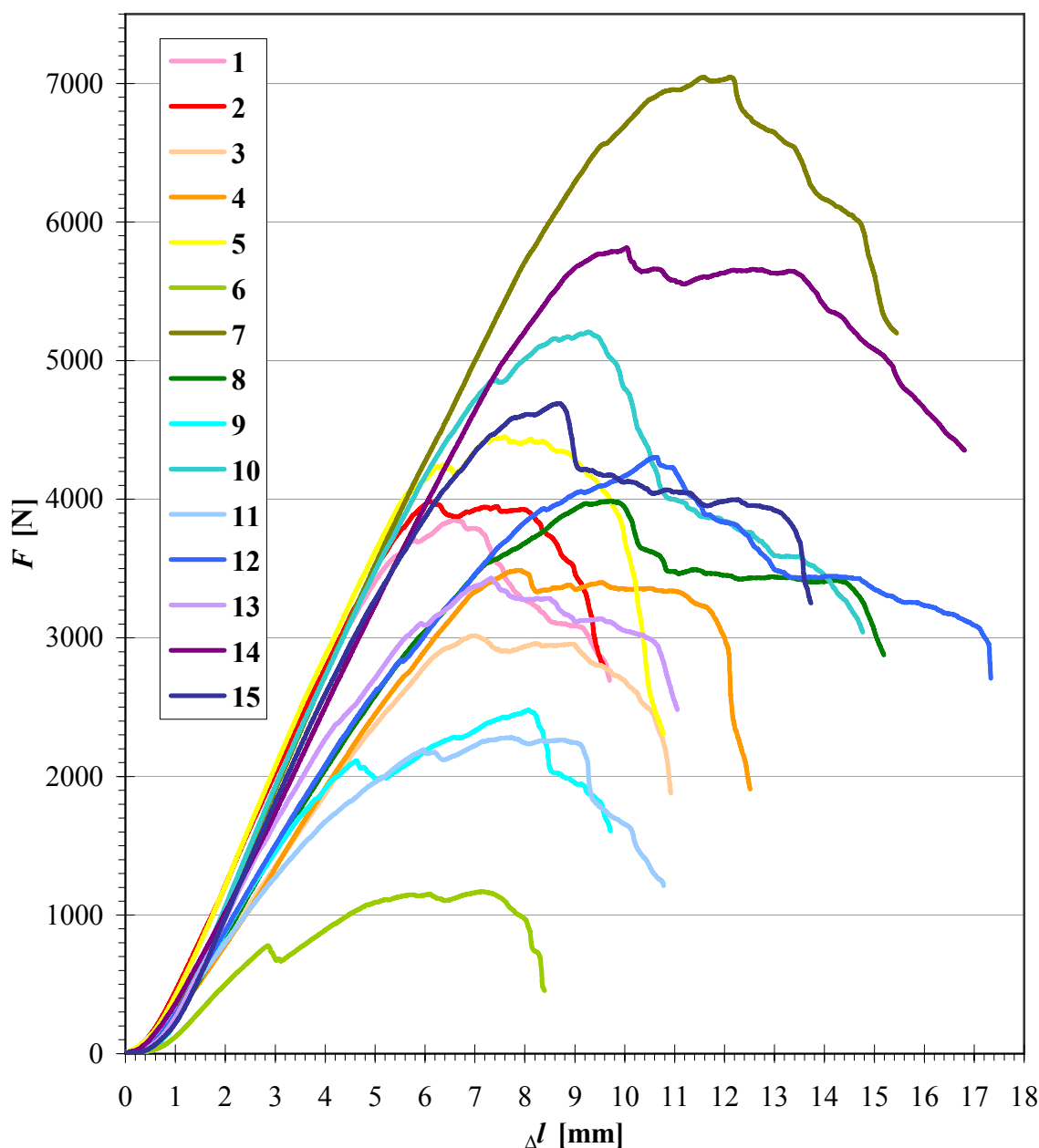
Převážná většina měření prokázala pevnost spojení do zatížení 3 až 4,5 kN. V průběhu měření došlo v několika případech ke vzniku odchylek v důsledku výše popsanych vad zkušebních těles.

Tab. 16 Naměřené hodnoty pro 3. typ spojení

n	F_{max} [N]	Δl_{Fmax} [mm]	l [mm]	S [cm ²]
1	3219,74	5,82	69,11	82,36
2	3911,66	6,76	69,62	82,93
3	4079,32	8,59	70,81	84,24
4	2936,58	7,67	66,8	79,81
5	3643,3	8,53	69,2	82,46
6	2192,25	10,02	69,93	82,92
7	4537,67	8,93	70,06	83,07
8	3061,63	10,11	69,06	81,97
9	4464,73	7,03	70,37	83,41
10	2929,54	6,49	67,86	80,65
11	3990,94	8,52	68,04	80,84
12	3308,06	7,14	68,94	81,83
13	3788,68	7,12	70,96	84,06
14	1846,2	8,38	67,86	80,65
15	5070,71	8,32	67,4	80,14
\bar{x}	3532,07	7,96	69,068	82,09
s	874,43	1,24	1,261	1,40
\tilde{x}	3643,30	8,32	69,110	82,36
v [%]	24,76	15,62	1,83	1,71

5. Nepískované jádro, opatřené nátěrem polyuretanového pojiva MDI

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 30.



Obr. 30 Závislost síly na deformaci pro 5. typ spojení

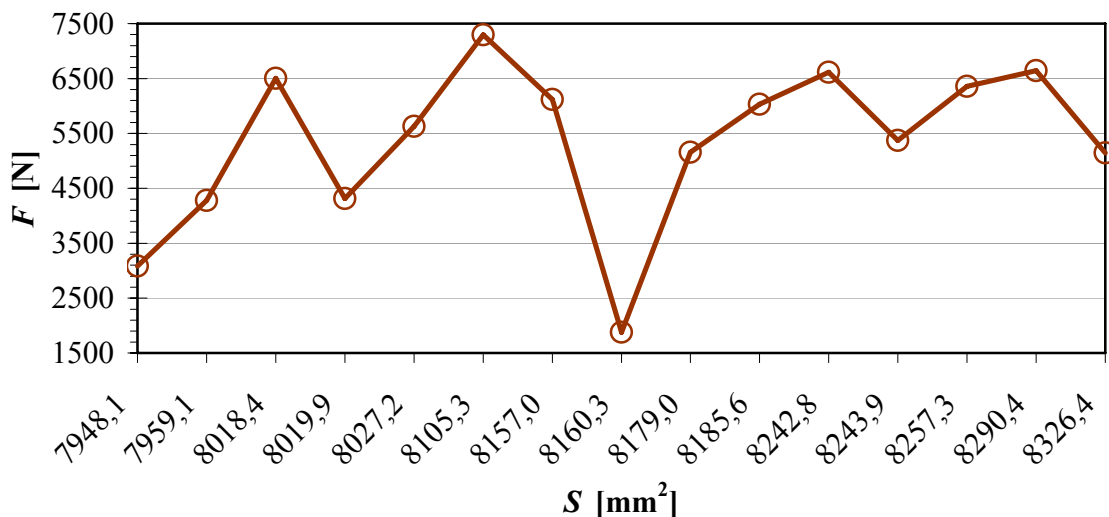
Měřením se nepotvrdil příznivý vliv polyuretanového pojiva MDI na pevnost spoje. U většiny těles bylo naměřeno maximální zatížení v rozmezí 3 až 5 kN. Jen ve dvou případech bylo naměřeno max. zatížení nad 5,5 kN. I zde byly geometrické nepřesnosti těles hlavní příčinou odchylek v měření. V několika případech došlo i k tzv. poruše R , tedy lomu ve vrstvě kompozitu.

Tab. 17 Naměřené hodnoty pro 5. typ spojení

n	F_{max} [N]	Δl_{Fmax} [mm]	l [mm]	S [cm ²]
1	3851,04	6,56	67,63	80,73
2	3983,58	6,1	68,6	81,80
3	3015,19	7,01	62,28	74,82
4	3487,63	7,91	67,55	80,64
5	4450,29	7,61	69,25	82,52
6	1170,29	7,16	69,24	82,16
7	7044,36	12,12	69,15	82,07
8	3987,16	9,71	69,65	82,62
9	2479,13	8,06	69,94	82,93
10	5205,58	9,26	68,72	81,59
11	2280,47	7,74	69,33	82,26
12	4301,91	10,64	70,16	83,18
13	3429,27	7,33	70,04	83,04
14	5812,49	10,04	68,54	81,39
15	4690,94	8,69	70,06	83,07
\bar{x}	3945,96	8,40	68,68	81,65
s	1453,86	1,66	1,95	2,05
\tilde{x}	3983,58	7,91	69,24	82,16
v [%]	36,84	19,83	2,84	2,51

2.2.6 Vliv velikosti plochy spoje na soudržnost

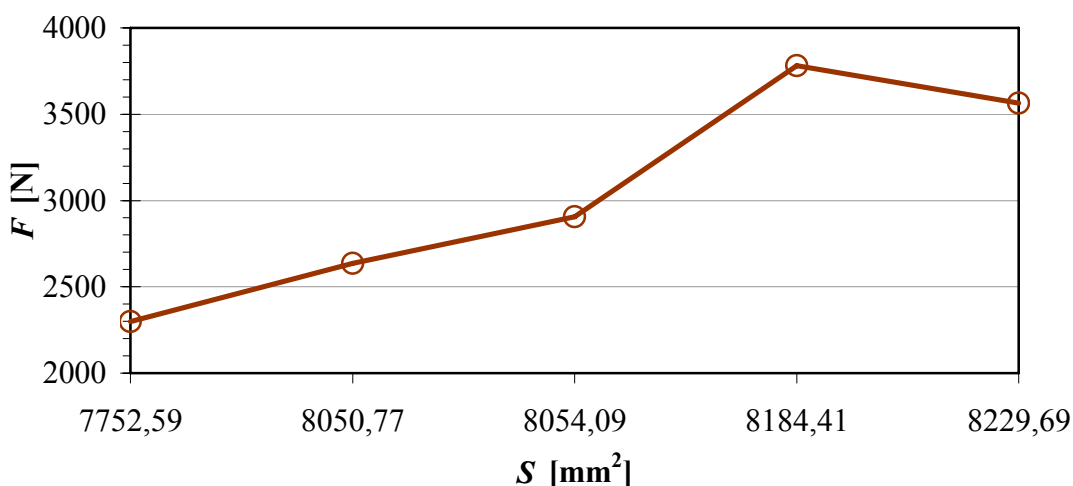
1. Pískované jádro, opatřené nátěrem ředěného prepolymeru Plaston PP 010



Obr. 31 Závislost síly na velikosti plochy pro 1. typ spoje

Z grafické závislosti (Obr. 31) je zřejmé, že velikost zalisované plochy jádra do jisté míry zvyšuje pevnost spoje. Nicméně výsledky nejsou zcela prokazatelné, jelikož měření v některých případech bylo nepříznivě ovlivněno geometrickými nepřesnostmi vzorků.

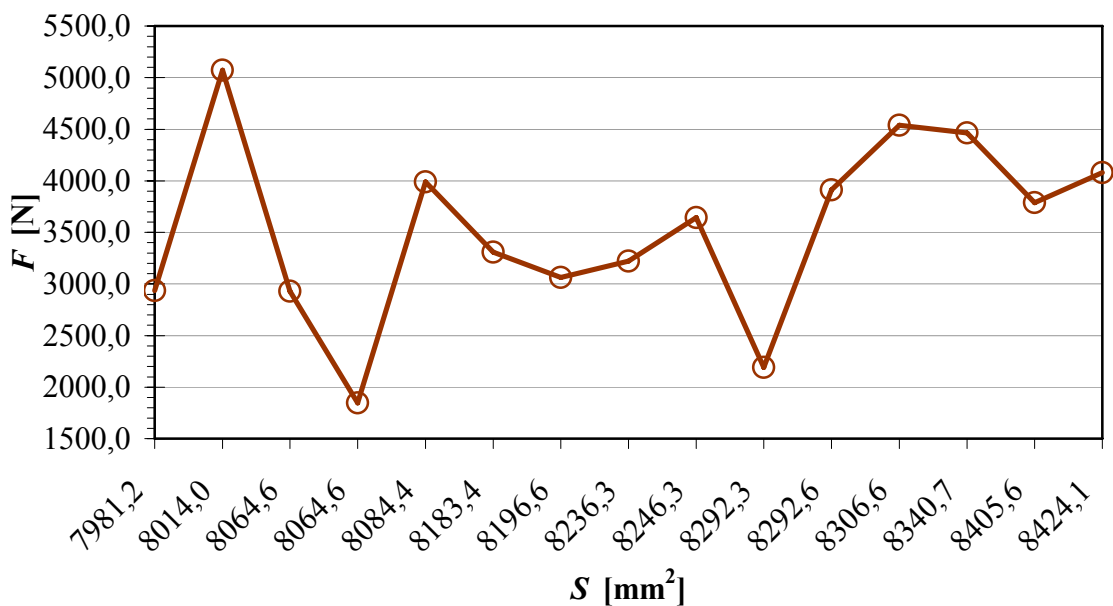
2. Pískované jádro, bez nátěru



Obr. 32 Závislost síly na velikosti plochy pro 2. typ spoje

V případě spojení pískovaného jádra s kompozitem bez nátěru se prokázal příznivý vliv velikosti zalisovaného povrchu jádra na soudržnosti spoje. Z grafického vyjádření (Obr. 32) je zřejmá převážně rostoucí tendence závislosti.

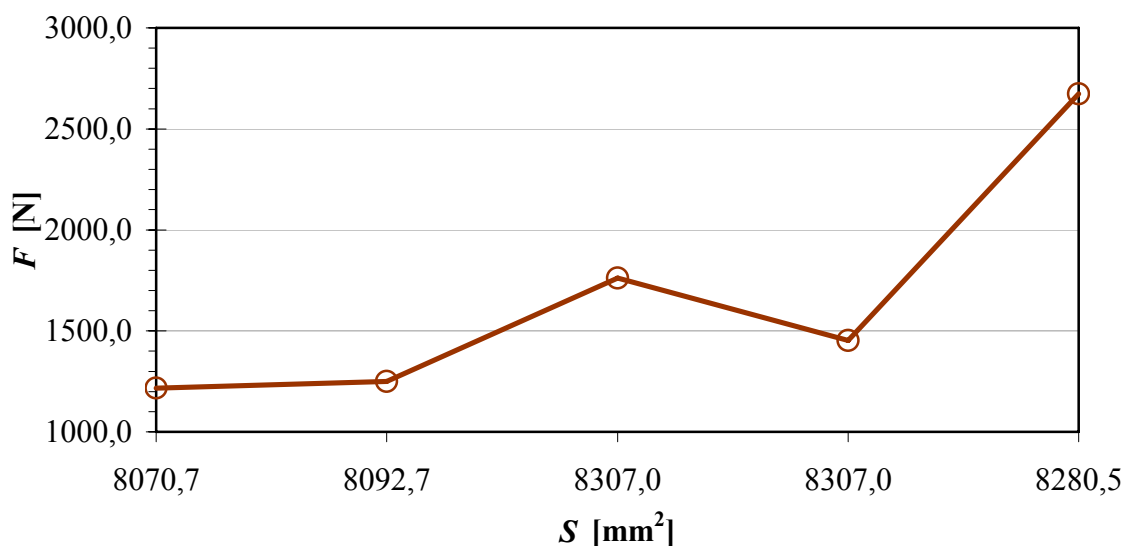
3. Nepískované jádro, opatřené nátěrem ředěného prepolymeru Plaston PP 010



Obr. 33 Závislost síly na velikosti plochy pro 3. typ spoje

I přes zjevné odchylky v měření je možné v grafické závislosti (Obr. 33) vypočítat částečně příznivý vliv velikosti plochy na soudržnost spoje.

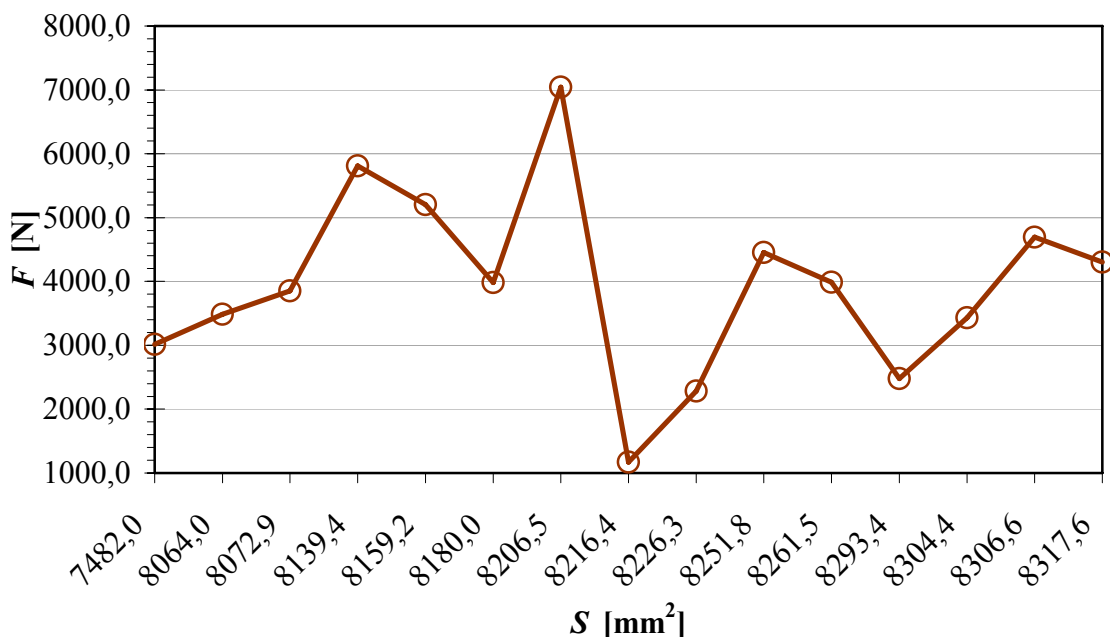
4. Nepískované jádro, bez nátěru



Obr. 34 Závislost síly na velikosti plochy pro 4. typ spoje

U spojení nepískovaného jádra s kompozitem bez nátěru byl částečně prokázán příznivý vliv velikosti zalisovaného povrchu jádra na soudržnosti spoje. Z grafického vyjádření (Obr. 34) je zřejmá převážně rostoucí tendence závislosti.

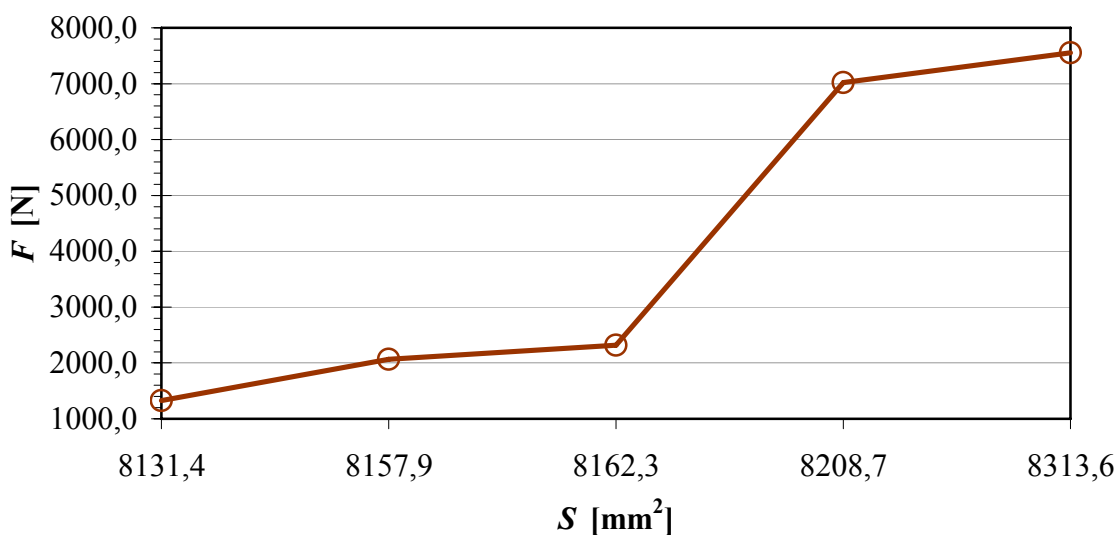
5. Nepískované jádro, opatřené nátěrem polyuretanového pojiva MDI



Obr. 35 Závislost síly na velikosti plochy pro 5. typ spoje

Měření bylo opět poznamenáno geometrickými nepřesnostmi vzorků. Z toho důvodu nebylo možné z grafické závislosti (Obr. 35) určit vliv velikosti plochy spoje na soudržnost.

6. Pískované jádro, opatřené nátěrem polyuretanového pojiva MDI



Obr. 36 Závislost síly na velikosti plochy pro 6. typ spoje

U spojů s kombinací pískovaného povrchu a nátěru pojiva MDI se prokázal nárůst soudržnosti se zvětšující se plochou spojení.

2.3 Zhodnocení výsledků

Stanovení normality dat

Některé výsledky byly podloženy malým počtem měření, proto se provedla kontrola normality získaných hodnot zatížení podle Shapiro-Wilksova W testu (Tab. 18). Vyhodnocení Shapiro-Wilksova W testu bylo provedeno v programu Statistica v8.

Tab. 18 Shapiro-Wilksovův W test normality

typ spojení	W	p
1. pískované, natřené prepolymerem Plaston PP 010	0,91385	0,15515
2. pískované, nenatřené	0,94075	0,67123
3. nepískované, natřené prepolymerem Plaston PP 010	0,98148	0,97857
4. nepískované, nenatřené	0,82449	0,12640
5. nepískované, natřené izokyanátem MDI	0,98665	0,99624
6. pískované, natřené izokyanátem MDI	0,80249	0,08490
6. pískované, natřené izokyanátem MDI po úpravě	0,83995	0,19527

Z výsledku testu je patrné, že u žádné varianty spoje nedošlo k poklesu pravděpodobnosti p pod hladinu významnosti 5 %. Přesto byla zjištěna u 6. typu spoje nízká hodnota p . Naměřená data (Tab. 14) byla tudíž zredukována o hodnotu pro 5. těleso (2065,92 N). Na základě údajů z Shapiro-Wilksova W testu je tedy ověřena platnost hypotézy o normalitě dat.

2.3.1 Ověření srovnávacích hypotéz

Pro zvolené varianty spojů byl proveden dvouvýběrový T -test pro neznámé hodnoty rozptylů σ_1^2 a σ_2^2 , přičemž se předpokládá $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$.

1. Ověření, zda je srovnatelná pevnost 1. typu spojení (kombinace pískovaného povrchu jádra s nátěrem Plaston PP 010) s 5. typem spojení (kombinace nepískovaného povrchu jádra s nátěrem MDI).

Výpočet:

Zvolená hladina významnosti $\alpha = 0,05$.

Hypotézy: $H_0: \mu_1 = \mu_2$ x $H_1: \mu_1 > \mu_2$;

kritický obor: $T_{n,m} > t_{1-\alpha}(v)$.

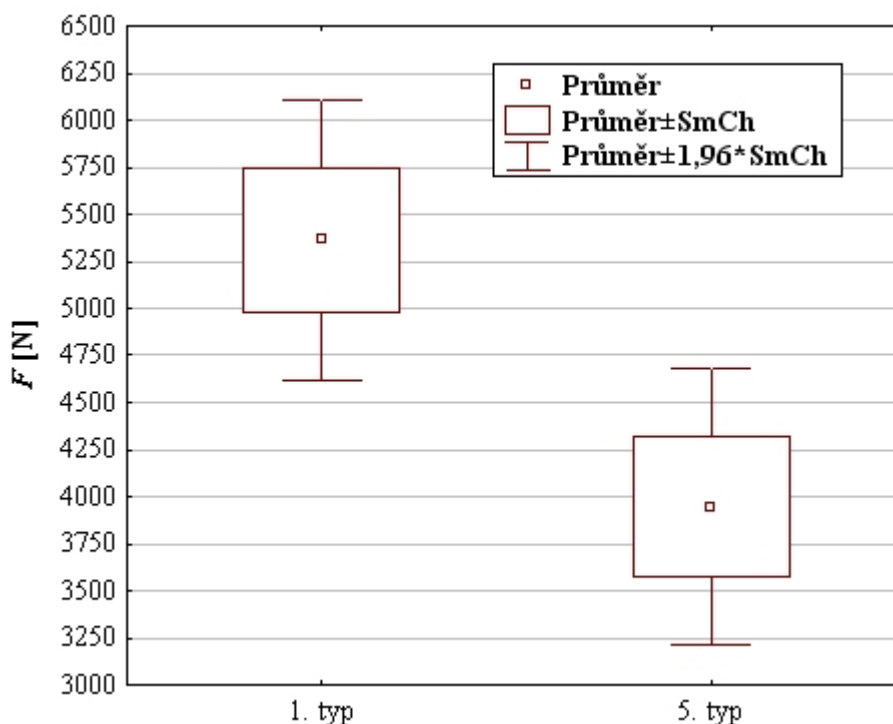
$$T_{n,m} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n} + \frac{\sigma_2^2}{m}}} \quad (44)$$

$$T_{15,15} = \frac{5362,49 - 3945,96}{\sqrt{\frac{1465,16^2}{15} + \frac{1453,86^2}{15}}} = 2,6579$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n} + \frac{s_2^2}{m}\right)^2}{\frac{1}{n-1}\left(\frac{s_1^2}{n}\right)^2 + \frac{1}{m-1}\left(\frac{s_2^2}{m}\right)^2} = \frac{\left(\frac{1465,16^2}{15} + \frac{1453,86^2}{15}\right)^2}{\frac{1}{15-1}\left(\frac{1465,16^2}{15}\right)^2 + \frac{1}{15-1}\left(\frac{1453,86^2}{15}\right)^2} \approx 28 \quad (45)$$

$$t_{1-\alpha}(\nu) = t_{0,95}(28) = 1,701 \quad [13]$$

$2,658 > 1,701 \rightarrow$ platí hypotéza H_1 .



Obr. 37 Krabicový graf srovnání 1. a 5. typu spoje

Z výsledků T -testu vyplývá, že pevnost spojení kombinují pískovaný povrch jádra s nátěrem Plaston PP 010 je větší než spojení kombinující nepískovaný povrch jádra s nátěrem MDI. Pravděpodobnost shody činí pouhých 1,28 %, což je méně než stanovená hladina významnosti 5 %.

2. Ověření, zda je srovnatelná pevnost 1. typu spojení (kombinace pískovaného povrchu jádra s nátěrem Plaston PP 010) s 6. typem spojení (kombinace pískovaného povrchu jádra s nátěrem MDI).

Výpočet:

Zvolená hladina významnosti $\alpha = 0,05$.

Hypotézy: $H_0: \mu_1 = \mu_2$ x $H_1: \mu_1 > \mu_2$;

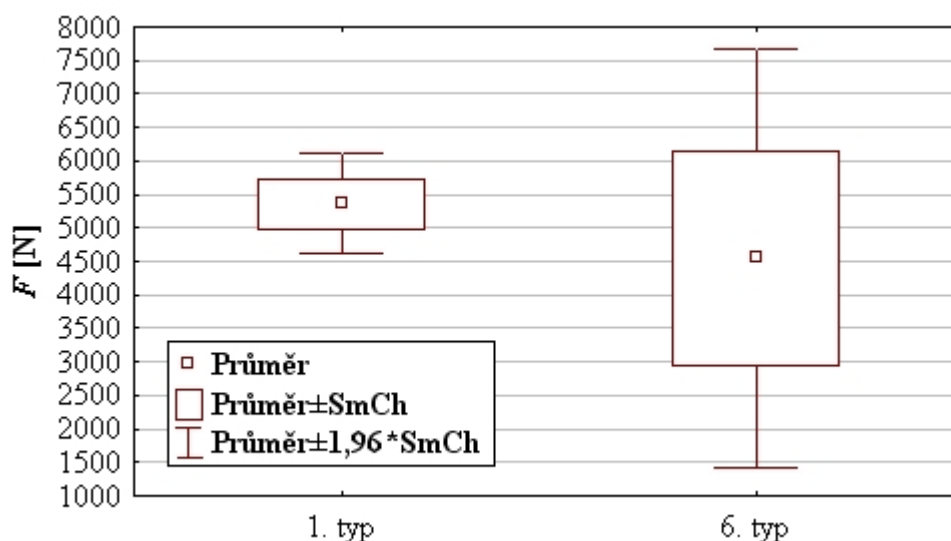
kritický obor: $T_{n,m} > t_{1-\alpha}(\nu)$.

$$T_{15,4} = \frac{5362,49 - 4553,875}{\sqrt{\frac{1465,16^2}{15} + \frac{3188,505^2}{4}}} = 0,4935 \quad (46)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{1465,16^2}{15} + \frac{3188,51^2}{4}\right)^2}{\frac{1}{15-1}\left(\frac{1465,16^2}{15}\right)^2 + \frac{1}{4-1}\left(\frac{3188,51^2}{4}\right)^2} \approx 3 \quad (47)$$

$$t_{1-\alpha}(\nu) = t_{0,95}(3) = 2,353 \quad [13]$$

$0,4935 < 2,353 \rightarrow$ platí hypotéza H_0 .



Obr. 38 Krabicový graf srovnání 1. a 6. typu spoje

Z výsledků T -testu vyplývá, že pevnost spojení kombinující pískovaný povrch jádra s nátěrem Plaston PP 010 je srovnatelná se spojením kombinující pískovaný povrch jádra s nátěrem MDI. Pravděpodobnost shody činí 45,69 %.

3. Ověření, zda je srovnatelná pevnost 5. typu spojení (kombinace nepískovaného povrchu jádra s nátěrem MDI) s 6. typem spojení (kombinace pískovaného povrchu jádra s nátěrem MDI).

Výpočet:

Zvolená hladina významnosti $\alpha = 0,05$.

Hypotézy: $H_0: \mu_1 = \mu_2$ x $H_1: \mu_1 > \mu_2$;

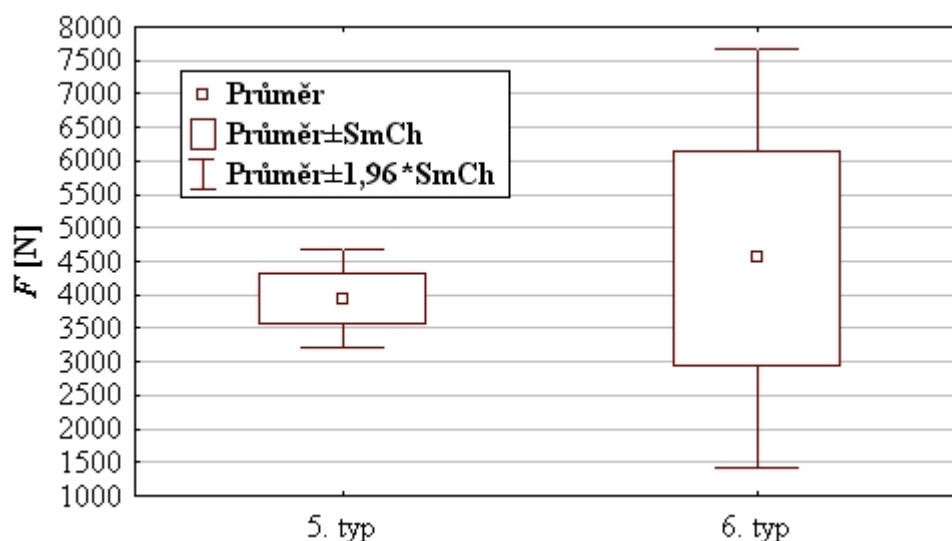
kritický obor: $T_{n,m} > t_{1-\alpha}(v)$.

$$T_{15,4} = \frac{3945,96 - 4553,875}{\sqrt{\frac{1453,86^2}{15} + \frac{3188,505^2}{4}}} = -0,3712 \quad (48)$$

$$v = \frac{\left(\frac{1453,86^2}{15} + \frac{3188,51^2}{4}\right)^2}{\frac{1}{15-1}\left(\frac{1453,86^2}{15}\right)^2 + \frac{1}{4-1}\left(\frac{3188,51^2}{4}\right)^2} \approx 3 \quad (49)$$

$$t_{1-\alpha}(v) = t_{0,95}(3) = 2,353 \quad [13]$$

$-0,371 < 2,353 \rightarrow$ platí hypotéza H_0 .



Obr. 39 Krabicový graf srovnání 5. a 6. typu spoje

Z výsledků T -testu vyplývá, že pevnost spojení kombinujících nepískovaný povrch jádra s nátěrem MDI je srovnatelná se spojením kombinující pískovaný povrch jádra s nátěrem MDI. Pravděpodobnost shody činí 57,31 %.

Zhodnocení výsledků

Srovnáním výsledků *T*-testů se zjistilo, že pískování povrchu ocelového jádra zvyšuje soudržnost spoje. Pakliže se pískované jádro opatřilo ještě nátěrem prepolymeru Plaston PP 010, či izokyanátu MDI se soudržnost spoje ještě zvýšila. Porovnáním dat obou kombinací spojů pískovaného jádra s pojivy MDI a Plaston PP 010 se dospělo k názoru, že oba typy vykazují srovnatelnou soudržnost. Nehledě na to, že měření spoje s pojivem MDI bylo zatíženo velkými odchylkami. Dalším typem spoje s velkou soudržností byla kombinace nepískovaného povrchu jádra a nátěru izokyanátu MDI.

Grafické závislosti soudržnosti na velikosti plochy spoje dále potvrdily, že u spojů bez nátěru pojivem rozhoduje o pevnosti převážně velikost plochy spoje, přičemž spojení s pískovaným povrchem jádra je pevnější než spojení bez úpravy povrchu. Aplikací pojiv se sice soudržnost zvýšila, nelze ale prokázat, že by soudržnost spojů s pojivy přímo závisela na velikosti nalisované plochy.

Je nutné totiž dodat, že měření byla v některých případech nepříznivě ovlivněna několika faktory. V první řadě se jednalo o geometrické nepřesnosti a narušení spojů zkušebních těles, způsobené při jejich výrobě. Druhým nepříznivým faktorem je již samotná heterogenita struktury kompozitního materiálu. V důsledku křehkosti kompozitu došlo v několika případech ke vzniku lomu v nalisované vrstvě.

2.4 Tlaková metoda

Cílem zkoušky je zjistit chování nalisované kompozitní vrstvy na ocelové výztuze pod účinkem spojitého zatížení tlakem. Jedná se o nenormalizovanou měřicí metodu, jež měla simulovat provozní zatížení žebra kanálové vpusti.

2.4.1 Podstata zkoušky

Metoda principiálně připomíná ohyb nosníku o dvou podporách, na který je v centrální části působeno plošným spojitým zatížením (Obr. 41). Snahou nebylo docílit ohybu ocelové výztuhy, ale pouze deformace nalisované kompozitní vrstvy. Pro destrukční účely by bylo zapotřebí vyvinout zatížení několika stovek kN. Při měření bylo vyvíjeno zatížení pouze 20 kN.

2.4.2 Zkušební vzorky

Zkušební tělesa byla vyrobena firmou AB Elpo v provizorní lisovací formě. Skládají se z ocelového jádra (nosníku), na němž je uprostřed nalisována kompozitní pryžová vrstva (Obr. 40). Jádro je vyrobeno z ploché tyče, oceli S355JO (11 523). Šířka profilu tyče činí 40 mm a tloušťka 15 mm. Rozměry profilu opět odpovídají tyčovině používané pro výrobu výztuhy kanálových vpustí. Tloušťka nalisované vrstvy kompozitního materiálu činí přibližně 20 mm. Výkres navrženého zkušebního tělesa je uveden v příloze P X.

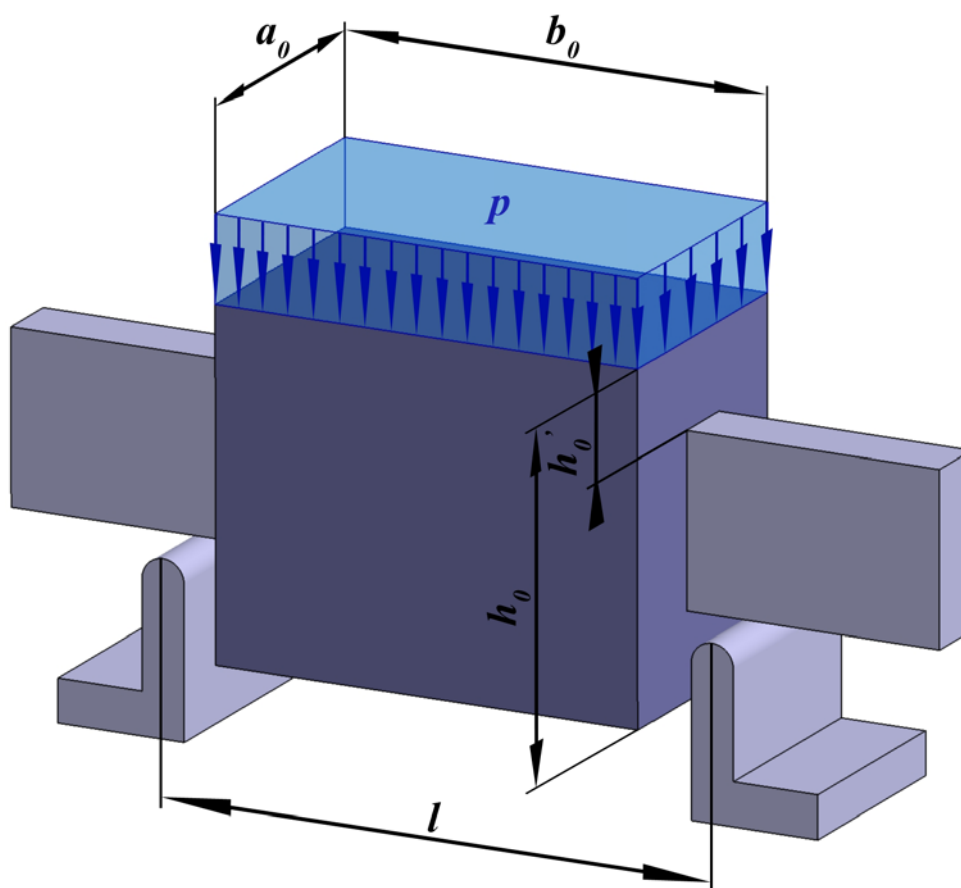


Obr. 40 Zkušební těleso

Bylo vyrobeno 6 sad zkušebních těles s různými kombinacemi pojiv a povrchových úprav. Pro každou sadu bylo vyrobeno 5 zkušebních vzorků.

2.4.3 Zkušební zařízení

Na Obr. 41 je znázorněn princip zkoušky.



Obr. 41 Schéma tlakové zkoušky

Parametry zkušebního zařízení:

vzdálenost podpor	$l = 130 \text{ mm};$
šířka zatěžované plochy	$a_0 = 59 \pm 1 \text{ mm};$
délka zatěžované plochy	$b_0 = 100 \pm 1 \text{ mm};$
výška kompozitní vrstvy před zatížením	$h_0 = 81 \pm 1 \text{ mm};$
tloušťka kompozitní vrstvy kolem jádra	$h_0' = 20 \pm 1 \text{ mm}.$

Trhací stroj

Při měření byl použit trhací stroj Zwick 1456 s maximálním zatížením 22 kN.



Obr. 42 Tlaková zkouška na trhacím stroji

Použitá měřidla

Posuvné měřidlo Mitutoyo 500 – 181U (přesnost: 0,01 mm, měřící rozsah: 0 – 150 mm)

Zpracování naměřených dat

Naměřená data byla zaznamenána počítačem. Příslušným programem se graficky vyhodnotila závislost zatěžovací síly na deformaci. Program dále změřil závislosti silového působení na protažení. Naměřené závislosti byly pak přepočteny na hodnoty závislosti tlaku na deformaci, dle vztahu:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{a_0 \cdot b_0} . \quad (50)$$

Postup zkoušky

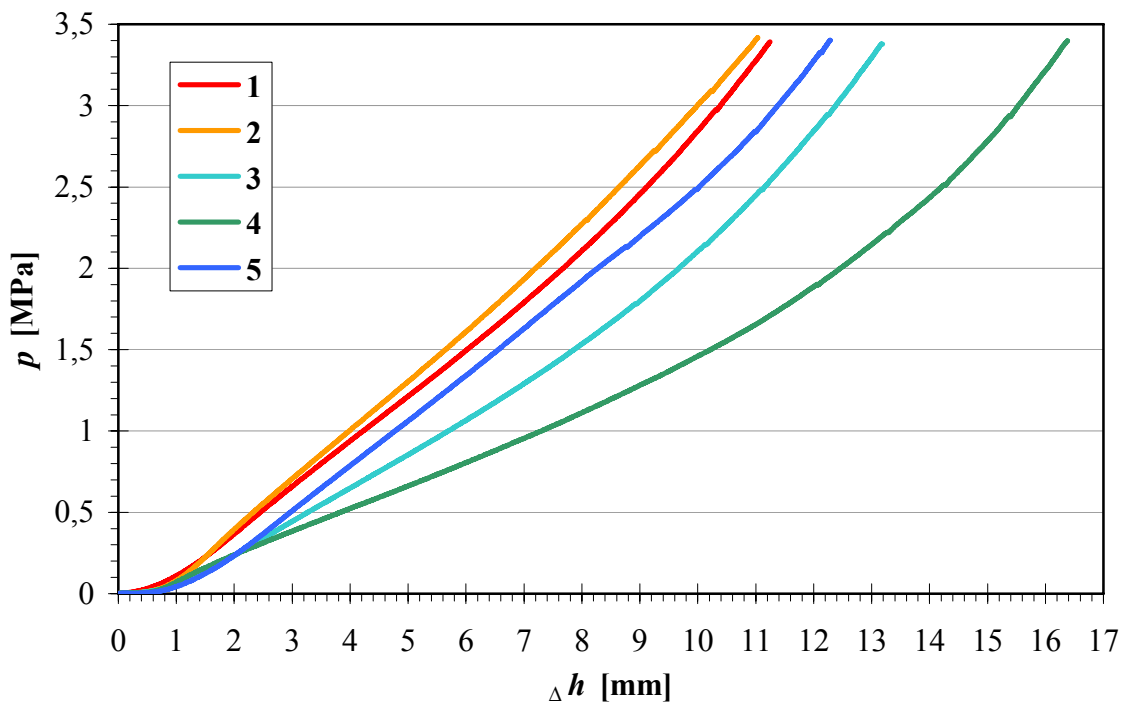
Zkušební těleso bylo umístěno na podpory tak, aby bylo zatížení rozloženo rovnoměrně na plochu nalisované vrstvy (Obr. 41). Po spuštění chodu stroje se průběžně zaznamenávaly změny stlačení kompozitní vrstvy a síly s přesností $\pm 2\%$. Zatížení bylo plynule zvyšováno až do přednastavené hodnoty 20 kN. Jmenovitá rychlost příčnicku byla $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Zkušební teplota

Zkouška probíhala ve všech případech při laboratorní teplotě.

2.4.4 Výsledky měření tlakové zkoušky

1. Pískované jádro, opatřené nátěrem ředěného prepolymeru Plaston PP 010



Obr. 43 Závislost tlaku na deformaci pro 1. typ spojení

Přibližně srovnatelné tvary křivek poukazují na velmi dobrou soudržnost spojení. U žádného vzorku navíc nedošlo k rozlepení spoje, či destrukci nalisované vrstvy.

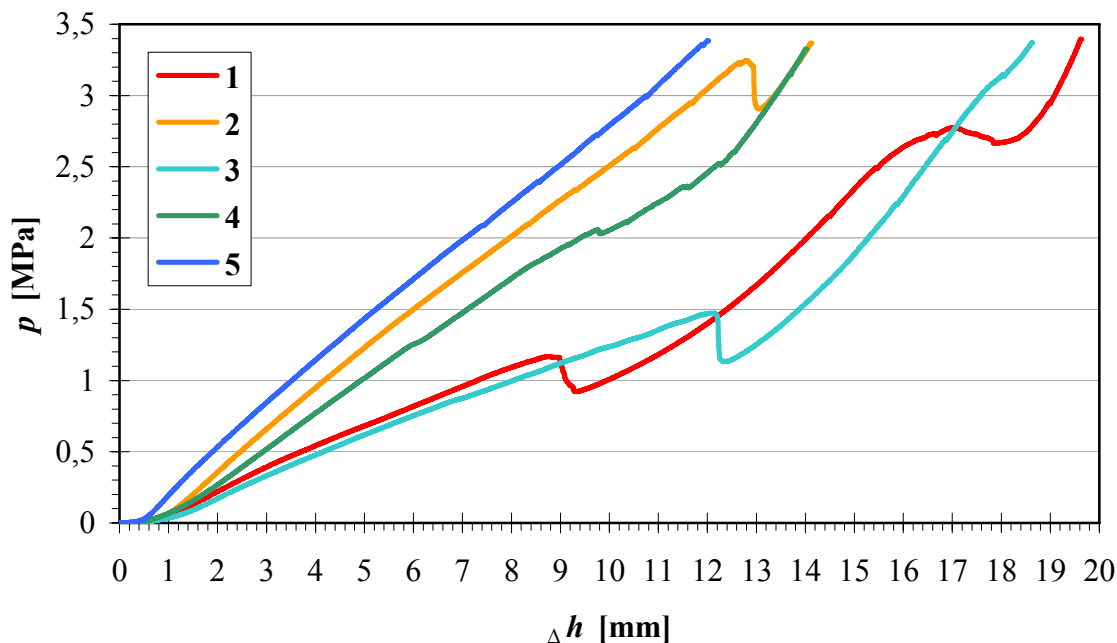
Tab. 19 Naměřené hodnoty pro 1. typ spojení

n	p_{max} [MPa]	Δh [mm]	S [cm ²]	porucha
1	3,388	11,244	59,03	-
2	3,413	11,032	58,60	-
3	3,373	13,168	59,29	-
4	3,393	16,378	58,94	-
5	3,396	12,282	58,89	-
\bar{x}	3,393	12,82	58,95	-
s	0,014	2,17	0,25	-
\tilde{x}	3,393	12,28	58,94	-
v [%]	0,425	16,89	0,43	-

V uvedené tabulce S značí zatěžovanou horní plochu nalisované kompozitní vrstvy.

2. Pískované jádro, bez nátěru

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 44.



Obr. 44 Závislost tlaku na deformaci pro 2. typ spojení

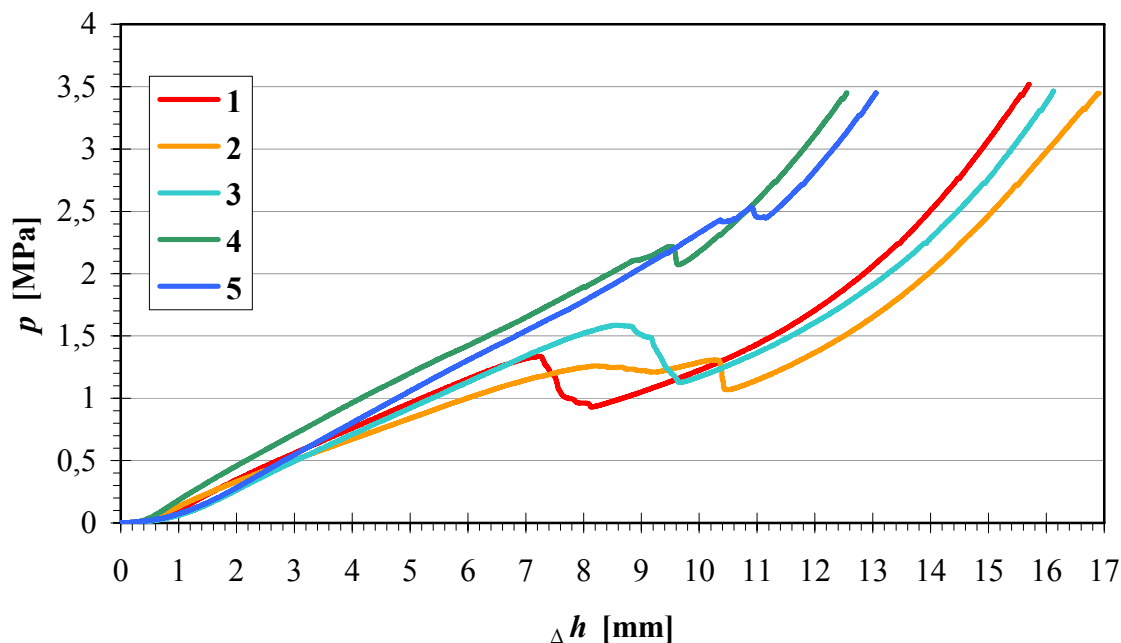
Jak naznačují křivky průběhů zatěžování, u většiny vzorků došlo k celkovému odtržení nalisované vrstvy od jádra. V některých případech došlo i k destrukci (lomu) nalisované vrstvy kompozitu. Samotné překmitý křivek pak označují okamžik roztržení spoje. U 1. a 3. vzorku přitom došlo k separaci již při nízkém tlaku.

Tab. 20 Naměřené hodnoty pro 2. typ spojení

n	p_{max} [MPa]	Δh [mm]	S [cm ²]	porucha
1	3,404	19,623	59,05	separace, destrukce
2	3,363	14,112	59,48	separace, částečná destrukce
3	3,366	18,623	59,43	separace, destrukce
4	3,320	14,006	60,25	separace
5	3,381	12,003	59,16	-
\bar{x}	3,367	15,67	59,47	-
s	0,031	3,28	0,47	-
\tilde{x}	3,366	14,11	59,43	-
v [%]	0,918	20,92	0,79	-

3. Nepískované jádro, opatřené nátěrem ředěného prepolymeru Plaston PP 010

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 45.



Obr. 45 Závislost tlaku na deformaci pro 3. typ spojení

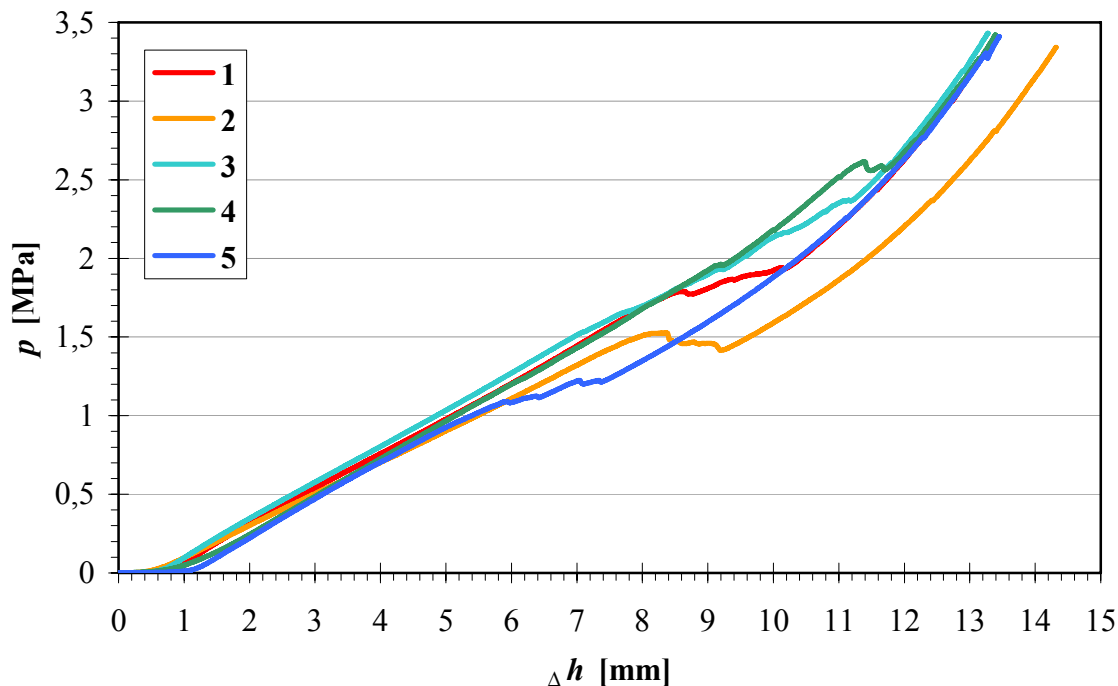
U vzorků pojených pouze prepolymerem Plaston PP 010 rovněž docházelo k separaci. Ve třech případech došlo k odtržení již při tlaku kolem 1,5 MPa. Z důvodu separace se rovněž zvětšila i deformace. U zmíněných třech vzorků se horní nalisovaná vrstva stlačila o více než 15 mm.

Tab. 21 Naměřené hodnoty pro 3. typ spojení

n	p_{max} [MPa]	Δh [mm]	S [cm ²]	porucha
1	3,510	15,70	56,98	separace
2	3,441	16,89	58,13	separace
3	3,455	16,12	57,88	separace
4	3,440	12,55	58,15	separace
5	3,442	13,06	58,10	separace
\bar{x}	3,458	14,86	57,85	-
s	0,030	1,94	0,49	-
\tilde{x}	3,442	15,70	58,10	-
v [%]	0,865	13,04	0,86	-

4. Nepískované jádro, bez nátěru

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 46.



Obr. 46 Závislost tlaku na deformaci pro 4. typ spojení

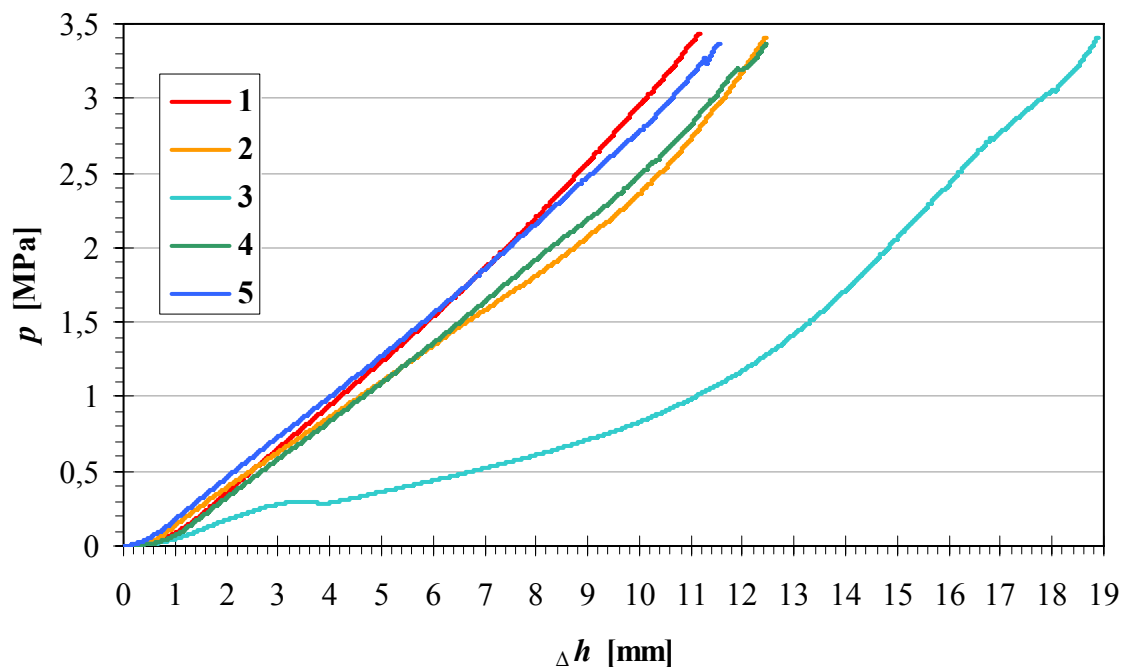
U vzorků bez jakéhokoliv pojiva, či úpravy povrchu jádra byly naměřeny nejhorší výsledky. Ve všech případech došlo k rozlepení spoje. Nicméně překmitý jednotlivých křivek nejsou tak výrazné, jako u předchozích měření s poruchami. Lze z toho usuzovat, že docházelo k postupné separaci nalisované vrstvy od jádra.

Tab. 22 Naměřené hodnoty pro 4. typ spojení

n	p_{max} [MPa]	Δh [mm]	S [cm ²]	porucha
1	3,396	13,39	58,89	separace
2	3,335	14,32	59,97	separace
3	3,425	13,28	58,39	separace
4	3,412	13,39	58,61	separace
5	3,403	13,45	58,78	separace
\bar{x}	3,394	13,57	58,93	-
s	0,035	0,43	0,61	-
\tilde{x}	3,403	13,39	58,78	-
v [%]	1,030	3,14	1,04	-

5. Nepískované jádro, opatřené nátěrem polyuretanového pojiva MDI

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 47.



Obr. 47 Závislost tlaku na deformaci pro 5. typ spojení

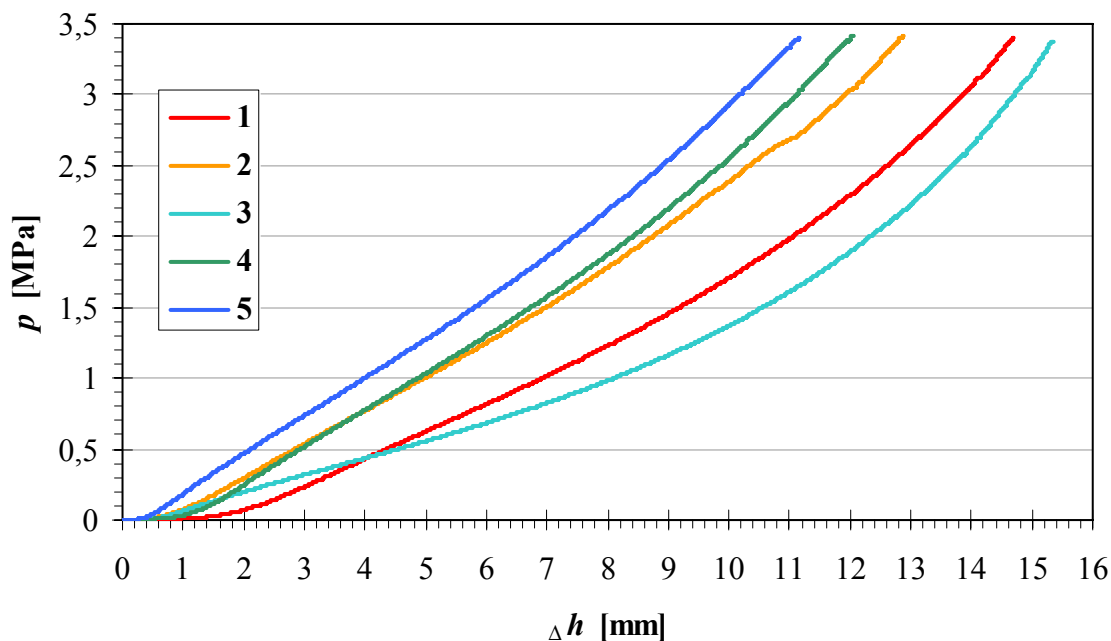
Aplikací samotného nátěru polyuretanového pojiva MDI se výrazně zvýšila pevnost spojení. U čtyř měření byly naměřeny téměř srovnatelné závislosti, přičemž deformace nepřekročila hodnotu 12,5 mm. Pouze v jednom případě došlo k odlepení a následné destrukci kompozitní vrstvy.

Tab. 23 Naměřené hodnoty pro 5. typ spojení

n	p_{max} [MPa]	Δh [mm]	S [cm ²]	porucha
1	3,412	11,162	58,61	-
2	3,405	12,449	58,74	-
3	3,406	18,889	58,72	separace, destrukce
4	3,360	12,448	59,53	částečná separace
5	3,366	11,546	59,41	-
\bar{x}	3,390	13,30	59,00	-
s	0,025	3,18	0,43	-
\tilde{x}	3,405	12,45	58,74	-
v [%]	0,730	23,88	0,73	-

6. Pískované jádro, opatřené nátěrem polyuretanového pojiva MDI

Průběhy experimentální závislosti síly na deformaci jsou uvedeny na Obr. 48.



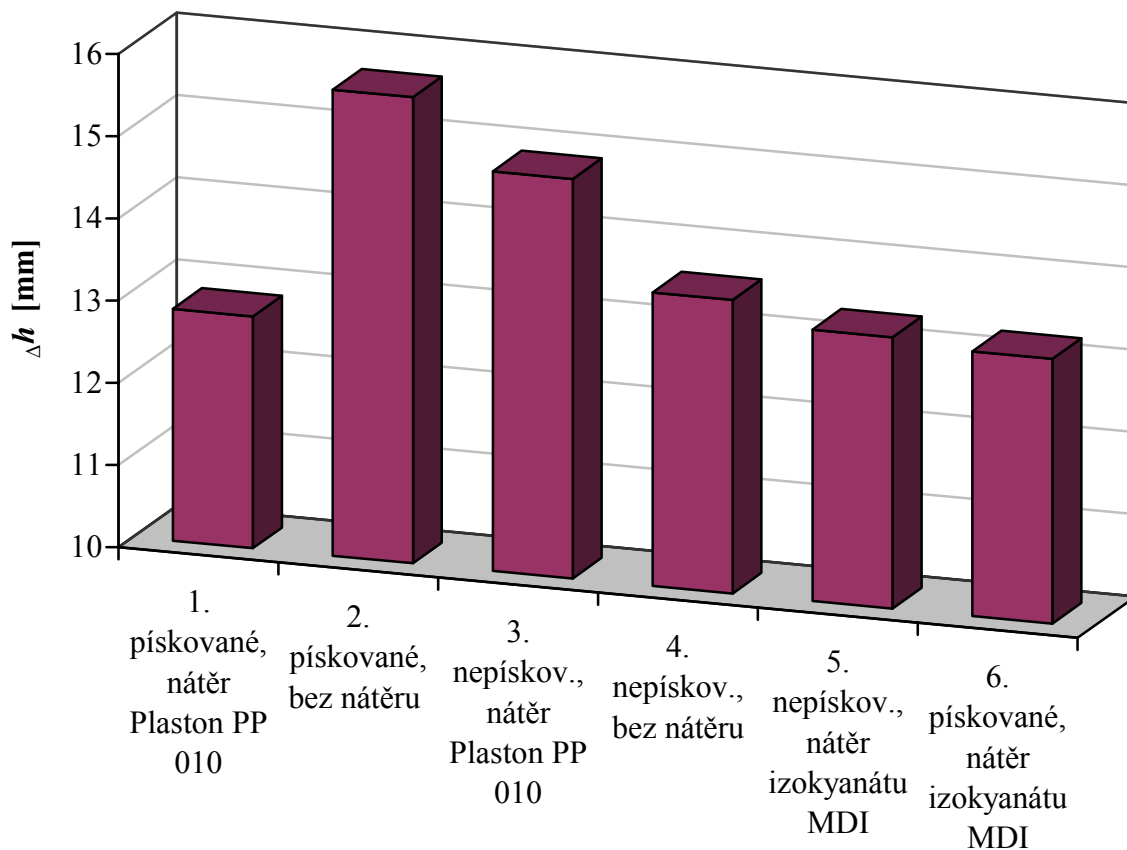
Obr. 48 Závislost tlaku na deformaci pro 6. typ spojení

Kombinací pískovaného jádra a nátěru polyuretanového pojiva MDI bylo dosaženo velmi dobrých výsledků. V průběhu měření nedošlo k separaci spoje. Změřené závislosti jsou svým charakterem podobné nejvíce měření s 1. typem spoje (kombinace pískovaného povrchu jádra a pojiva Plaston PP 010).

Tab. 24 Naměřené hodnoty pro 6. typ spojení

n	p_{max} [MPa]	Δh [mm]	S [cm ²]	porucha
1	3,391	14,679	58,98	-
2	3,411	12,869	58,63	-
3	3,370	15,337	59,35	-
4	3,407	12,033	58,70	-
5	3,398	11,163	58,85	-
\bar{x}	3,395	13,22	58,90	-
s	0,016	1,76	0,28	-
\tilde{x}	3,398	12,87	58,85	-
v [%]	0,479	13,31	0,48	-

2.5 Zhodnocení výsledků



Obr. 49 Srovnání průměrných hodnot maximálních stlačení

Bylo zjištěno, že kombinací pískovaného povrchu ocelového jádra s nátěrem zkoumaných pojiv se docílilo nejnižších deformací (stlačení) kompozitní vrstvy. Výsledky obou kombinací lze považovat za srovnatelné. V průběhu obou měření totiž u zkušebních těles nedošlo při zatížení 20 kN k rozlepení spoje, či samotné destrukci nalisované kompozitní vrstvy.

Podle grafického srovnání (Obr. 49) bylo nejnižší průměrné hodnoty stlačení docíleno u těles se spoji kombinující pískovaný povrch jádra a nátěr prepolymeru Plaston PP 010.

3 Numerická analýza kanálové vpusti

V další části práce byla provedena numerická analýza kanálové vpusti č. 1A (AB Elpo spol. s r. o.) (Obr. 50).

Analýza byla zpracována v konečně prvkovém programu MSC. Patran 2006. Výpočet analýzy proběhl v programu MSC. Marc 2005 r3.



Obr. 50 Kanálová vpust 1A

3.1 Zkoušení kompozitního pryžového materiálu

Pro potřeby analýzy bylo v první řadě zapotřebí stanovit mechanické vlastnosti kompozitního materiálu užívaného při výrobě kanálových vpustí (Obr. 51).



Obr. 51 Detail řezu kompozitního materiálu

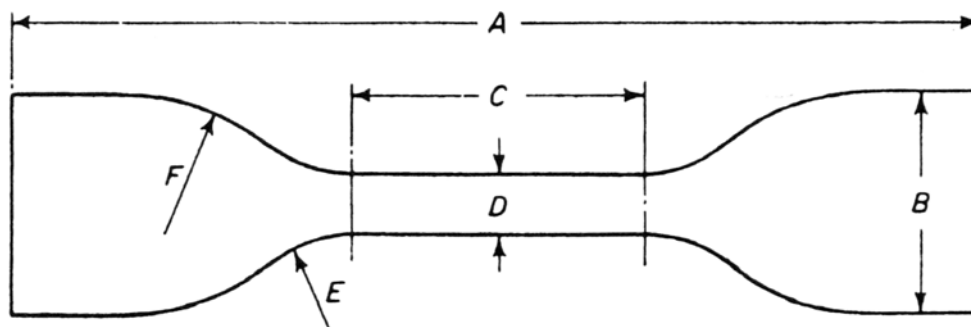
3.1.1 Zkoušení materiálu pro jednoosou napjatost

Podstata zkoušky

Tahová zkouška byla prováděna dle normy ČSN ISO 37. Na trhacím stroji byla konstantní rychlostí protahována zkušební tělesa tvaru tzv. osmičky. V průběhu měření se odečítaly hodnoty síly a protažení až do okamžiku přetržení. Z naměřených hodnot se vypočetly potřebné charakteristiky.

Zkušební tělesa

Byly vyrobeny desky kompozitu o tloušťce přibližně 5 mm. Z nich se pak vysekly zkušební tělesa ve tvaru osmičky (Obr. 52).



Obr. 52 Zkušební těleso, tzv. osmička [10]

Rozměry zkušebních těles odpovídaly typu 1A dle ČSN ISO 37 (Tab. 25).

Tab. 25 Rozměry zkušebního tělesa, tzv. osmičky [10]

Rozměr [mm]	Typ 1A
A – celková délka (min.)	100
B – šířka konců	$25 \pm 0,5$
C – délka zúžené části	$20 + 2/-0$
D – šířka zúžené části	$5 \pm 0,1$
E – přechodové zaoblení vnější	11 ± 1
F – přechodové zaoblení vnitřní	25 ± 2
měřená délka	$20 \pm 0,5$

Trhací stroj

Trhací stroj vyhovoval požadavkům ISO 5893:1993. Konkrétně se jedná o stroj Zwick 1456 s maximálním zatížením 22 kN.

Počet zkušebních těles

Bylo vyrobeno devět zkušebních vzorků.

Zkušební teplota

Zkouška probíhala ve všech případech při laboratorní teplotě.

Postup zkoušky

Přístrojem se změřila tloušťka každého tělesa, ze které se následně vypočetl obsah průřezu. Zkušební těleso se symetricky upnulo do čelistí trhacího stroje tak, aby byl zajištěn rovnoměrný tah na příčný průřez tělesa. Na zkušební těleso se připevnil mechanismus průtahoměru. Po spuštění chodu stroje se zaznamenávaly změny pracovní délky zkušebního tělesa a síly s přesností $\pm 2\%$. Jmenovitá rychlost příčnicku s pohyblivou upínací čelistí byla $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. U žádného tělesa nedošlo k přetržení mimo pracovní část.

Zpracování naměřených dat

Naměřená data byla snímána počítačem. Příslušným programem se graficky vyhodnotila závislost napětí na protažení. Program dále změřil hodnoty pevnosti a tažnosti při přetržení a sloupce hodnot závislosti silového působení na protažení. Naměřené závislosti byly přepočteny na hodnoty závislosti napětí na poměrné deformaci, dle rovnic:

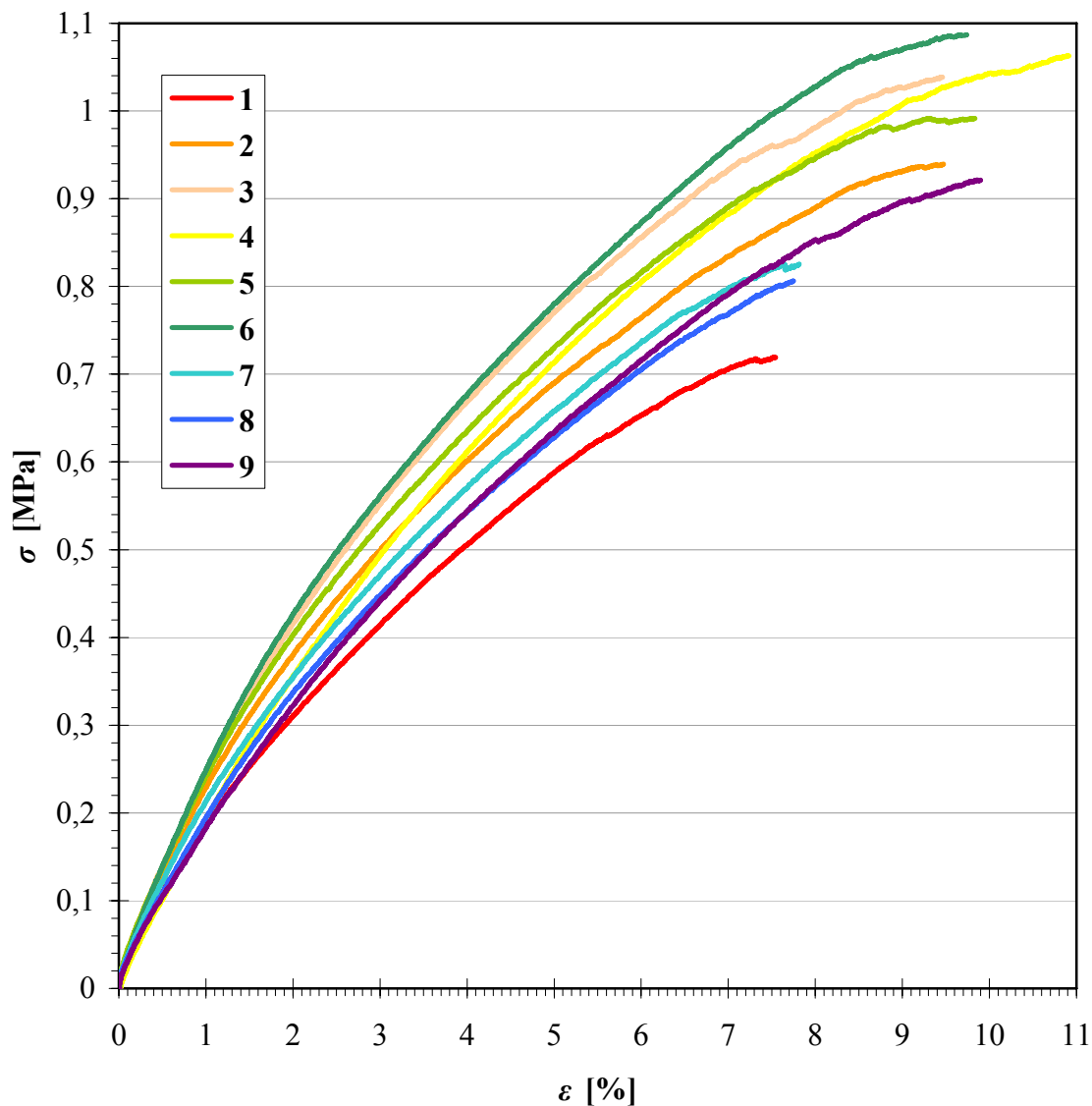
$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{a_0 \cdot b_0}, \quad (51)$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}, \quad (52)$$

kde F je zatěžovací síla, S je plocha průřezu pracovní části, L je délka pracovní části tělesa při protažení a L_0 je délka pracovní části nezatíženého tělesa.

3.1.2 Výsledky měření

Průběhy experimentálních závislostí napětí na poměrné deformaci jsou uvedeny na Obr. 53.



Obr. 53 Závislost napětí na poměrné deformaci

Z grafické závislosti je zřejmé, že k přetržení těles došlo při nízkých hodnotách zatížení. Samotný průběh závislosti napětí na poměrném protažení spíše poukazuje na velkou křehkost kompozitního materiálu. Z toho důvodu se neprojevil při měření charakteristický průběh nelineární závislosti, příznačný pro klasické elastomery.

Naměřené hodnoty se statistickým zpracováním jsou uvedeny v Tab. 26.

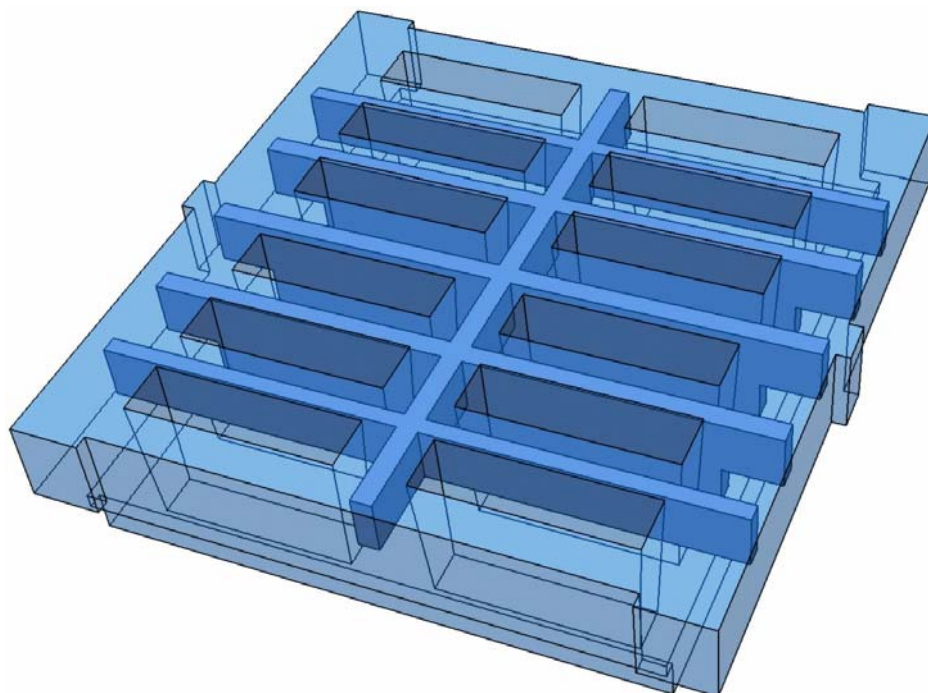
Tab. 26 Naměřené hodnoty tahové zkoušky

n	σ_{Pi} [MPa]	F_{max} [N]	Δl_{Fmax} [mm]	ε [%]
1	0,719	23,36	17,19	7,54
2	0,939	30,51	19,38	9,47
3	1,039	33,73	18,69	9,46
4	1,063	34,52	21,24	10,91
5	0,992	32,21	18,64	9,83
6	1,087	35,30	19,67	9,74
7	0,826	26,81	16,99	7,82
8	0,806	26,18	15,56	7,75
9	0,921	29,92	20,46	9,85
\bar{x}	0,932	30,28	18,647	9,15
s	0,127	4,12	1,803	1,17
\tilde{x}	0,939	30,51	18,690	9,47
v [%]	13,61	13,6	9,67	12,78

Pro definici parametrů materiálu v programu MSC Patran byly použity data závislosti odpovídající zkušebnímu tělesu č. 2.

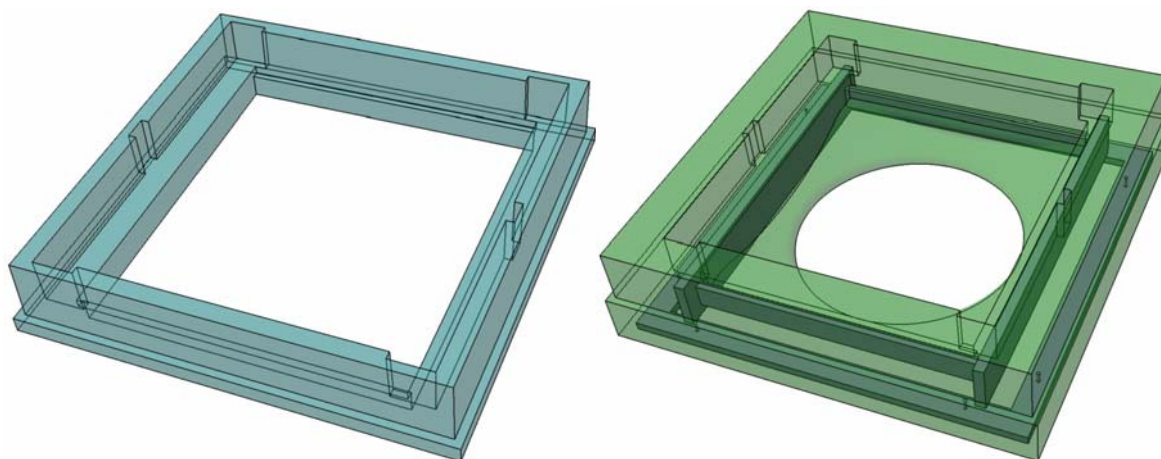
3.2 Tvorba 3D modelu kanálové vpusti

V programu Catia V5 R17 byl vytvořen podle poskytnuté výkresové dokumentace [19] 3D model kanálové vpusti 1A (Obr. 54). Pro zjednodušení následné analýzy byla předpokládána výztuha vpusti jako jednolitý díl, nikoliv jakožto svařenec plochých ocelových tyčí s omezenou pevností svarů.



Obr. 54 3D model kanálové vpusti 1A

Pro přesnější definici okrajových podmínek byly vytvořeny dvě varianty rámu pro danou kanálovou vpust (Obr. 55). Prvním typem je přibližný model standardního litinového rámu. Druhým typem je pryžokovový rám s označením 1B, od firmy AB Elpo spol. s r. o. [19].



Obr. 55 3D modely litinového rámu a pryžokovového rámu 1B

Jelikož vpust i rám jsou symetrická tělesa, s výhodou bylo možné analyzovat pouze čtvrtinu, či polovinu celé sestavy kanálové vpusti a rámu.

V programu Catia byla původní sestava zredukována na čtvrtinu a polovinu. Byla rovněž odebrána i spodní část rámu (litinového i pryžokovového) přesahující pod úroveň spodní strany vpusti.

Zredukována sestava byla následně importována do programu MSC. Patran, jakožto soubor formátu IGES. Daná sestava se vložila ve formě množiny ploch. Uzavřením daných ploch vznikly tělesa představující ocelovou výztuhu vpusti, nalisovanou kompozitní vrstvu vpusti a litinový rám, potažmo výztuhu rámu 1B a nalisovanou kompozitní vrstvu rámu 1B.

3.2.1 Specifikace mechanických vlastností materiálů

V další fázi bylo nutné nadefinovat mechanické vlastnosti šedé litiny, oceli a pryžového kompozitu.

Litinový rám (šedá litina EN-GJL-200 (42 2420)):

$$E_1 = 1,03 \cdot 10^5 \text{ MPa}; \quad [21]$$

$$\sigma_{P1} = 300 \text{ MPa}; \quad [21]$$

$$\nu_1 = 0,26. \quad [21]$$

Ocelová výztuha (ocel S355JO (11 523)):

$$E_2 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}; \quad [14]$$

$$\sigma_{P2} = 630 \text{ MPa}; \quad [20]$$

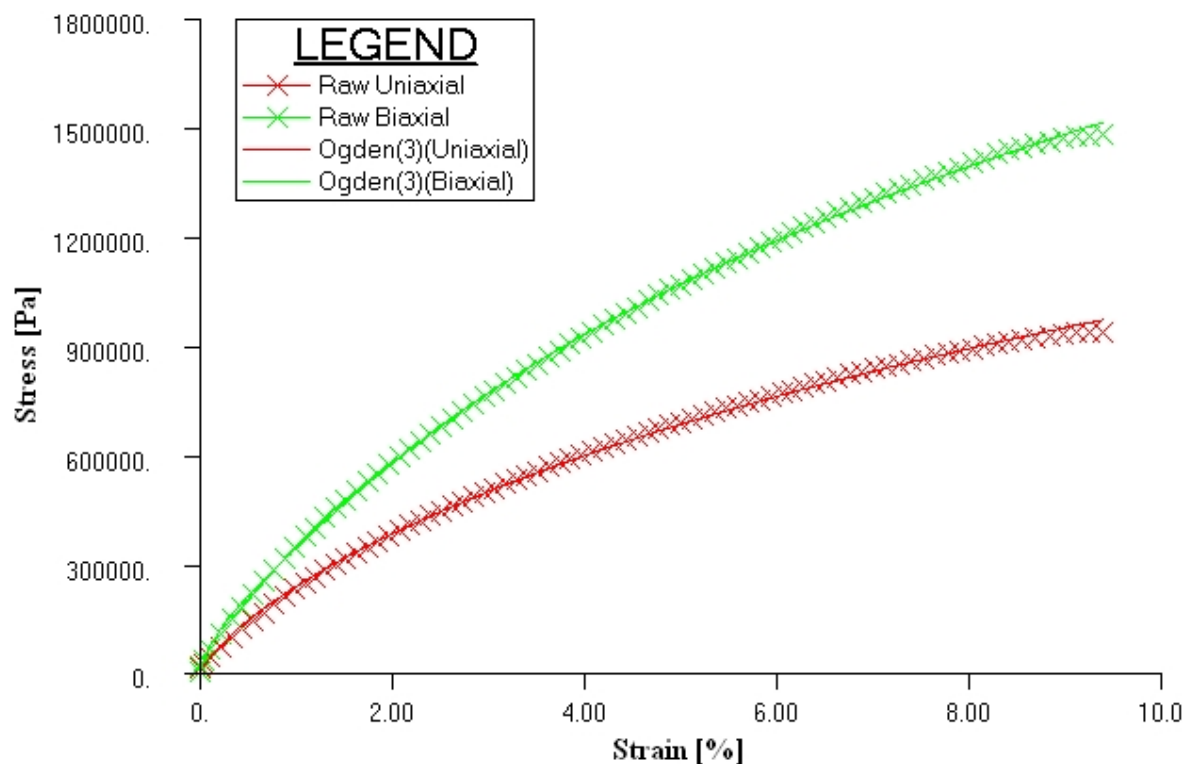
$$\sigma_{K2} = 355 \text{ MPa (pro výrobky jmenovité tloušťky } \leq 16 \text{ mm)}; \quad [20]$$

$$\nu_2 = 0,28. \quad [14]$$

Pryžová kompozitní vrstva:

Mechanické vlastnosti kompozitního materiálu byly odvozeny z experimentálních dat z tahové zkoušky. U vybrané závislosti se provedlo porovnání dat s hyperelastickými matematickými modely, jimiž program disponuje (Neo-Hookean, Mooney-Rivlin 2. a 3. řádu, Polynomickou funkcí 2. a 3. řádu, Yeoh, Ogden, Gent, Arruda-Boyce, Signiori). Pro přesnější srovnání dat byla dodatečně vytvořena i fiktivní závislost pro dvouosý tah.

Jako nejvhodnější se jevil tří-parametrový model Ogden. Proložení experimentálních dat jednoosého tahu a vytvořených dat pro dvouosý tah bylo tímto modelem zatíženo nejmenší chybou (42,698162) (Obr. 56).



Obr. 56 Porovnání experimentálních a vytvořených dat s tří-parametrickým modelem Ogden

Vypočtené materiálové parametry pro model Ogden:

$$\alpha_1 = -0,60858524; \alpha_2 = 0,49573556; \alpha_3 = 1,3721143;$$

$$\mu_1 = -400258,5 \text{ Pa}; \mu_2 = -1424761,9 \text{ Pa}; \mu_3 = 533706,88 \text{ Pa}; K = 4,2055084 \cdot 10^9 \text{ Pa}.$$

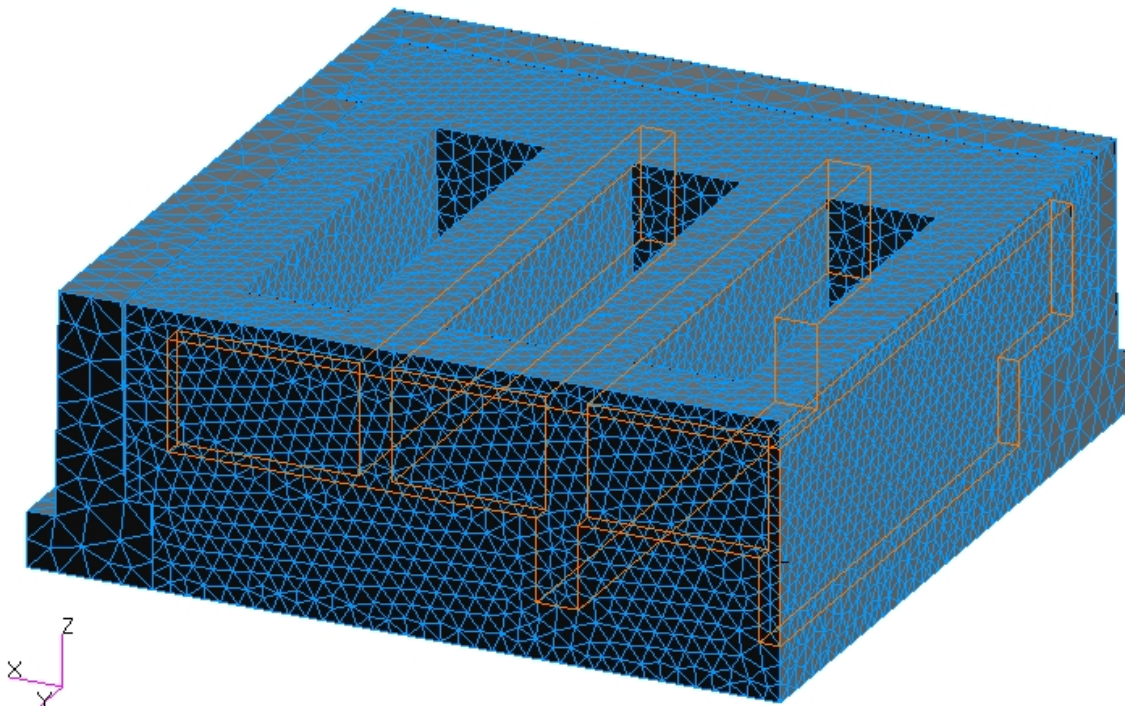
3.2.2 Tvorba sítě

Dalším krokem bylo vytvoření prostorové sítě v tělesech. Síť byla vytvořena síťovacím podprogramem jako tzv. *TetMesh*, což je síť tvořená elementy tvaru čtyřstěnu (*Tet 4 – Tet 40*)⁷. Tato síť je nezbytná pro síťování složitějších těles. V daném případě byla zvolena varianta *Tet 4*.

⁷ Číslo uvádí celkový počet uzlových bodů na hranách elementu.

Parametry sítě:

kanálová vpust v litinovém rámu

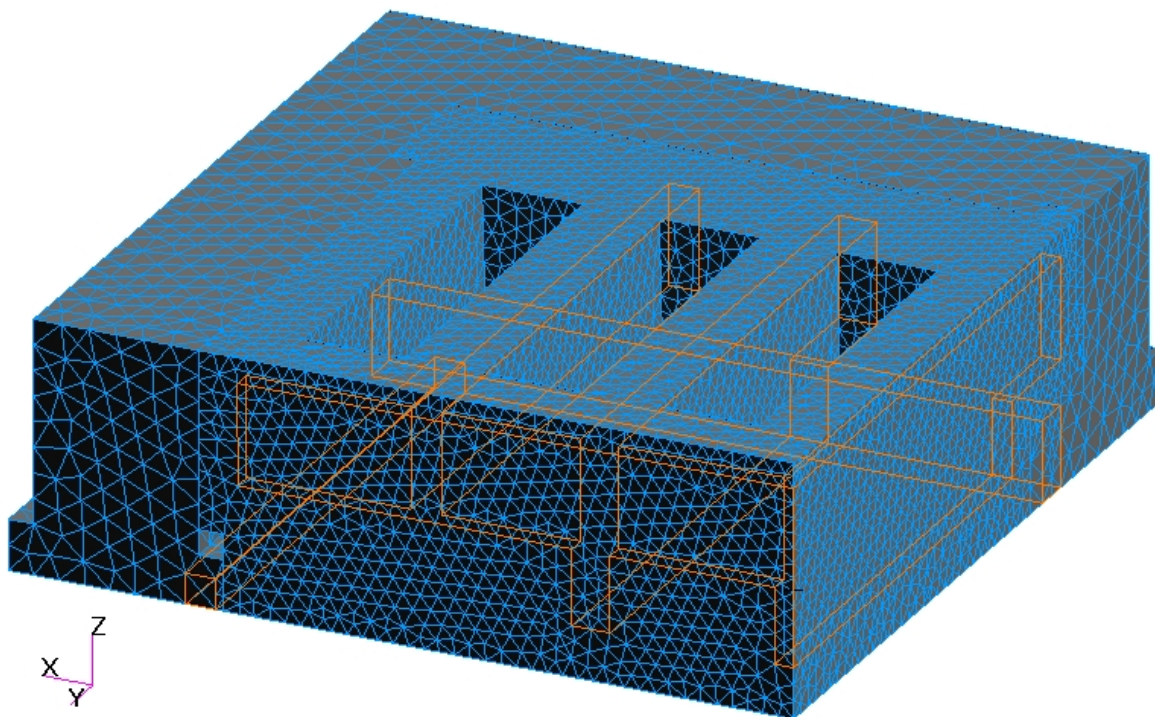


Obr. 57 Prostorová síť čtvrtiny sestavy kanálové vpusti a litinového rámu

Tab. 27 Parametry sítě

	čtvrtina sestavy		polovina sestavy	
	l_{he} [mm]	n_e	l_{he} [mm]	n_e
Výztuha vpusti	6	17408	6	34018
Nalisovaná kompozitní vrstva vpusti	6	102449	6	227837
Litinový rám	10	17115	10	25265
Celkem	-	136972	-	287120

V tabulce l_{he} označuje délku hrany elementu a n_e počet elementů

kanálová vpust v rámu 1B

Obr. 58 Prostorová síť čtvrtiny sestavy kanálové vpusti a rámu 1B

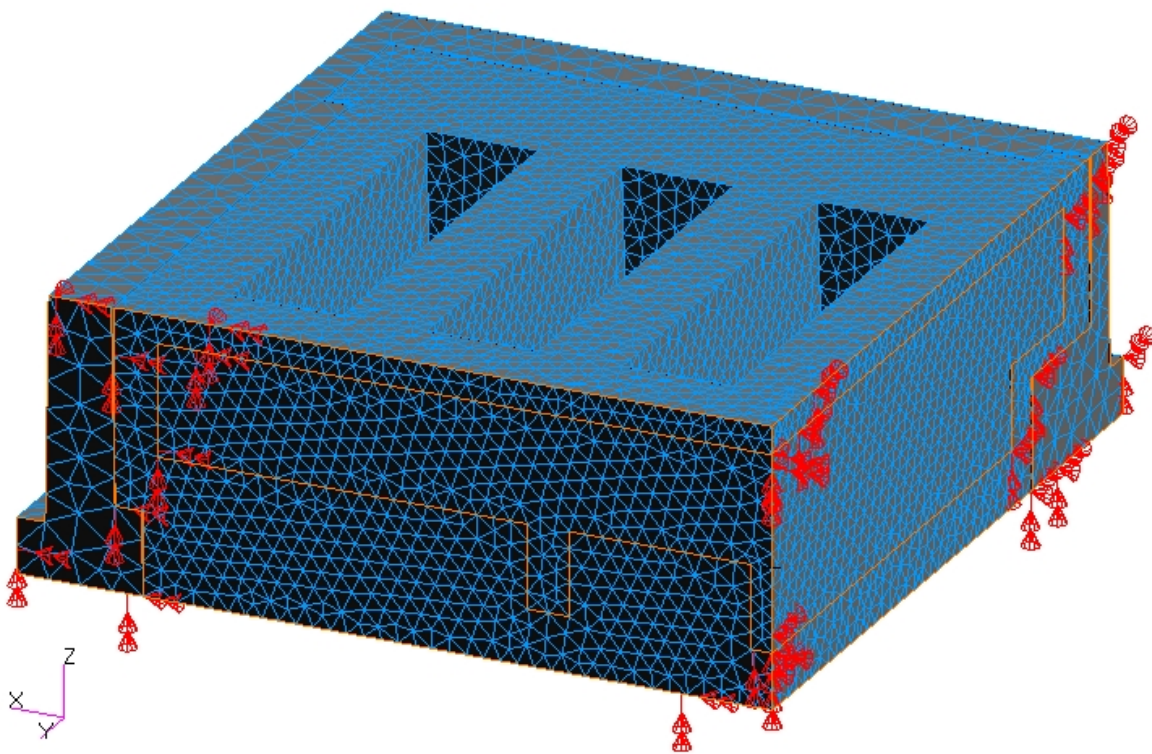
Tab. 28 Parametry sítě

	čtvrtina sestavy		polovina sestavy	
	l_{he} [mm]	n_e	l_{he} [mm]	n_e
Výztuha vpusti	6	17408	7	21238
Nalisovaná kompozitní vrstva vpusti	6	102449	7	127997
Výztuha rámu 1B	10	1353	12	1938
Nalisovaná kompozitní vrstva rámu 1B	10	29903	12	34539
Celkem	-	151113	-	185712

3.2.3 Okrajové podmínky

Podmínky symetrie

Jelikož byla analýze podrobena pouze čtvrtina (polovina) vpusti a rámu bylo nutné nadefinovat podmínky symetrie v rovinách myšleného řezu středem sestavy (Obr. 59). V rovině řezu xz bylo nadefinováno posuvné uložení (v rovině xz) a vetknutím ve směru osy y . Tím pádem bylo umožněno v dané rovině natočení kolem osy y . V rovině řezu yz bylo nadefinováno vetknutí ve směru osy x a posuvné uložení v rovině yz . Bylo tudíž umožněno natočení kolem osy x . Symetrie v rovině yz se nedefinovala pro analýzu poloviny sestavy.

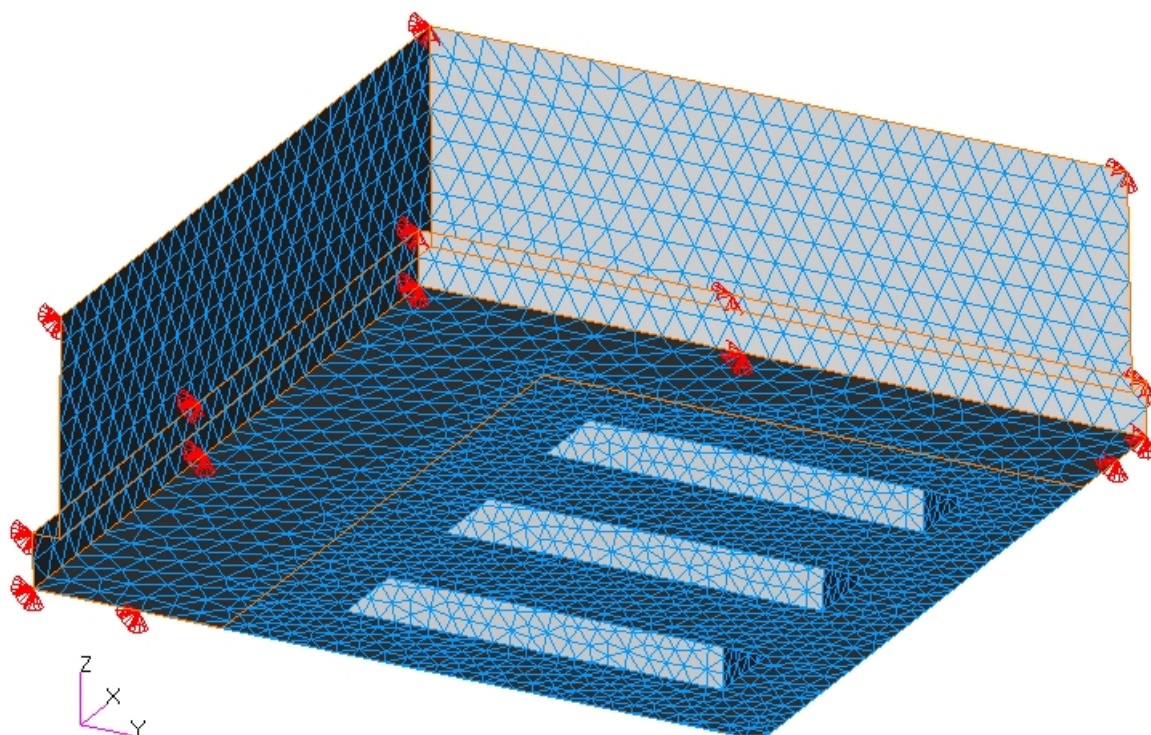


Obr. 59 Nadefinované podmínky symetrie čtvrtiny vpusti s litinovým rámem

Uložení

Uložení vpusti je dáno rámem, jež nejlépe postihuje reálné podmínky při zatížení. Rám je upevněn na bocích a na spodní straně (Obr. 60).

Rozdíl je pouze u rámu 1B, kde je dno uloženo s ohledem na možnost deformace pryžové kompozitní vrstvy přilehlé bočním stěnám vpusti. Totálně vetknuta je proto jen spodní plocha řezu výztuhy rámu, zatímco plocha řezu kompozitní vrstvy je pouze podepřená.



Obr. 60 Uložení čtvrtiny vpusti s litinovým rámem

Spojení mezi výztuhou a nalisovanou vrstvou kompozitu

Byla vytvořena pevná vazba sloučením uzlových bodů elementů na rozhraní výztuhy a nalisované vrstvy.

Zatížení

Kanálová vpust 1A splňuje podmínky dle ČSN EN 124 a je zaříděna do kategorie C 250, čili zaručuje minimální únosnost 25 tun. Z toho důvodu bylo pro analýzu zvoleno zatížení odpovídající břemenu o hmotnosti 25 tun.

Byly zkoumány 2 způsoby zatížení:

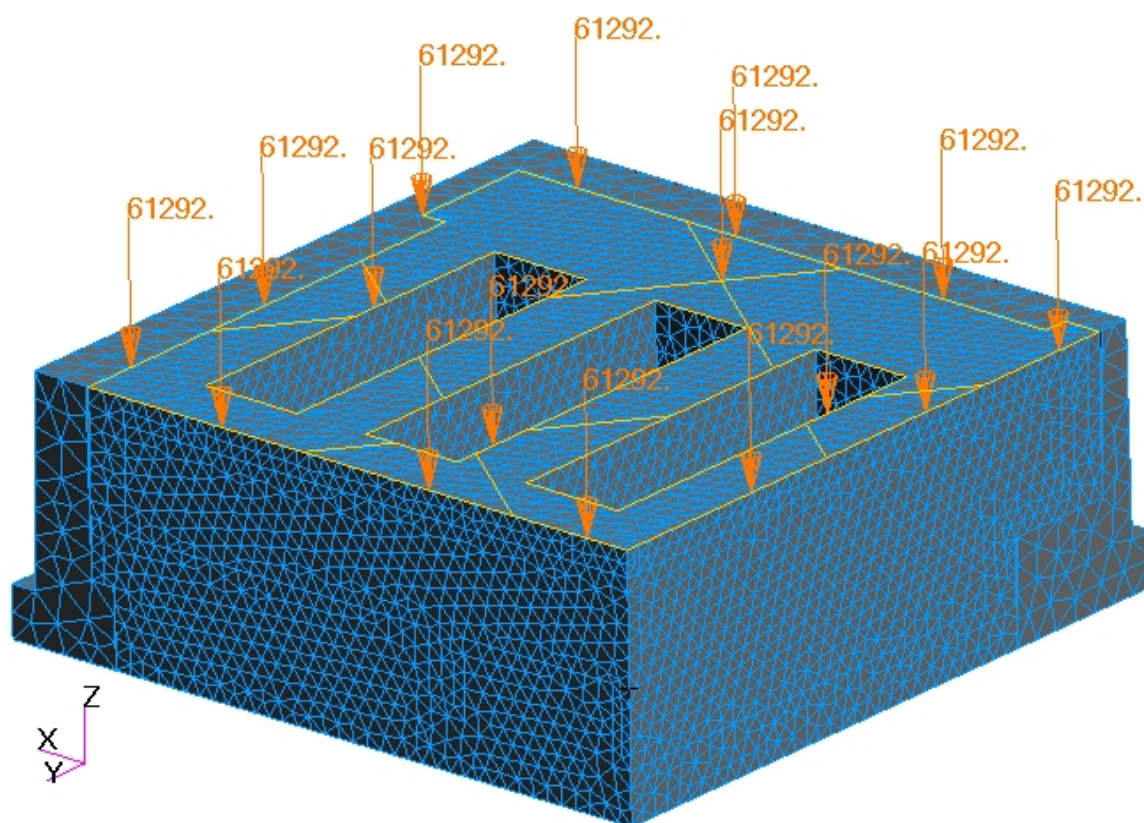
1. Spojitě zatížení působící kolmo na horní plochu vpusti.

Výpočet síly pro čtvrtinu vpusti:

$$F_g = \frac{1}{4} \cdot m \cdot g = \frac{25000 \cdot 9,80665}{4} = \underline{61291,56 \text{ N}}. \quad (53)$$

Výpočet normálového napětí:

$$\sigma = \frac{F_g}{S} = \frac{61291,56}{37875} = \underline{1,618 \text{ MPa}}. \quad (54)$$



Obr. 61 Kolmé spojitě zatížení

2. Spojité zatížení působící na horní plochu vpusti šikmo pod úhlem 30° (v rovině xz)

Šikmo působící zatížení by mělo simulovat břemeno v okamžiku uvádění do pohybu. Záměrně bylo šikmé zatížení orientováno v rovině xz , resp. příčně k žebrům výztuhy. Účelem bylo zjistit chování nalisované vrstvy žeber při příčném zatížení s horizontální složkou síly.

Výpočet vstupních dat pro polovinu vpusti:

Složka síly ve směru osy x

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{25000 \cdot 9,80665 \cdot \operatorname{tg} 30^\circ}{2} = \underline{70773,4 \text{ N}}. \quad (55)$$

Složka síly ve směru osy z

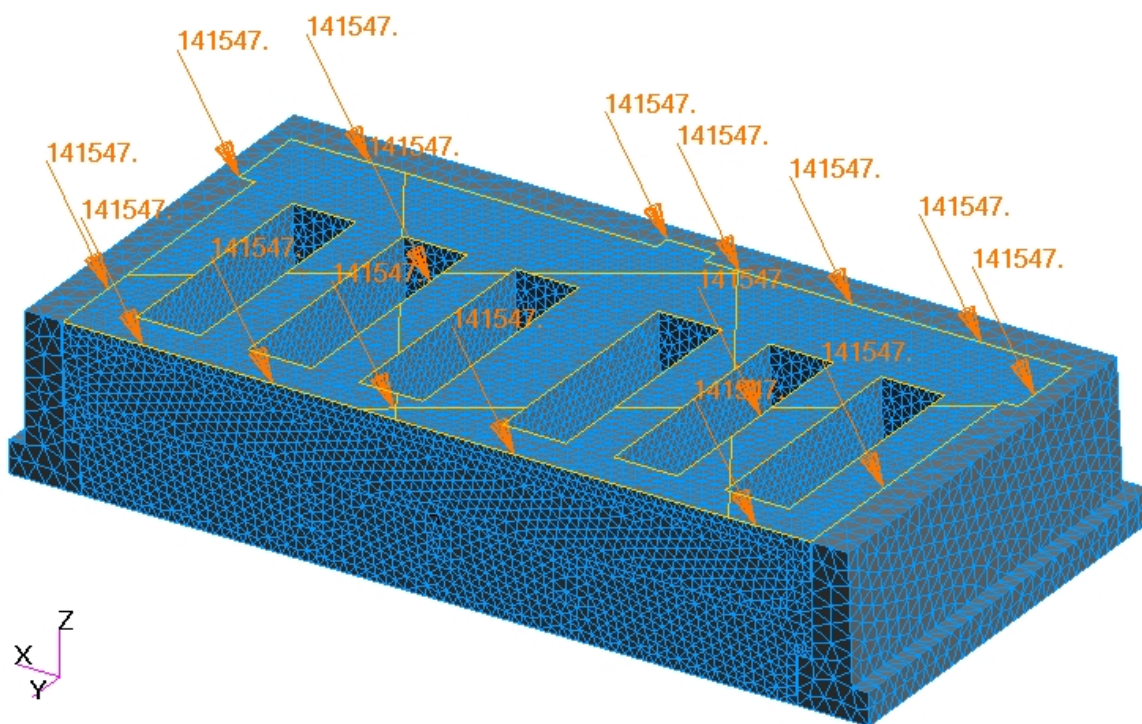
$$F_z = F_g = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g = \frac{25000 \cdot 9,80665}{2} = \underline{122583,13 \text{ N}}. \quad (56)$$

Výslednice sil

$$F = \sqrt{F_g^2 + F_x^2} = \sqrt{122583,13^2 + 70773,4^2} = \underline{141546,8 \text{ N}}. \quad (57)$$

Výpočet normálového a smykového napětí

$$\sigma = \frac{F_g}{S} = \frac{122583,13}{75750} = \underline{1,618 \text{ MPa}}, \quad \tau = \frac{F_x}{S} = \frac{17693,35}{75750} = \underline{0,934 \text{ MPa}}. \quad (58)$$

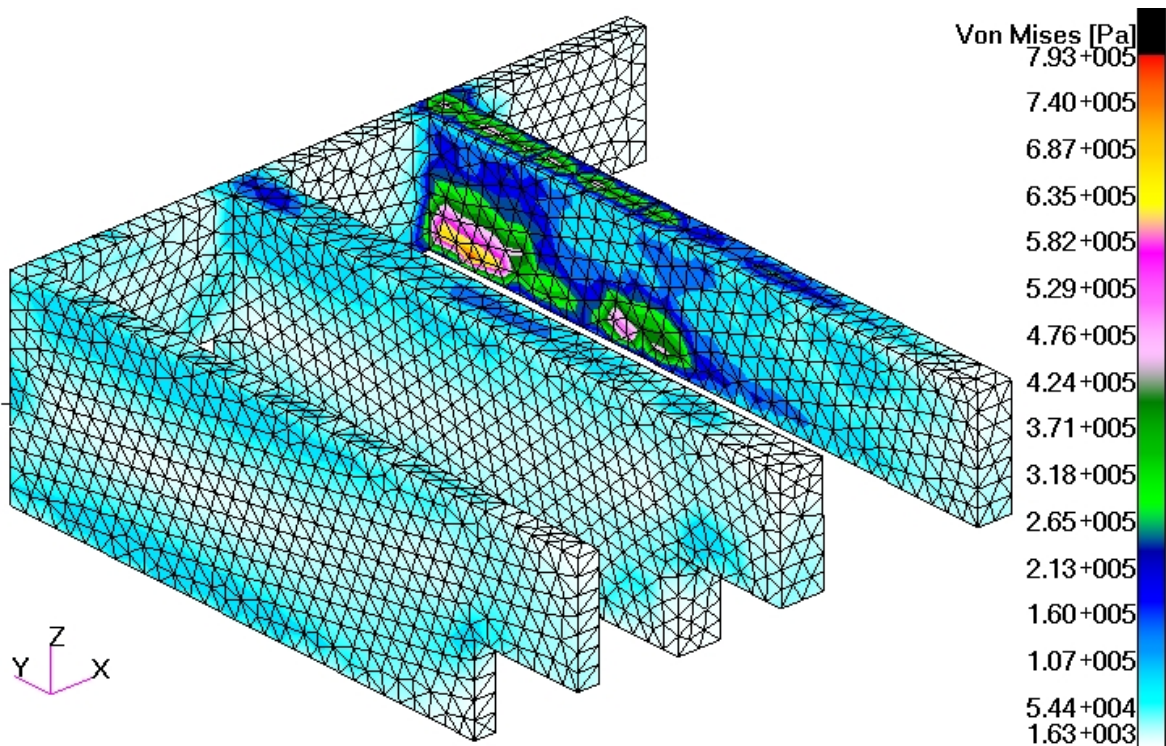


Obr. 62 Šikmé spojité zatížení

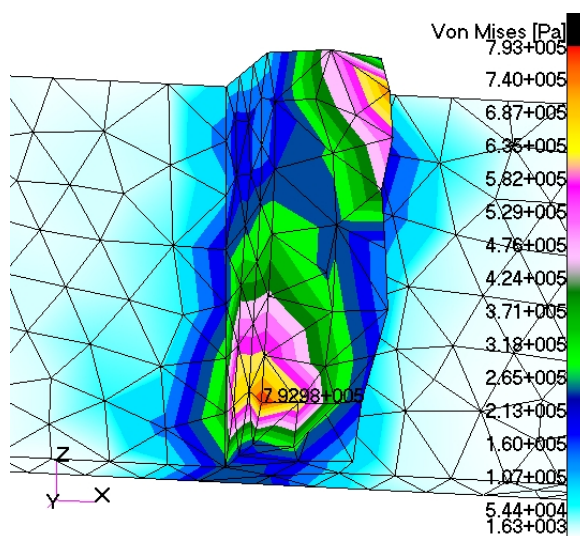
3.3 Výsledky numerické analýzy

3.3.1 Kanálová vpust v litinovém rámu pod účinkem kolmého spojitého zatížení

Z výsledků analýzy vyplývá, že napětového maxima bylo dosaženo v ocelové výztuze v blízkosti svarů. Konkrétně v blízkosti koutového svaru centrálního ocelového plátu s nejtenčím plátem se vyskytuje napětové maximum $\sigma_{S \max} = 0,79298 \text{ MPa}$ (Obr. 63 a 64).



Obr. 63 Von Misesovo srovnávací napětí ve výztuze kanálové vpusti



Ověření podmínky:

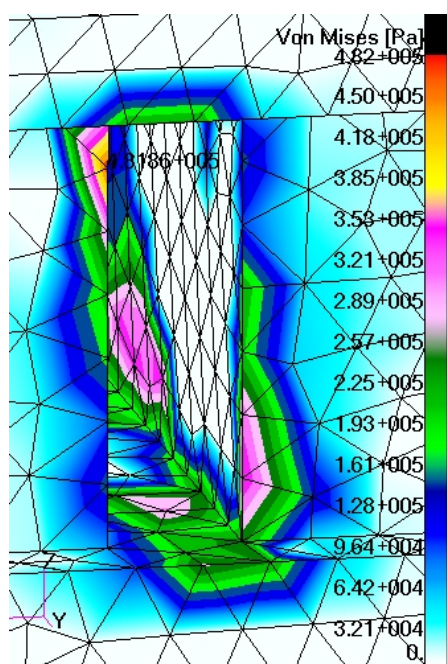
$$k \cdot \sigma_{S \max} < \sigma_{K_2} \quad (59)$$

$$5 \cdot 0,793 < 355$$

$$\underline{\underline{3,965 \text{ MPa} < 355 \text{ MPa}}}$$

podmínka je splněna

Obr. 64 Řez výztuhy v oblasti napětového maxima



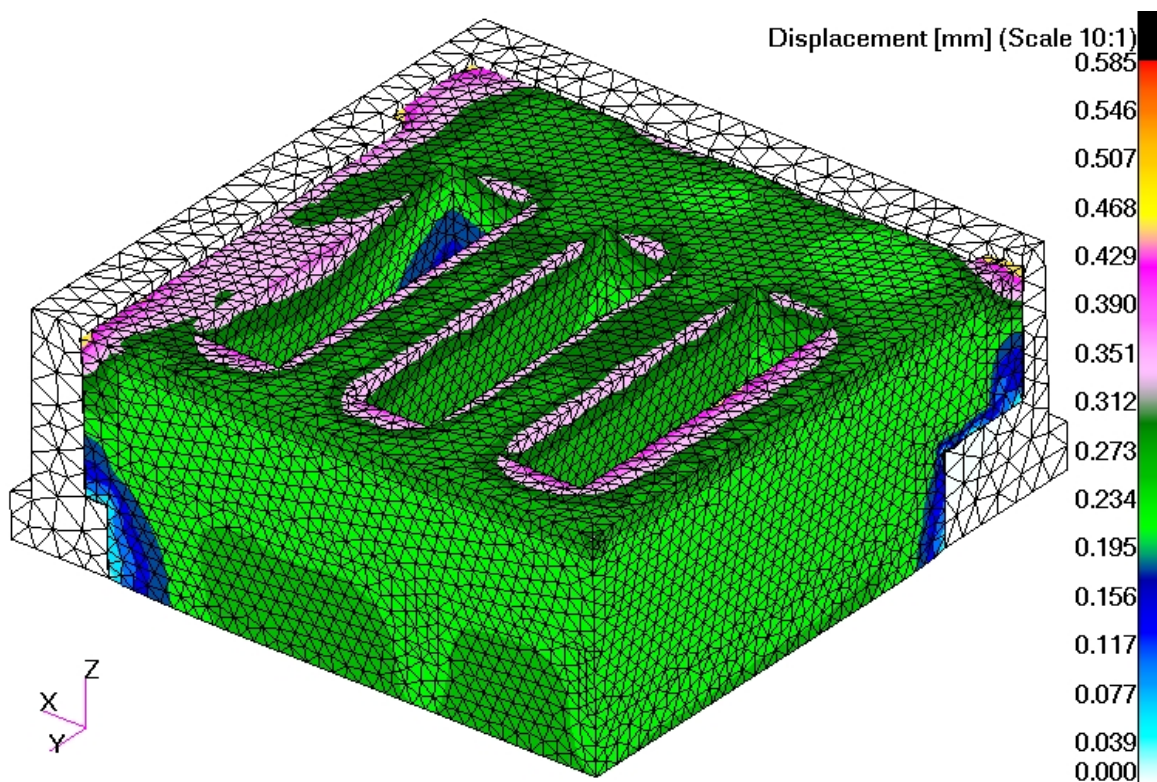
Obr. 65 Von Misesovo srovnávací napětí v kompozitní vrstvě

větší tloušťka vrstvy kompozitu na výztuze. Oproti ostatním žebřům je zde téměř dvojnásobná.

Jak je znázorněno na obrázků 65, v blízkosti koutových svarů výztuhy je kompozitní vrstva namáhána nejvíce. Srovnávací napětí v rozích dosahuje jen hodnoty 0,4819 MPa, která nepřekračuje mez pevnosti kompozitního materiálu ($\sigma_{P13} = 0,939$ MPa).

Největší deformace byla zaznamenána na hraně vnějšího okraje horní zatěžované plochy (Obr. 66). Maximální deformace zde činí 0,585 mm.

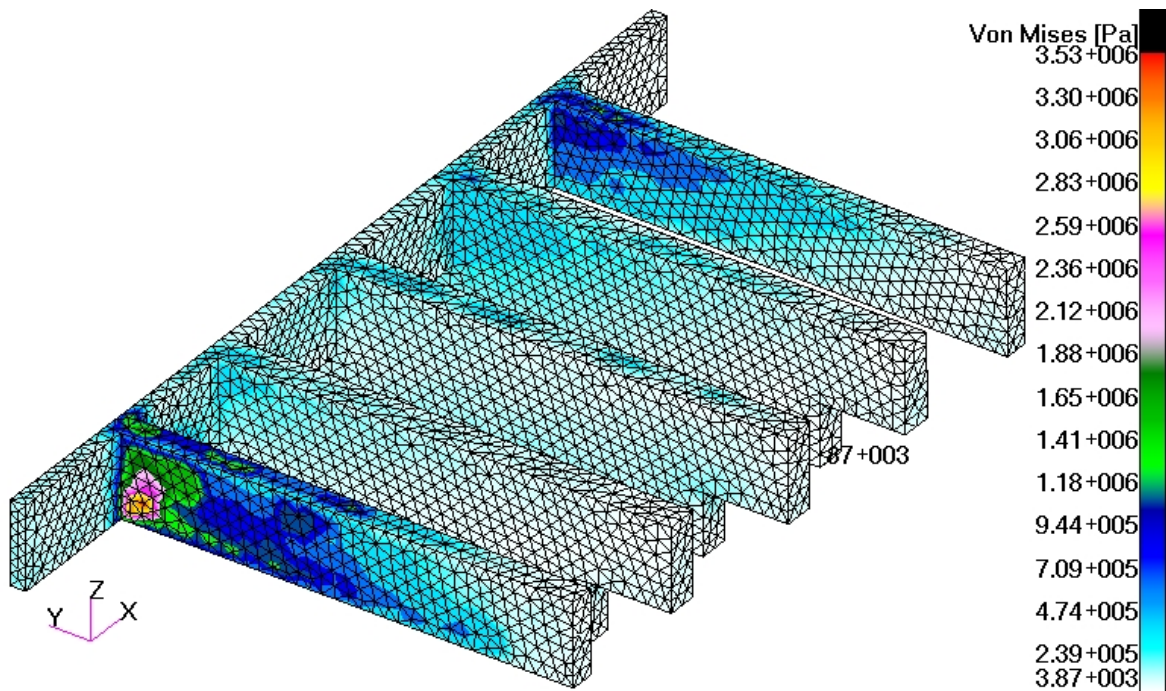
Mírně zvýšené deformace (cca. 0,35 mm) bylo dosaženo u krajního žebra bez výztuhy, kdežto u žeber s výztuhou byla zaznamenána deformace o 0,1 mm menší. Na obrázku je nevyztužené žebro zbarvené dorůžova. Větších deformací bylo dosaženo i na hraně středového žebra. Příčinou je



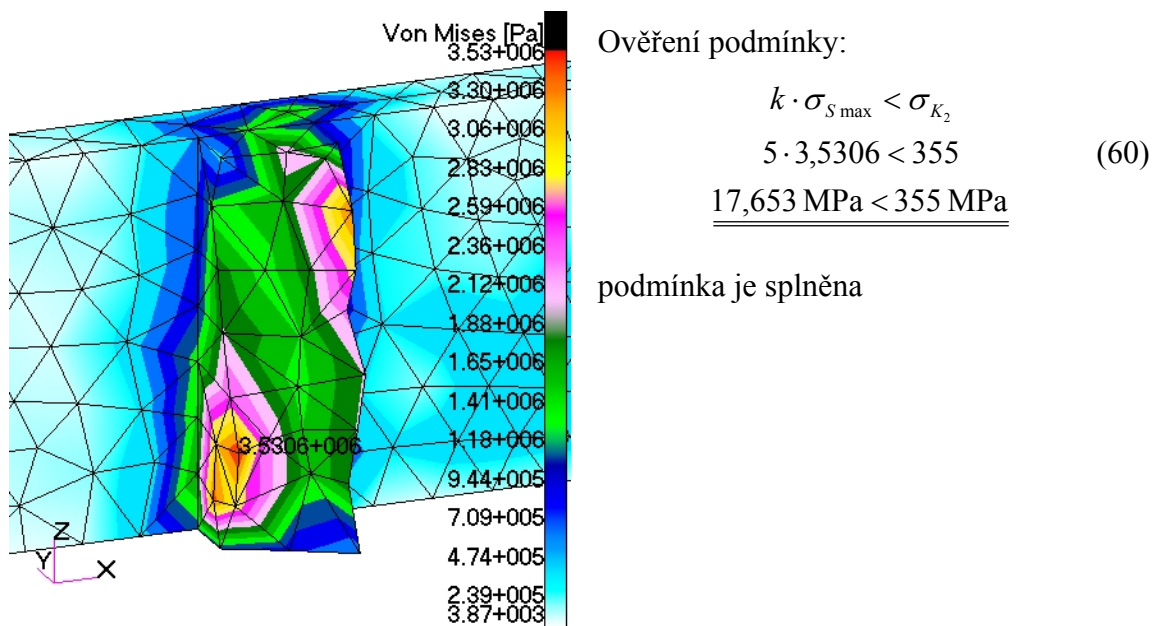
Obr. 66 Deformace kanálové vpusti v měřítku 10:1

3.3.2 Kanálová vpust v litinovém rámu pod účinkem šikmého spojitého zatížení

Při působení šikmým zatížením bylo napět'ové maximum rovněž dosaženo v ocelové výztuze, v blízkosti svarů. Konkrétně se napět'ové maximum $\sigma_{S_{max}} = 3,5306$ MPa vyskytuje u spodní hrany nejtenčího ocelového plátu, v blízkosti koutového svaru (Obr. 67 a 68).



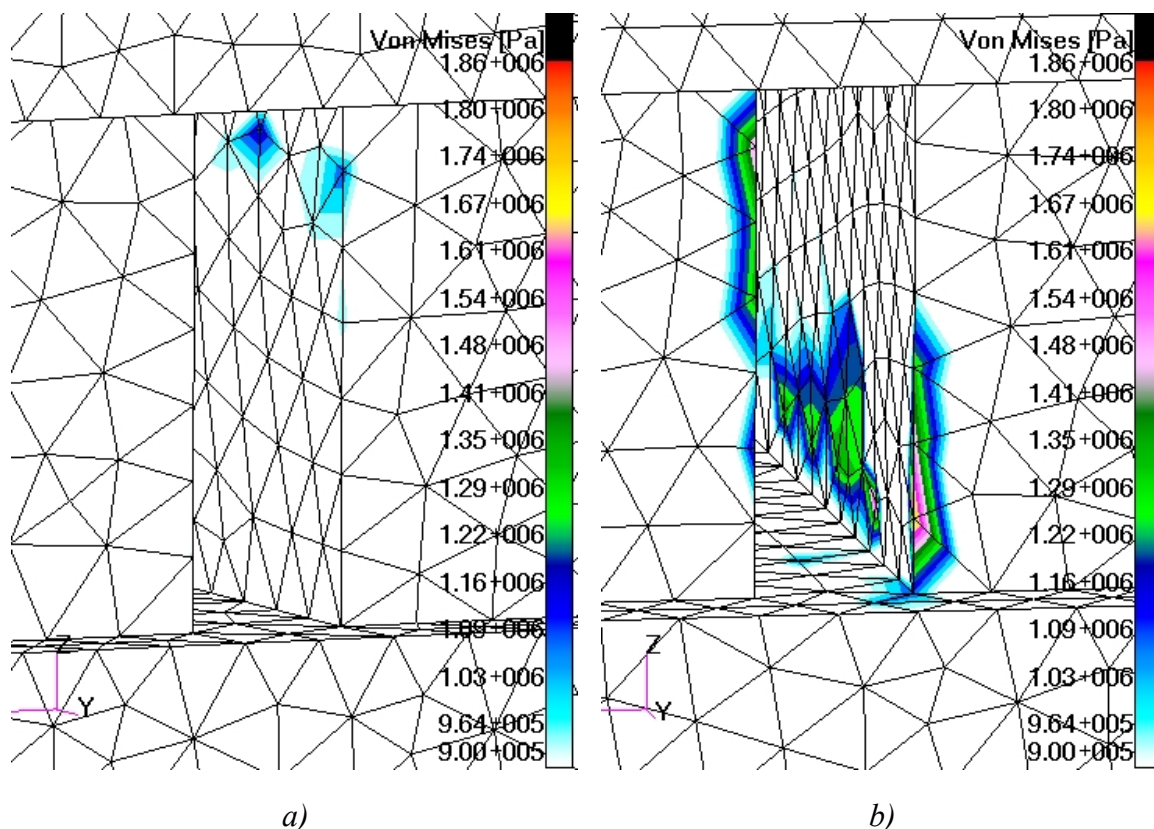
Obr. 67 Von Misesovo srovnávací napětí ve výztuze kanálové vpusti



Obr. 68 Detailní řez výztuhy v oblasti napět'ového maxima

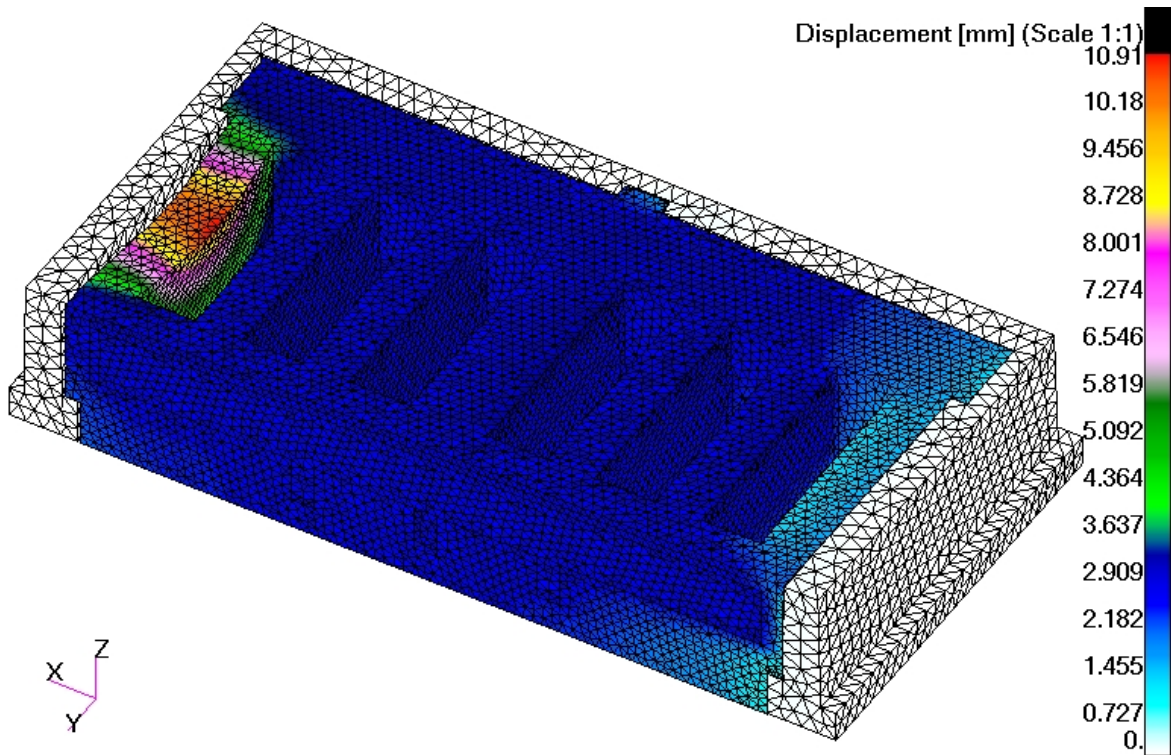
Obr. 69 znázorňuje místa, kde by mohlo dojít k narušení (destrukci) kompozitní vrstvy. Zbarvená místa v kompozitní vrstvě značí oblasti, kde von Misesovo srovnávací napětí překračuje hodnotu 0,9 MPa. Mez pevnosti kompozitního materiálu přitom dosahuje pouze hodnoty $\sigma_{P13} = 0,939$ MPa. Riziková místa se vyskytují jen v blízkosti koutových svarů levého (Obr. 69a) a pravého (Obr. 69b) tenkého výztužného žebra.

Nutno ovšem podotknout, že v analýze nebyl zahrnut předpoklad omezené pevnosti spojení mezi výztuhou a nalisovanou kompozitní vrstvou.

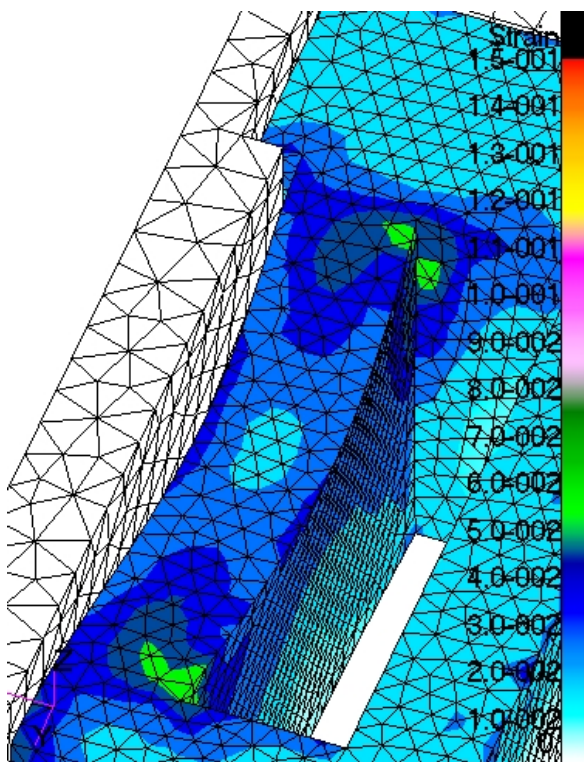


Obr. 69 Oblasti možného výskytu poruchy kompozitní vrstvy

Pod účinkem šikmo orientovaného zatížení se nejvíce zdeformovalo krajní žebro bez ocelové výztuhy (Obr. 70). Deformace v bodě největšího posuvu dosahuje hodnoty 10,91 mm. Zbýlé části vpusti se posunuly přibližně o 2,8 mm.



Obr. 70 Deformace kanálové vpusti v měřítku 1:1



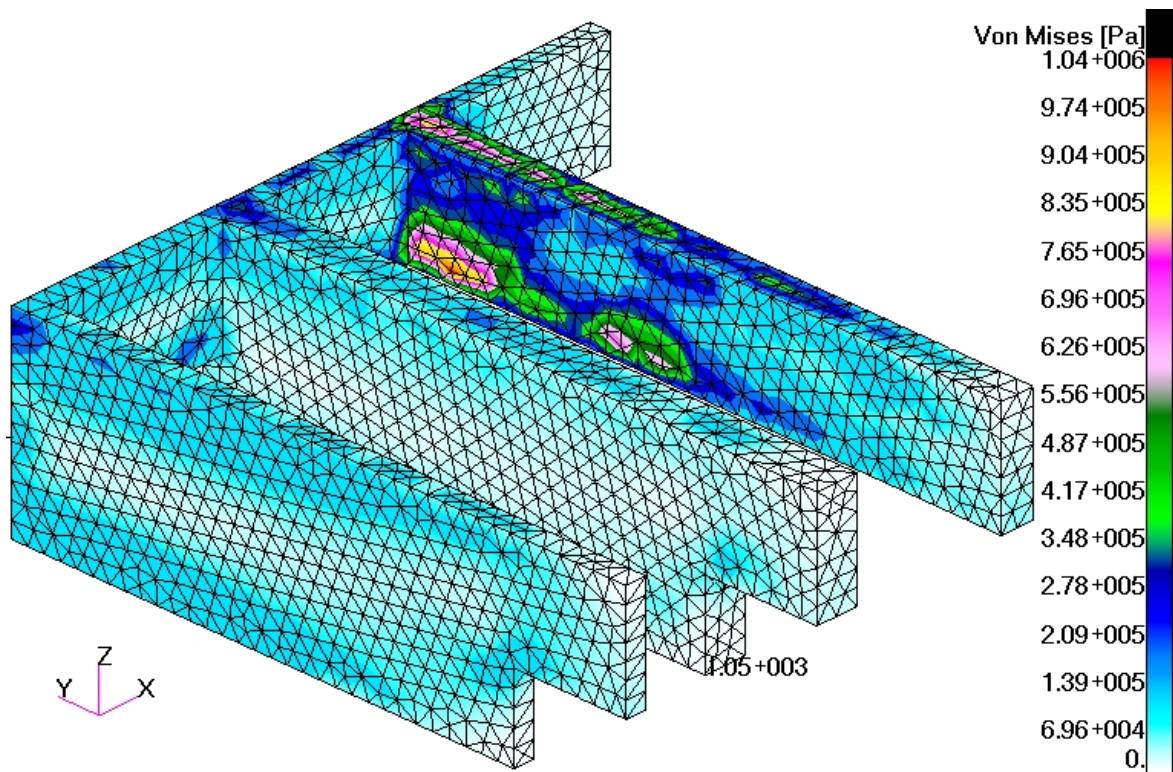
Obr. 71 Poměrná deformace v místě největšího průhybu

Na obrázku 71 je znázorněna poměrná deformace v místě největšího průhybu. Její přibližná hodnota zde činí pouhých 3,5 %. Nedosahuje tudíž poměrné deformace 9,5 %, při které by došlo k překročení meze pevnosti kompozitního materiálu (Obr. 56).

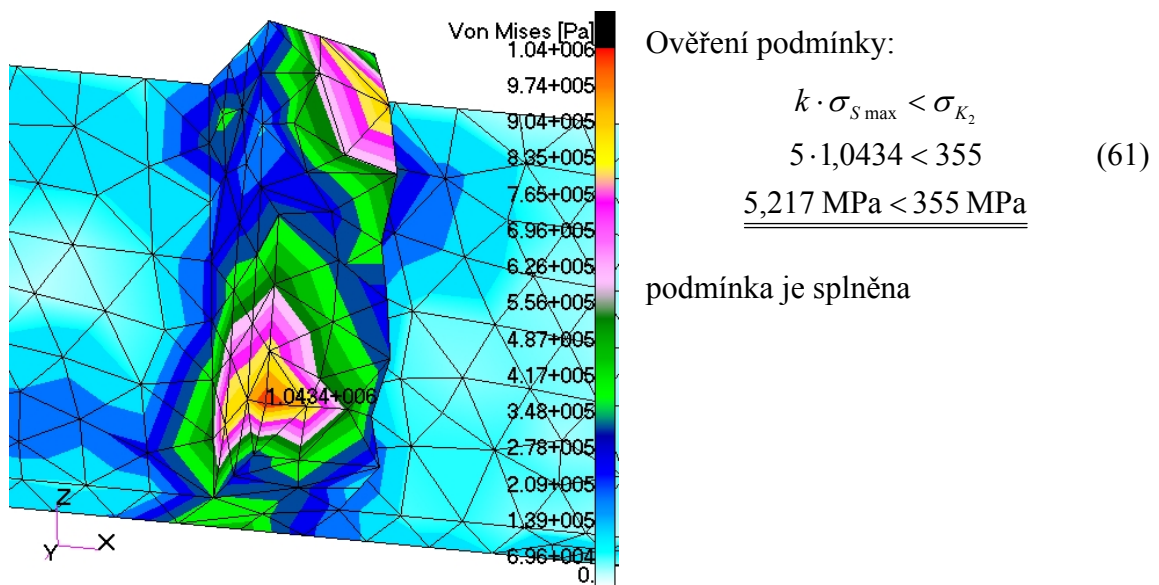
Na povrchu vpusti jsou patrné i další oblasti s výraznými poměrnými deformacemi. Nicméně dochází v nich k namáhání tlakem, jež kompozitní materiál snáší dobře.

3.3.3 Kanálová vpust v pryžokovovém rámu zatížená kolmým spojitým zatížením

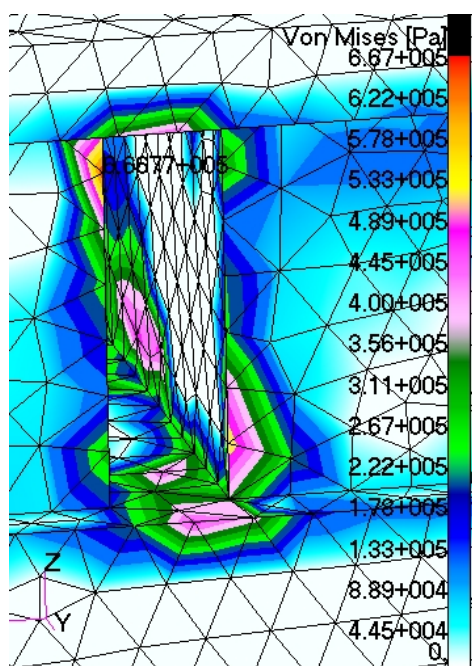
Stejně jako v případě vpusti uložené v litinovém rámu i zde bylo napěťové maximum dosaženo v ocelové výztuze v blízkosti svarů. Dosažené napěťové maximum je ale o 0,25 MPa vyšší ($\sigma_{S \max} = 1,0434$ MPa) (Obr. 72 a 73).



Obr. 72 Von Misesovo srovnávací napětí ve výztuze kanálové vpusti



Obr. 73 Řez výztuhy v oblasti napěťového maxima



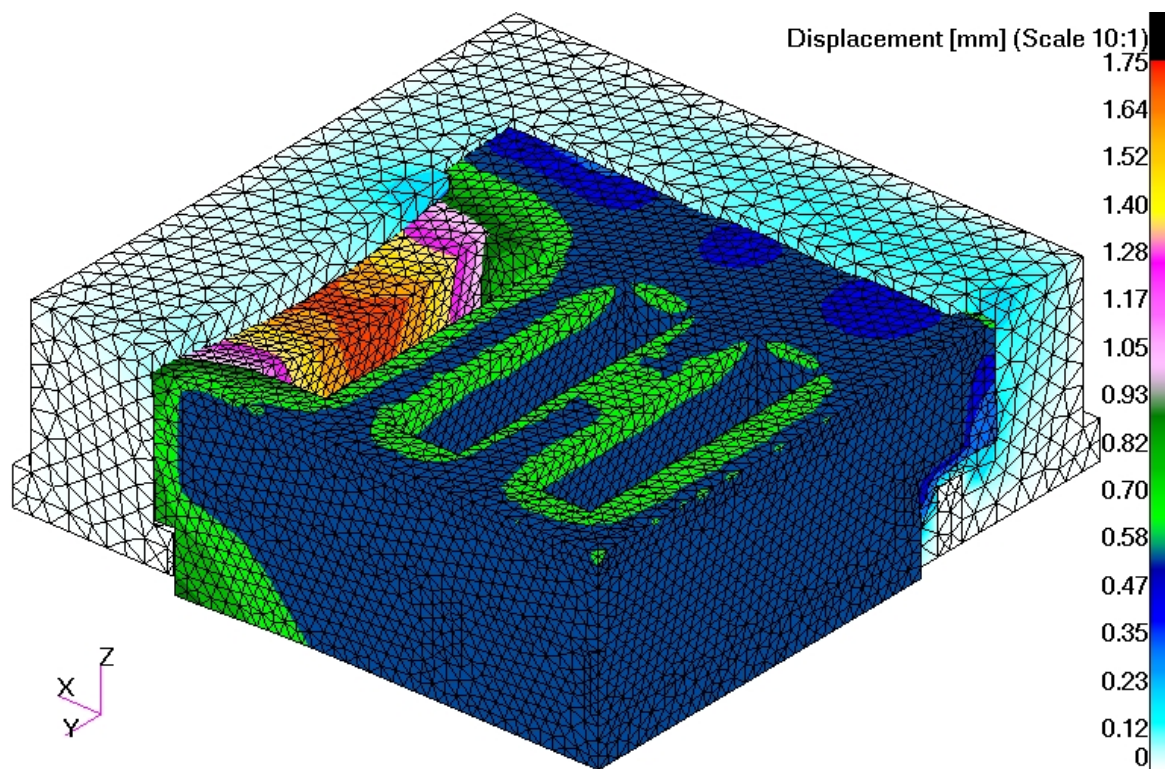
Obr. 74 Von Misesovo srovnávací napětí v kompozitní vrstvě

nejvíce pak v místě podepření vpusti. To nejspíš vedlo k větší deformaci horní plochy vpusti, jež činí cca. 0,5 mm. Nepatrně větších deformací bylo dosaženo i na horních hranách žebér.

Na obrázků 74 jsou zbarvena místa s rozložením napětí v kompozitní vrstvě. Zvláště v blízkosti koutových svarů výztuhy a místy i na stěnách nejtenčího výztužného plátu se vyskytují maxima. Přesto srovnávací napětí nepřekračuje hodnotu změřené meze pevnosti kompozitního materiálu $\sigma_{P13} = 0,939$ MPa.

Použitím pryžokovového rámu došlo ke zvětšení deformace na hodnotu 1,75 mm (Obr. 75). Největší průhyb byl zaznamenán u krajního žebra, přičemž příčinou zvýšené deformace je opět absence výztuhy v žebru.

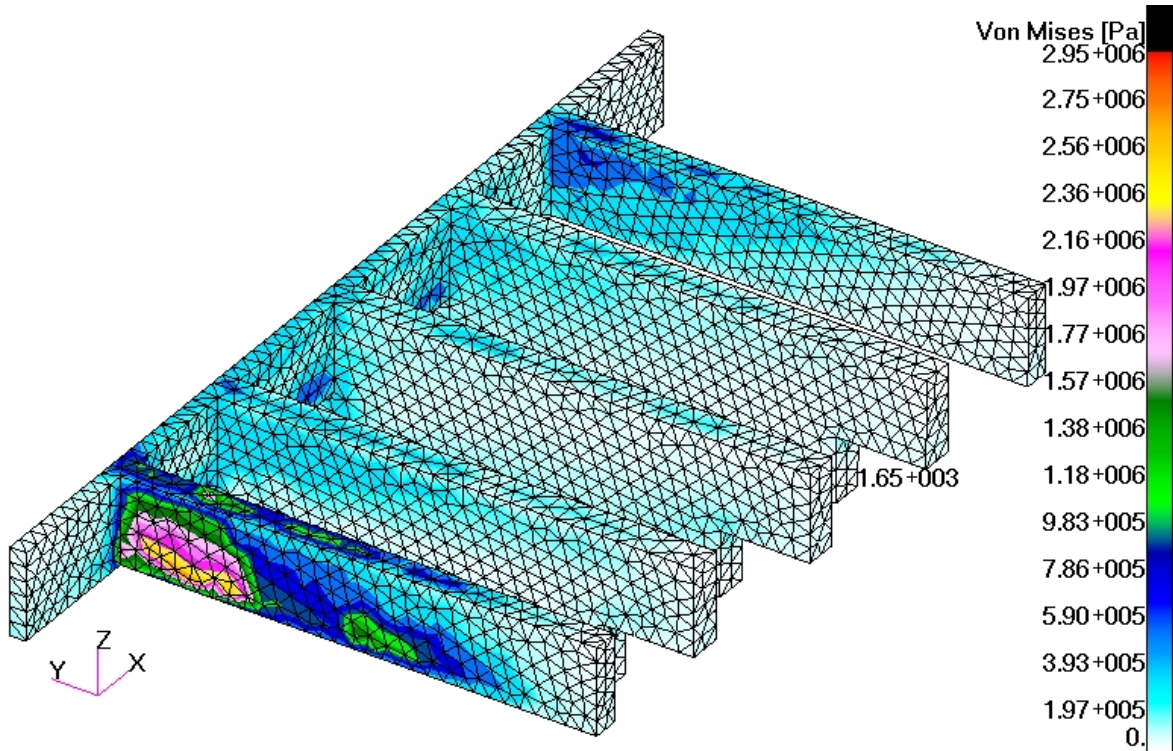
Z obrázku je dále patrné, že po celém obvodu vpusti došlo k deformaci pryžokovového rámu,



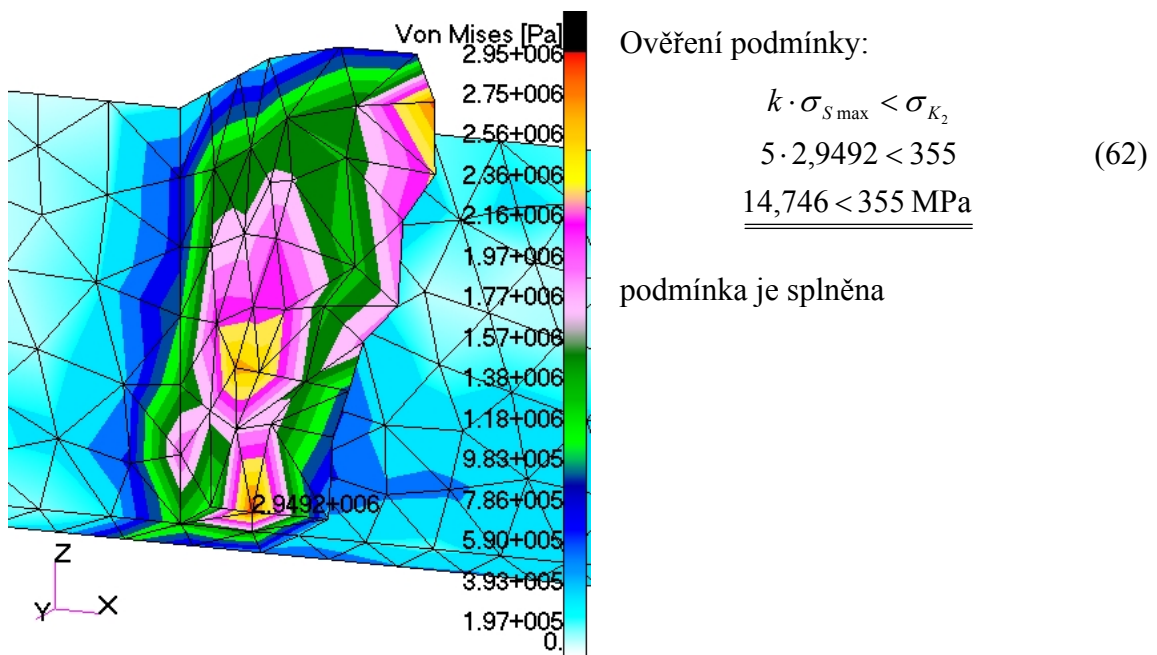
Obr. 75 Deformace kanálové vpusti v měřítku 10:1

3.3.4 Kanálová vpust v pryžokovovém rámu zatížená šikmým spojitým zatížením

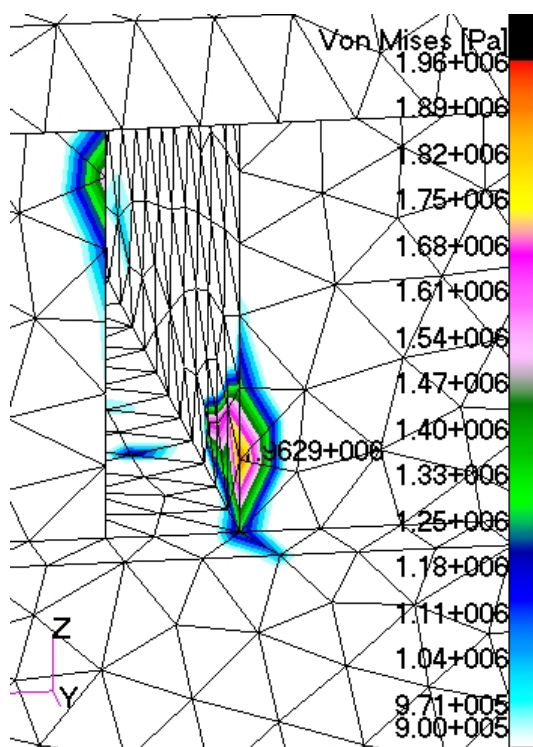
Podle výsledků analýzy se napět'ové maximum $\sigma_{S\max} = 2,9492$ MPa nachází u spodní hrany tenkého ocelového plátu, v blízkosti koutového svaru s centrálním plátem (Obr. 76, 77).



Obr. 76 Von Misesovo srovnávací napětí ve výztuze kanálové vpusti



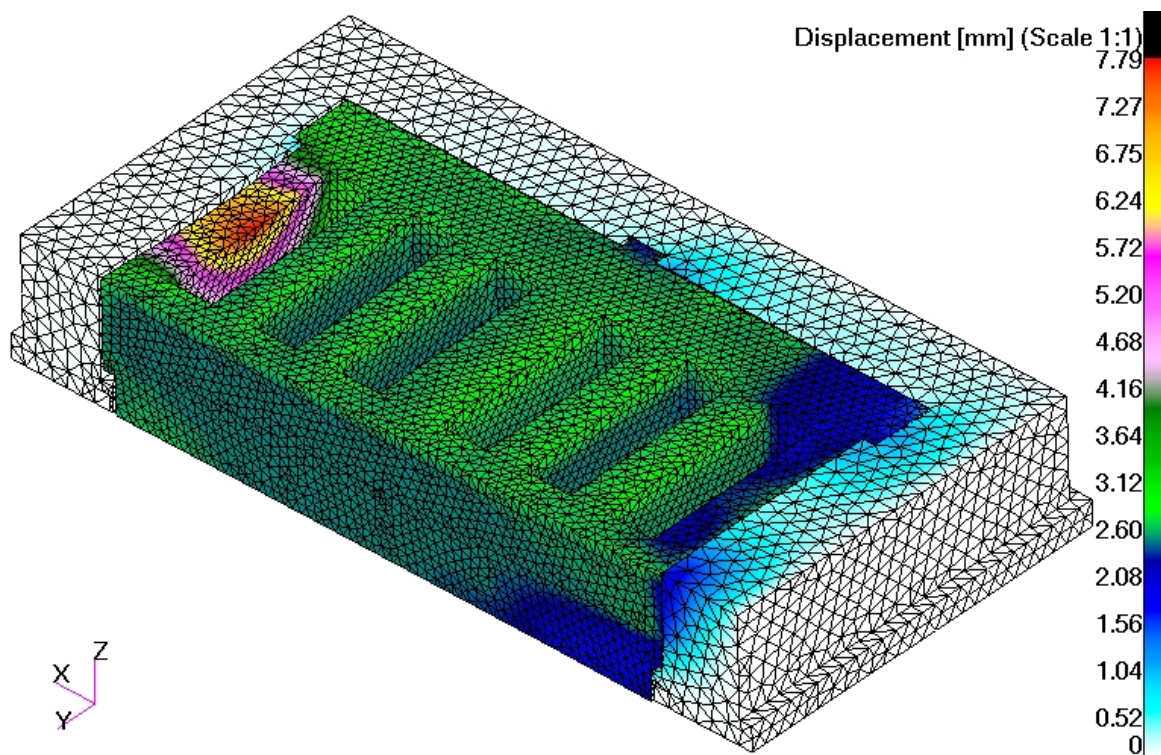
Obr. 77 Detailní řez výztuhy v oblasti napět'ového maxima



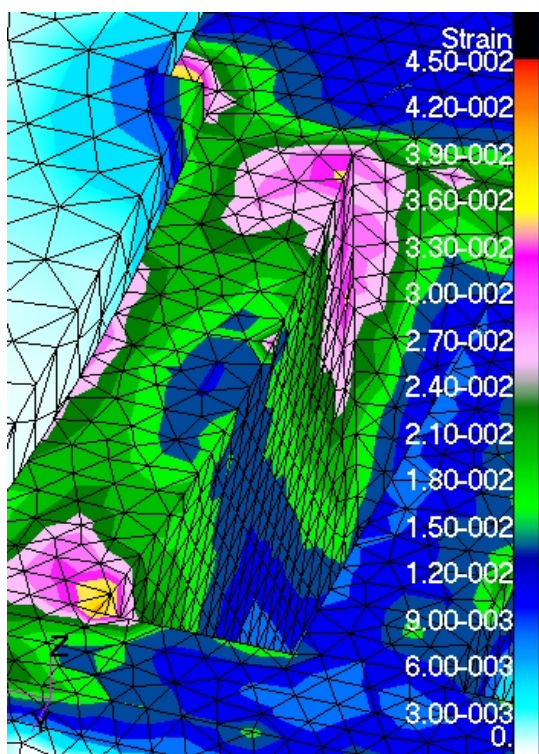
Obr. 78 Oblasti možného výskytu poruchy kompozitní vrstvy

Na obrázku 78 jsou barevně zvýrazněny lokality, kde by mohlo dojít k narušení kompozitní vrstvy. Von Misesovo srovnávací napětí zde překračuje hodnotu meze pevnosti kompozitního materiálu ($\sigma_{P13} = 0,939$ MPa). Jedná se o oblast spojenou s nejvíce namáhanou částí výztuhy (Obr. 76, 77). K porušení kompozitního materiálu tedy může dojít ve spoji s nejtenčí výztuhou, v rozích u koutových svarů výztuhy.

Pod účinkem šikmo orientovaného zatížení se zdeformovalo krajní žebro bez ocelové výztuhy (Obr. 79). Deformace v bodě největšího protažení činí 7,79 mm. Zbylé části vpusti se posunuly o více než 3,5 mm.



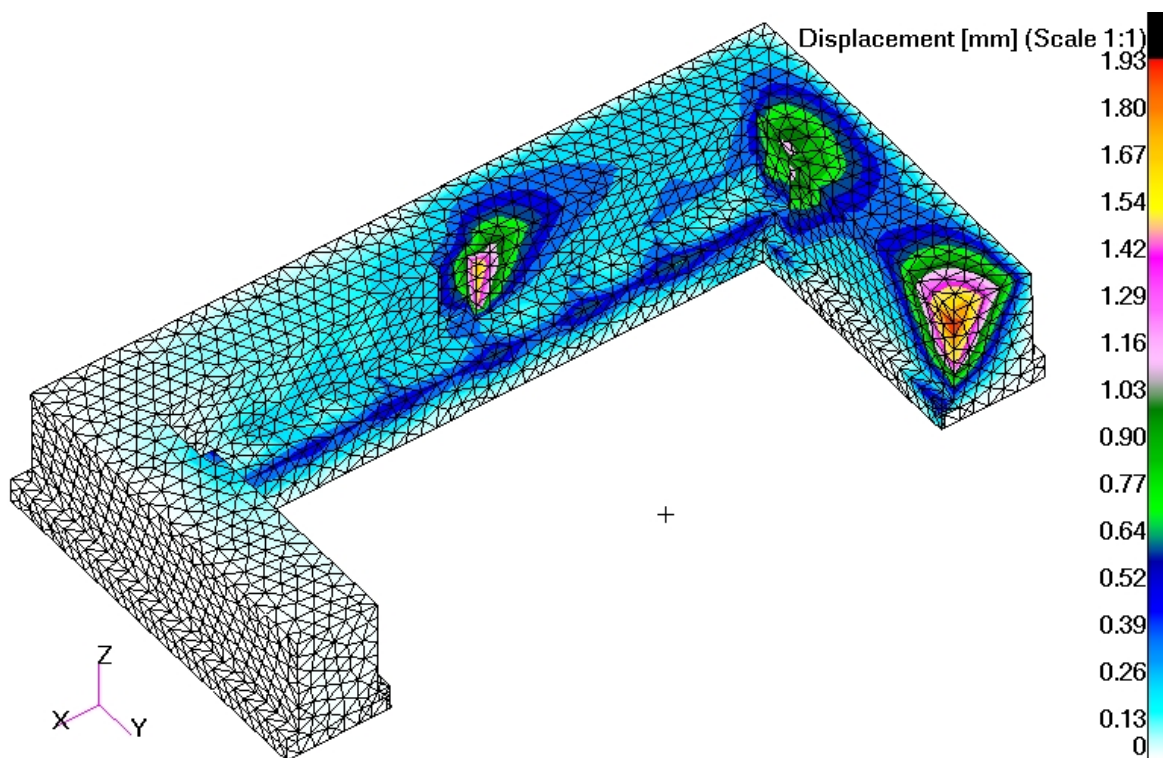
Obr. 79 Deformace kanálové vpusti v měřítku 1:1



V bodě největšího průhybu krajního žebra poměrná deformace nepřesahuje hodnotu 3,3 % (Obr. 80). V rizikovém místě tudíž nehrozí snížení pevnosti materiálu, či vznik poruch (trhlin).

Na průběh deformace měly evidentně vliv okrajové podmínky, definované uložením v pryžokovovém rámu. Došlo totiž ke stlačení kompozitní vrstvy rámu v oblasti dosedových ploch (Obr. 81). Stlačení zde dosahuje hodnoty až 1,93 mm.

Obr. 80 Oblasti možného výskytu poruchy kompozitní vrstvy



Obr. 81 Deformace dosedacích ploch pryžokovového rámu 1B v měřítku 1:1

3.4 Hodnocení výsledků

Srovnáním výsledků analýz vpusti pod účinkem kolmého zatížení se zjistilo, že vykazuje obdobné chování, ať již je uložena litinovým rámu, či v pryžokovovém rámu. Srovnatelné je rozložení napjatosti v nalisované kompozitní vrstvě i v ocelové výztuze. Rozdíl je pouze ve velikosti zjištěného napětí. V obou případech se napěťové maximum vyskytuje na stejném místě, u spodní hrany nejtenčí výztuhy (tloušťky 12 mm), v blízkosti koutového svaru. Nicméně u vpusti uložené v pryžokovovém rámu byla určena o 0,25 MPa větší hodnota srovnávacího von Misesova napětí ($\sigma_{S \max} = 1,0434$ MPa). Největší koncentrace napětí v kompozitní vrstvě se vyskytla v rozích u koutových svarů nejtenčí výztuhy. Maximální hodnota ($\sigma_{S \max} = 0,667$ MPa) ale nepřekračuje mez pevnosti kompozitu, tudíž nehrozí vznik poruchy. Nicméně pryžokovový rám umožnil nepatrně větší deformaci vpusti. Převážná část horní plochy vpusti se posunula o 0,5 mm, přičemž u litinového rámu jen cca. 0,25 mm. V nevyztuženém krajním žebro se navíc zvětšil průhyb a maximální deformace zde činí 1,75 mm.

Rozdíly v chování vpusti byly zaznamenány pod účinkem šikmého zatížení. V obou případech uložení se napěťové maximum vyskytlo u spodní hrany nejtenčí výztuhy, v blízkosti koutových svarů. Zato mírně odlišné jsou stanovené hodnoty srovnávacího von Misesova napětí: 3,531 MPa u vpusti uložené v litinovém rámu a 2,949 MPa u vpusti uložené v pryžokovovém rámu. Co se týče oblastí poruch kompozitní vrstvy, největší koncentrace poruch byla opět zjištěna v blízkosti svarů s nejtenčí výztuhou. Dalším poznatkem bylo, že v obou případech uložení došlo k výrazné deformaci krajního nevyztuženého žebra. U vpusti uložené v litinovém rámu byla stanovena max. deformace na hraně krajního žebra 10,91 mm a u vpusti v pryžokovovém rámu pak 7,79 mm. Přesto z výsledků vyplývá, že v místě největší deformace, na horní hraně nevyztuženého žebra, nedojde ke snížení pevnosti, či dokonce k lomu kompozitní vrstvy. Nicméně lze pokládat krajní žebro za nejslabší prvek konstrukce vpusti.

ZÁVĚR

V rámci práce bylo provedeno porovnání vlivu pojiv a povrchových úprav na soudržnost spoje pryžového kompozitu s ocelovou výztuhou. Byly provedeny speciální tlakové i tahové zkoušky pro šest variant spojů. Dále byly provedeny FEM analýzy kanálové vpusti 1A (AB Elpo spol s r. o.), zatížené kolmým a šikmým plošným spojitým zatížením. Zkoumány byly i vlivy dvou odlišných okrajových podmínek, definovaných uložením v litinovém a pryžokovovém rámu 1B (AB Elpo spol s r. o.).

Statistickým porovnáním výsledků tahové zkoušky se dospělo k názoru, že nejlepší soudržnost vykazují spojení kombinující pískovaný povrch ocelového jádra s nátěry pojiv Plaston PP 010, nebo MDI. Soudržnost obou kombinací je srovnatelná na 45,69 %. U kombinace s pojivem Plaston PP 010 byla dosažena průměrná hodnota zatěžující síly $F = 5362,49$ N a u pojiva MDI pak $F = 4056,284$ N. Navíc při tlakové zkoušce (do zatížení 20 kN) pouze u těchto kombinací spojů nedošlo k rozlepení, či destrukci kompozitní vrstvy těles. Nejnižší průměrná hodnota stlačení 12,82 mm byla dosažena u kombinace s pojivem Plaston PP 010. U kombinace s pojivem MDI byla dosažena průměrná hodnota stlačení 13,22 mm.

Z výsledků numerických analýz vyplynulo zjištění, že kanálová vpust je schopna snášet kolmé spojitě zatížení odpovídající zátěži 25 tun, bez viditelných známek poškození. Nezáleží na tom, zda je vpust uložena v litinovém, či v pryžokovovém rámu. Ani v jednom případě nedošlo k průhybu výztuhy, zdeformovala se jen nalisovaná vrstva kompozitu. Největší deformace byla dosažena u vpusti uložené v pryžokovovém rámu. Krajní žebro se v daném případě prohnulo a deformace dosáhla maximální hodnoty 1,75 mm.

Pod účinkem šikmého plošného zatížení se projevíly některé nedostatky konstrukce vpusti. Došlo k většímu prohnutí nevyztuženého krajního žebra až na hodnotu 10,91 mm. I přesto poměrné protažení v místě největšího průhybu nedosáhlo limitní hodnoty, při které by došlo ke snížení pevnosti kompozitu. Pokud by se ale mělo předejít větším deformacím krajního žebra, bylo by vhodné do jeho středu přidat výztuhu.

Ze všech analýz dále vyplynulo, že nejvíce namáhanou částí výztuhy vpusti je nejtenčí plochá tyč o tloušťce 12 mm. Napětí se zde koncentruje v blízkosti svaru s centrální výztuhou. V důsledku toho by mohlo dojít k rozlepení spoje, či dokonce k vnitřnímu narušení kompozitní vrstvy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GENT, N. Alan. *Engineering with Rubber*. Munich: Carl Hauser Verlag. 2001
- [2] SASSO, M. aj.. Characterization of hyperelastic rubber-like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods, In *Polymer Testing*. [online] Elsevier: 2008. roč. 27. č. 8. s. 995-1004. ISSN: 0142-9418. Dostupné z WWW: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.09.001>>
- [3] ŠŮLA, Miroslav. *Pojení pryže s kovem*. Zlín: ČSPCH. 2007. 63 s. ISBN 978-80-02-01934-3
- [4] PETRIE, Edward M. *Handbook of Adhesives and Sealants*. McGraw-Hill Companies. 2000. 871 s. ISBN 0-07-049888-1
- [5] BROWN, Roger. *Handbook of polymer testing*. New York: Marcel Dekker, Inc.. 1999
- [6] KOHNE P. *ANSYS – Theory reference*. Canonsburg. PA. USA. ANSYS. Inc. 1998.
- [7] MSC.SOFTWARE CORPORATION. *Nonlinear finite element analysis of elastomers*. [online]. MSC.Software Corporation. 2000. Dostupné na WWW: <http://www.mssoftware.com/assets/103_elast_paper.pdf>
- [8] BECHIR, H. CHEVALIER, L. aj.. Hyperelastic constitutive model for rubber-like materials based on the first Seth strain measures invariant. In *European Journal of Mechanics - A/Solids*. [Online] Elsevier. 2006. roč. 25. č. 1. s. 110-124. ISSN: 0997-7538. Dostupné na WWW: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.euromechsol.2005.03.005>>
- [9] ARRUDA, E. BOYCE, M. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials. In *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. [Online] Elsevier. 1993. roč. 41. č. 2. s. 389-412. ISSN: 0022-5096. Dostupné na WWW: <[http://dx.doi.org/10.1016/0022-5096\(93\)90013-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-5096(93)90013-6)>
- [10] BROWN, Roger. *Physical Testing of Rubber*. New York: Springer Science + Business Media, Inc. 2006. 387 s. ISBN 0-387-28286-6
- [11] DUCHÁČEK, V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití* [online]. Verze. Praha: VŠCHT. 2006. 280 s. [cit. 2009-02-10]. Dostupné na WWW: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/>. ISBN 80-7080-617-6
- [12] HOLUB, Josef. *Pryž jako konstrukční materiál*. Praha: SNTL, 1967

- [13] PAVELKA, F. RYTÍŘ, V. *Metody statistické analýzy*. Brno: VUT. 1999. 118 s. ISBN 80-214-1503-7
- [14] ČERNOCH, S. *Strojně technická příručka 1*. Praha: SNTL. 1977. 1296 s.
- [15] OGDEN, R. W. *Non-linear Elastic Deformations*. Dover Publications, Mineola, NY, USA. 1997.
- [16] KOUTNÝ, F. *Konstrukce výrobků – Geometrie a mechanika pneumatik*. Zlín: UTB. 2009. 139 s. ISBN 978-80-7318-796-5
- [17] BUSFIELD, J. MUHR, H. A. Constitutive models for rubber III. [Online] Lisse: Taylor & Francis. 2003. 446 s. ISBN: 90-5809-566-5. Dostupné na WWW: <<http://books.google.cz>>
- [18] AB Elpo spol. s r. o.. [online]. Dostupné na WWW: <<http://www.abelpo.cz/>>
- [19] Franko. Kanalizační mříže z recyklované pryže. [online]. Dostupné na WWW: <<http://www.volny.cz/franko/index.htm>>
- [20] Bolzano spol s r. o.. Technická příručka - Přehled vlastností oceli S355JO. [online]. Dostupné na WWW: <<http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprir1/tycovaocel/EN10025/S355JO/>>
- [21] PODRÁBSKÝ, T. POSPÍŠILOVÁ, S. *Struktura a vlastnosti grafitických litin*. [online]. Brno: VUT. 2006. Dostupné na WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/savgl/index.php?chapter=10>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Název	Jednotka
Δh	stlačení při maximálním tlaku	[mm]
Δl_{Fmax}	deformace při maximální síle	[mm]
a_0	šířka zatěžované plochy tlakem před deformací	[mm]
b_0	délka zatěžované plochy tlakem před deformací	[mm]
C_{ij}	hyperelastická materiálová konstanta	[MPa]
dsk	dílů na sto kaučuku	
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	síla	[N]
F_g	tíhová síla	[N]
F_{max}	maximální zátěžová síla	[N]
F_x	síla ve směru osy x	[N]
F_z	síla ve směru osy z	[N]
g	gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
h	výška vzorku	[mm]
h_0	výška vrstvy před deformací	[mm]
h_0'	tloušťka vrstvy před deformací	[mm]
H_i	hypotéza	
I_i	deformační invariant	
k	Boltzmannova konstanta	[J.K ⁻¹]
k	koeficient bezpečnosti	
K	objemový modul pružnosti	[MPa]
l	délka zalisovaného jádra, vzdálenost podpor	[mm]
L	délka pracovní části zkušebního tělesa při protažení	[mm]

L_0	délka pracovní části nezatíženého tělesa	[mm]
l_{he}	délka hrany elementu	[mm]
m	hmotnost	[kg]
n	hustota řetězců makromolekuly	
n_e	počet elementů	
p	hydrostatický tlak	[MPa]
p_{max}	maximální tlak	[MPa]
r	poloměr zaoblení	[mm]
R	soudržnost pojiva	[N.mm ⁻¹]
S	plocha průřezu pracovní části zkušebního tělesa, plocha spojení zkušebního tělesa, plocha zatížení tlakem	[mm ² , cm ²]
s	výběrová směrodatná odchylka	
t	teplota	[°C]
T	teplota	[K]
t	tloušťka vzorku při deformaci	[mm]
t_0	počáteční tloušťka vzorku	[mm]
$t_{1-\alpha}(v)$	kritická hodnota pro v stupňů volnosti	
$T_{n,m}$	testové kritérium	
v	rychlost posuvu	[mm.min ⁻¹]
W	hustota deformační energie	[J.m ⁻³]
w	šířka vzorku	[mm]
\bar{x}	aritmetický průměr	
\tilde{x}	medián	
α	hladina významnosti	[%]
α	úhel sklonu zatížení	[°]

α	materiálová konstanta	
α_i	materiálová konstanta	
β	materiálová konstanta	
ε	poměrná deformace	[%]
λ_i	poměrné protažení	[%]
μ	základní tvar smykového modulu	[MPa]
μ_i	materiálová konstanta	[MPa]
ν	variační koeficient	[%]
ν	poissonovo číslo, stupeň volnosti	
σ	normálové napětí	[MPa]
σ_i	napětí ve směru i	[MPa]
σ_K	mez kluzu	[MPa]
σ_{Pt}	mez pevnosti v tahu	[MPa]
σ_S	srovnávací von Misesovo napětí	[MPa]
τ	smykové napětí	[MPa]
φ	úhel odlupu	[°]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Tahový diagram elastomeru	23
Obr. 2 Jednoosá napjatost [1]	26
Obr. 3 Dvouosá napjatost [1].....	27
Obr. 4 Čistý smyk [1]	28
Obr. 5 Proložení Mooney-Rivlinova modelu experimentálními daty jednoosého tahu [10]	30
Obr. 6 Osmi-řetězcová síť ve zdeformovaném stavu [9].....	32
Obr. 7 Proložení Ogdenova modelu experimentálními daty z jednoosé a dvouosé tahové zkoušky [2]	34
Obr. 8 Srovnání pojivosti běžných i speciálních pojiv [4]	41
Obr. 9 Srovnání pevnosti ve smyku běžných pojiv při nízkých teplotách [4].....	47
Obr. 10 Tahové zkoušky [2]	48
Obr. 11 Zkušební těleso, tzv. osmička [10]	49
Obr. 12 Upínací systém pro dvouosý tah [10]	50
Obr. 13 Metoda nafukování plochého vzorku [2].....	51
Obr. 14 Princip optického měření poloměru vydutí vzorku [2]	51
Obr. 15 Upínací zařízení pro měření čistého smyku [2].....	52
Obr. 16 Nejužívanější zkoušky soudržnosti pryže s kovem [10]	53
Obr. 17 Čtyřnásobná sendvičová konstrukce zkušebního tělesa [1]	54
Obr. 18 Zkušební přípravek	58
Obr. 19 Zkušební těleso	59
Obr. 20 Vadné zkušební těleso	59
Obr. 21 Zkušební přípravek na trhacím stroji.....	60
Obr. 22 Závislost síly na deformaci pro 1. typ spojení.....	61
Obr. 23 Závislost síly na deformaci pro 2. typ spojení.....	62

Obr. 24 Závislost síly na deformaci pro 3. typ spojení.....	63
Obr. 25 Závislost síly na deformaci pro 4. typ spojení.....	64
Obr. 26 Závislost síly na deformaci pro 5. typ spojení.....	65
Obr. 27 Závislost síly na deformaci pro 6. typ spojení.....	66
Obr. 28 Závislost síly na deformaci pro 1. typ spojení.....	67
Obr. 29 Závislost síly na deformaci pro 3. typ spojení.....	69
Obr. 30 Závislost síly na deformaci pro 5. typ spojení.....	71
Obr. 31 Závislost síly na velikosti plochy pro 1. typ spoje	73
Obr. 32 Závislost síly na velikosti plochy pro 2. typ spoje	73
Obr. 33 Závislost síly na velikosti plochy pro 3. typ spoje	74
Obr. 34 Závislost síly na velikosti plochy pro 4. typ spoje	74
Obr. 35 Závislost síly na velikosti plochy pro 5. typ spoje	75
Obr. 36 Závislost síly na velikosti plochy pro 6. typ spoje	75
Obr. 37 Krabicový graf srovnání 1. a 5. typu spoje.....	77
Obr. 38 Krabicový graf srovnání 1. a 6. typu spoje.....	78
Obr. 39 Krabicový graf srovnání 5. a 6. typu spoje.....	79
Obr. 40 Zkušební těleso	81
Obr. 41 Schéma tlakové zkoušky	82
Obr. 42 Tlaková zkouška na trhacím stroji.....	83
Obr. 43 Závislost tlaku na deformaci pro 1. typ spojení.....	84
Obr. 44 Závislost tlaku na deformaci pro 2. typ spojení.....	85
Obr. 45 Závislost tlaku na deformaci pro 3. typ spojení.....	86
Obr. 46 Závislost tlaku na deformaci pro 4. typ spojení.....	87
Obr. 47 Závislost tlaku na deformaci pro 5. typ spojení.....	88
Obr. 48 Závislost tlaku na deformaci pro 6. typ spojení.....	89
Obr. 49 Srovnání průměrných hodnot maximálních stlačení	90

Obr. 50 Kanálová vpust 1A	91
Obr. 51 Detail řezu kompozitního materiálu	92
Obr. 52 Zkušební těleso, tzv. osmička [10]	93
Obr. 53 Závislost napětí na poměrné deformaci	95
Obr. 54 3D model kanálové vpusti 1A	97
Obr. 55 3D modely litinového rámu a pryžokovového rámu 1B	97
Obr. 56 Porovnání experimentálních a vytvořených dat s tří-parametrickým modelem Ogden	99
Obr. 57 Prostorová síť čtvrtiny sestavy kanálové vpusti a litinového rámu	100
Obr. 58 Prostorová síť čtvrtiny sestavy kanálové vpusti a rámu 1B	101
Obr. 59 Nadeřinované podmínky symetrie čtvrtiny vpusti s litinovým rámem	102
Obr. 60 Uložení čtvrtiny vpusti s litinovým rámem	103
Obr. 61 Kolmé spojité zatížení	104
Obr. 62 Šikmé spojité zatížení	105
Obr. 63 Von Misesovo srovnávací napětí ve výztuze kanálové vpusti	106
Obr. 64 Řez výztuhy v oblasti napěťového maxima	106
Obr. 65 Von Misesovo srovnávací napětí v kompozitní vrstvě	107
Obr. 66 Deformace kanálové vpusti v měřítku 10:1	107
Obr. 67 Von Misesovo srovnávací napětí ve výztuze kanálové vpusti	108
Obr. 68 Detailní řez výztuhy v oblasti napěťového maxima	108
Obr. 69 Oblasti možného výskytu poruchy kompozitní vrstvy	109
Obr. 70 Deformace kanálové vpusti v měřítku 1:1	110
Obr. 71 Poměrná deformace v bodě největšího posuvu	110
Obr. 72 Von Misesovo srovnávací napětí ve výztuze kanálové vpusti	111
Obr. 73 Řez výztuhy v oblasti napěťového maxima	111
Obr. 74 Von Misesovo srovnávací napětí v kompozitní vrstvě	112

Obr. 75 Deformace kanálové vpusti v měřítku 10:1	112
Obr. 76 Von Misesovo srovnávací napětí ve výztuze kanálové vpusti	113
Obr. 77 Detailní řez výztuhy v oblasti napět'ového maxima	113
Obr. 78 Oblasti možného výskytu poruchy kompozitní vrstvy	113
Obr. 79 Deformace kanálové vpusti v měřítku 1:1	114
Obr. 80 Poměrná deformace v bodě největšího posuvu	115
Obr. 81 Deformace dosedacích ploch pryžokovového rámu 1B v měřítku 1:1	115

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Mezinárodní klasifikace kaučuků do základních skupin [11]	13
Tab. 2 Zkratky a relativní spotřeba běžně používaných kaučuků [11].....	14
Tab. 3 Rozdělení urychlovačů sírné vulkanizace [11].....	18
Tab. 4 Soudržnost pryže s kovem [3]	36
Tab. 5 Nesoudržnost pryže s kovem [3]	36
Tab. 6 Komerční pojiva pro spojování z vulkanizovaných materiálů [4]	41
Tab. 7 Vlastnosti některých komerčních polyuretanových pojiv [4].....	46
Tab. 8 Rozměry zkušebního tělesa, tzv. osmičky [10]	49
Tab. 9 Naměřené hodnoty pro 1. typ spojení.....	61
Tab. 10 Naměřené hodnoty pro 2. typ spojení.....	62
Tab. 11 Naměřené hodnoty pro 3. typ spojení.....	63
Tab. 12 Naměřené hodnoty pro 4. typ spojení.....	64
Tab. 13 Naměřené hodnoty pro 5. typ spojení.....	65
Tab. 14 Naměřené hodnoty pro 6. typ spojení.....	66
Tab. 15 Naměřené hodnoty pro 1. typ spojení.....	68
Tab. 16 Naměřené hodnoty pro 3. typ spojení.....	70
Tab. 17 Naměřené hodnoty pro 5. typ spojení.....	72
Tab. 18 Shapiro-Wilksův W test normality	76
Tab. 19 Naměřené hodnoty pro 1. typ spojení.....	84
Tab. 20 Naměřené hodnoty pro 2. typ spojení.....	85
Tab. 21 Naměřené hodnoty pro 3. typ spojení.....	86
Tab. 22 Naměřené hodnoty pro 4. typ spojení.....	87
Tab. 23 Naměřené hodnoty pro 5. typ spojení.....	88
Tab. 24 Naměřené hodnoty pro 6. typ spojení.....	89

Tab. 25 Rozměry zkušebního tělesa, tzv. osmičky [10]	93
Tab. 26 Naměřené hodnoty tahové zkoušky	96
Tab. 27 Parametry sítě	100
Tab. 28 Parametry sítě	101

SEZNAM PŘÍLOH

Způsob značení výkresů:

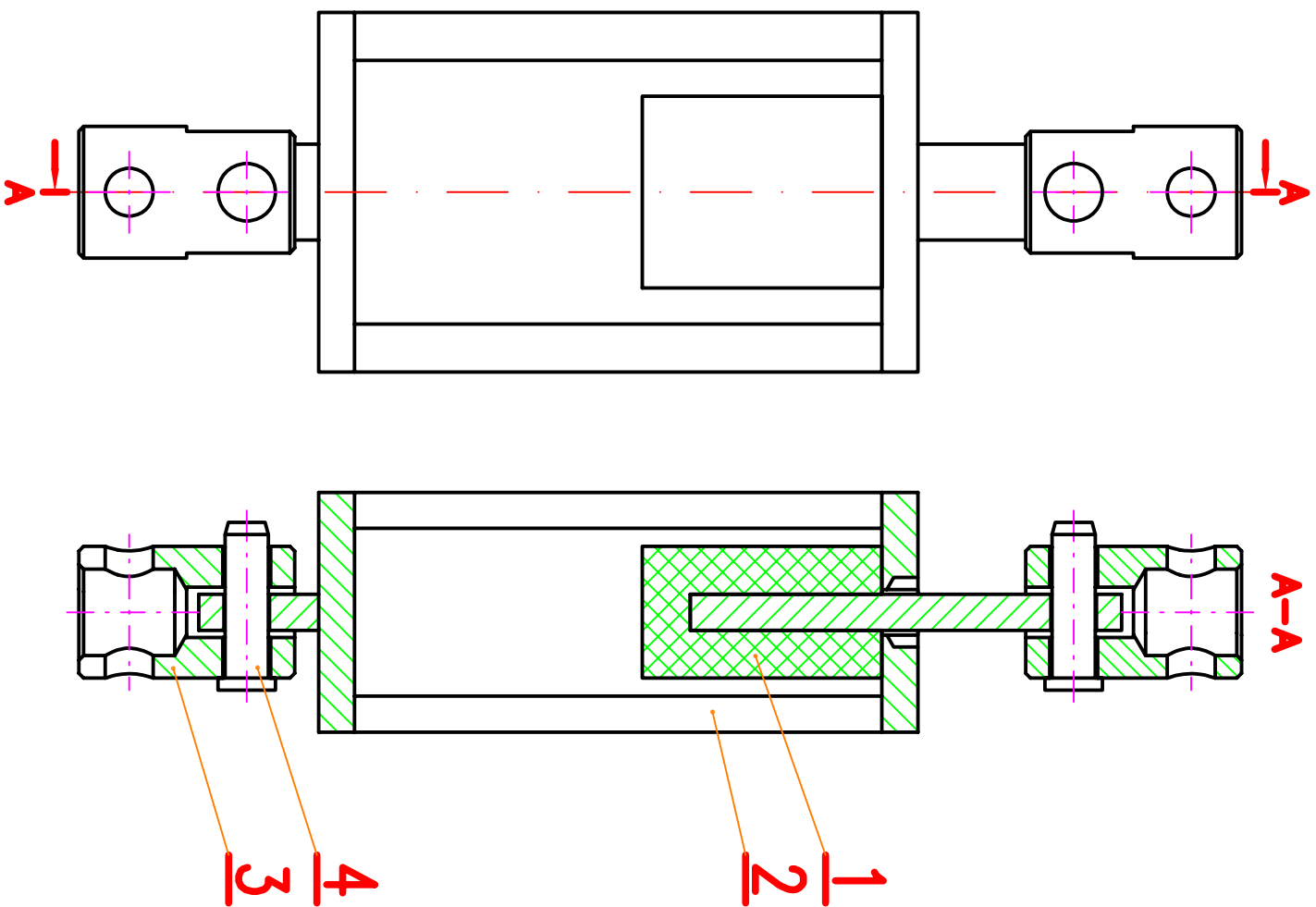
diplomová práce – ročník – studijní skupina – letopočet – číslo výkresu

Seznam výkresové dokumentace:

P I	DP – 05 – 09 – 09 – 001	Sestava
P II	DP – 05 – 09 – 09 – 002	Svarek – Upínací rám
P III	DP – 05 – 09 – 09 – 003	Upínací rám – Díl 1
P IV	DP – 05 – 09 – 09 – 004	Upínací rám – Díl 2
P V	DP – 05 – 09 – 09 – 005	Upínací rám – Díl 3
P VI	DP – 05 – 09 – 09 – 006	Upínací rám – Díl 4
P VII	DP – 05 – 09 – 09 – 007	Upínací přípravek
P VIII	DP – 05 – 09 – 09 – 008	Čep
P IX	DP – 05 – 09 – 09 – 009	Zkušební těleso 1
P X	DP – 05 – 09 – 09 – 010	Zkušební těleso 2

Seznam elektronických příloh:

P XI	3D modely navržené v programu Catia V5 R17
P XII	Analýzy zpracované v programu MSC. Patran 2006 a MSC. Marc 2005 r3



Poz.	Název - Rozměr	Materiál	Norma	Ks.
4	ČEP	E2956C	DP - 05 - 09 - 09 - 008	2
3	UPINACÍ PŘÍPRAVEK	E3356C	DP - 05 - 09 - 09 - 007	2
2	UPINACÍ RAM	S355J0	DP - 05 - 09 - 09 - 002	1
1	ZKUŠEBNÍ TĚLESO 1	S355J0	DP - 05 - 09 - 09 - 009	1

INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS

ZNÁMAT.	ROZM.-POL.OT.	POM. ZAR.	VYPR. KUŠEBNÍ RADEK	PREŽEK.	TECHNOL.	NAZEV

HMOTNOST kg	MĚŘ. 1:2

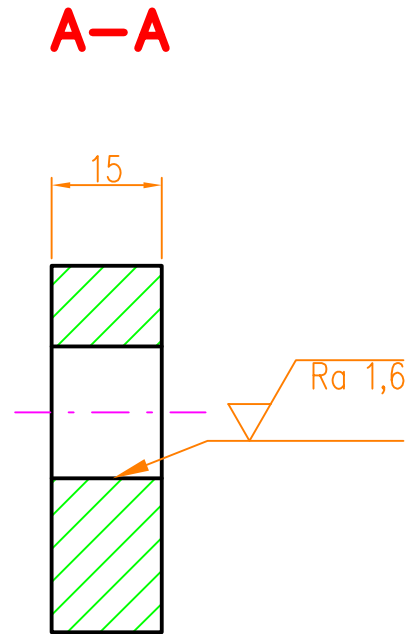
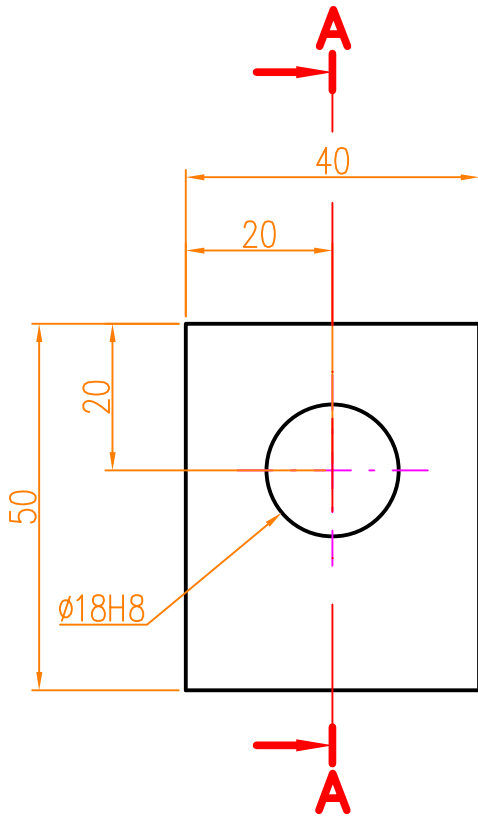
TR.Č.	Č. KUSOVNIKU

STARÝ V.	Č.Y.

UTB ZLIN

SESTAVA

DP - 05 - 09 - 09 - 001



INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	UTB ZLÍN	
ZN.MAT. S355J0			T.O.	HMOTNOST kg	MĚŘ. 1:1
ROZM.-POLOT. 40x15x2000				ČSN	TR.Č.
POM. ZAŘ.				POZN.	Č. KUSOVNIKU
VYPR. KUČERA RADEK		NORM.REF.			
PŘEZK.					
TECHNOL.		SCHVÁLIL	5.5.2008	STARÝ V.	Č.V.
NÁZEV		UPÍNACÍ RÁM – DÍL 1			DP - 05 - 09 - 09 - 003
				Listů	List

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

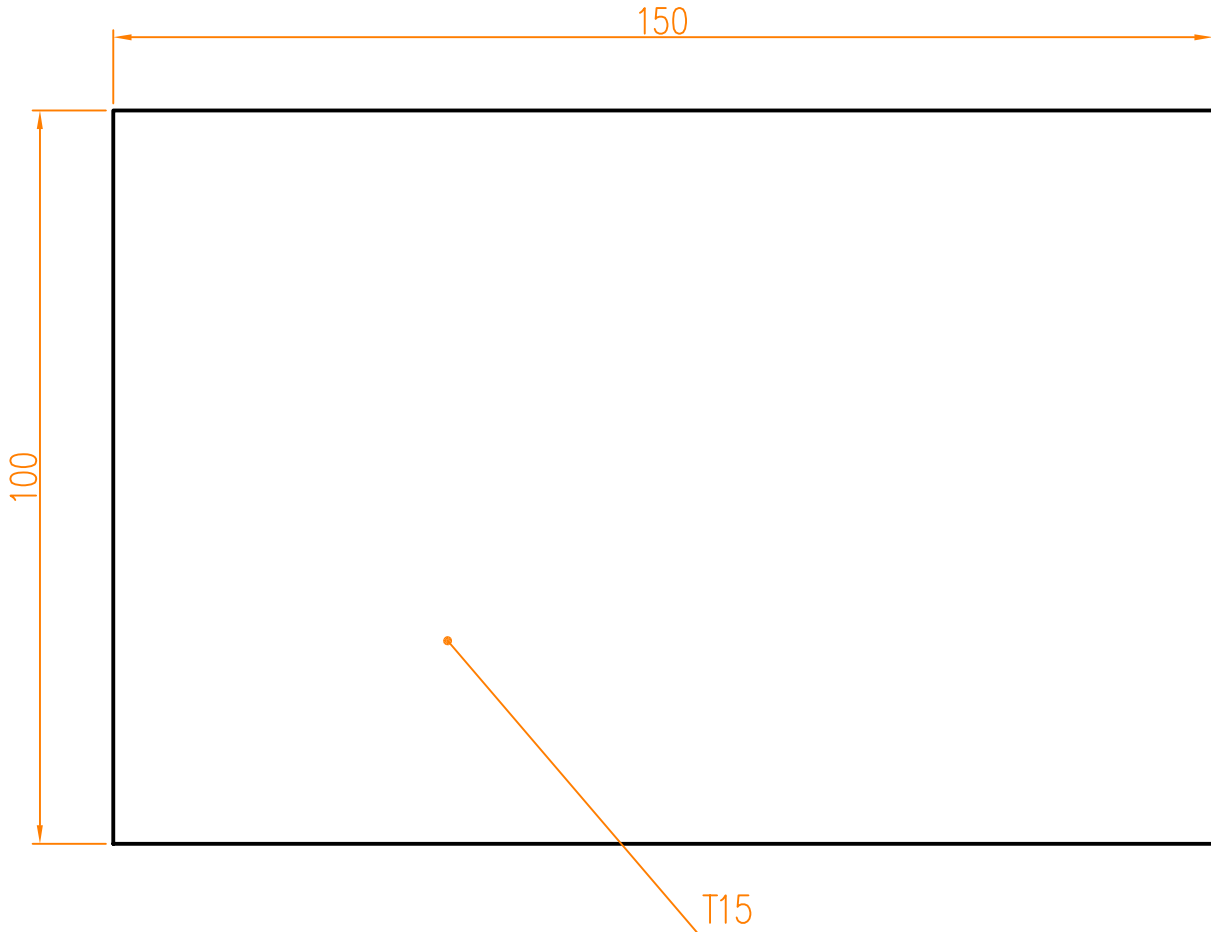
D

E

E

F

F



INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	UTB ZLÍN	
ZN.MAT. S355JO			T.O.	HMOTNOST kg	MĚŘ. 1:1
ROZM.-POLOT. 100x15x2000				ČSN	TR.Č.
POM. ZAŘ.				POZN.	Č. KUSOVNIKU
VYPR. KUČERA RADEK	NORM.REF.			STARÝ V.	Č.V.
PŘEZK.					
TECHNOL.	SCHVÁLIL	5.5.2009			
NÁZEV	UPÍNACÍ RÁM - DÍL 2			DP - 05 - 09 - 09 - 004	
				Listů	List

1

2

3

4

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

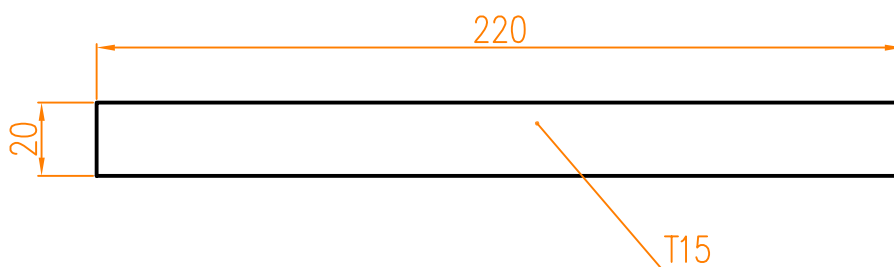
D

E

E

F

F



INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	UTB ZLÍN	
ZN.MAT. S355J0			T.O.	HMOTNOST kg	MĚŘ. 1:2
ROZM.-POLOT. 20x15x2000				ČSN	TR.Č.
POM. ZAŘ.				POZN.	Č. KUSOVNIKU
VYPR. KUČERA RADEK	NORM.REF.			STARÝ V.	Č.V.
PŘEZK.			5.5.2009		
TECHNOL.	SCHVÁLIL				
NÁZEV	UPÍNACÍ RÁM – DÍL 3			DP - 05 - 09 - 09 - 005	
				Listů	List

1

2

3

4

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

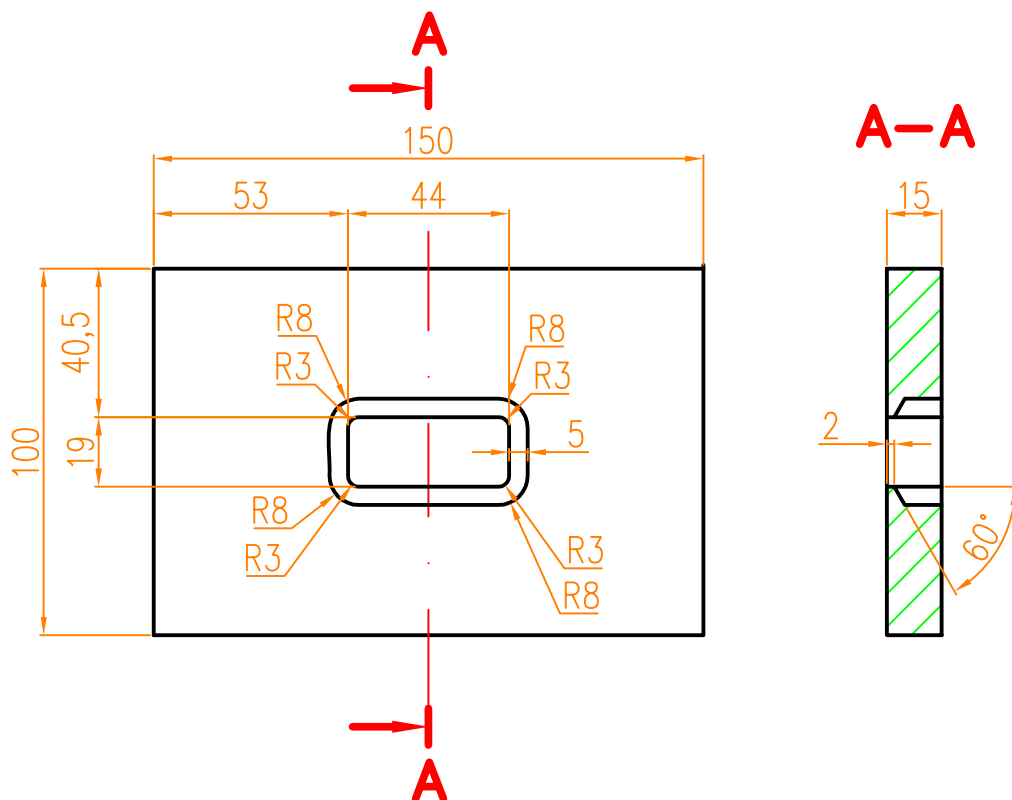
D

E

E

F

F



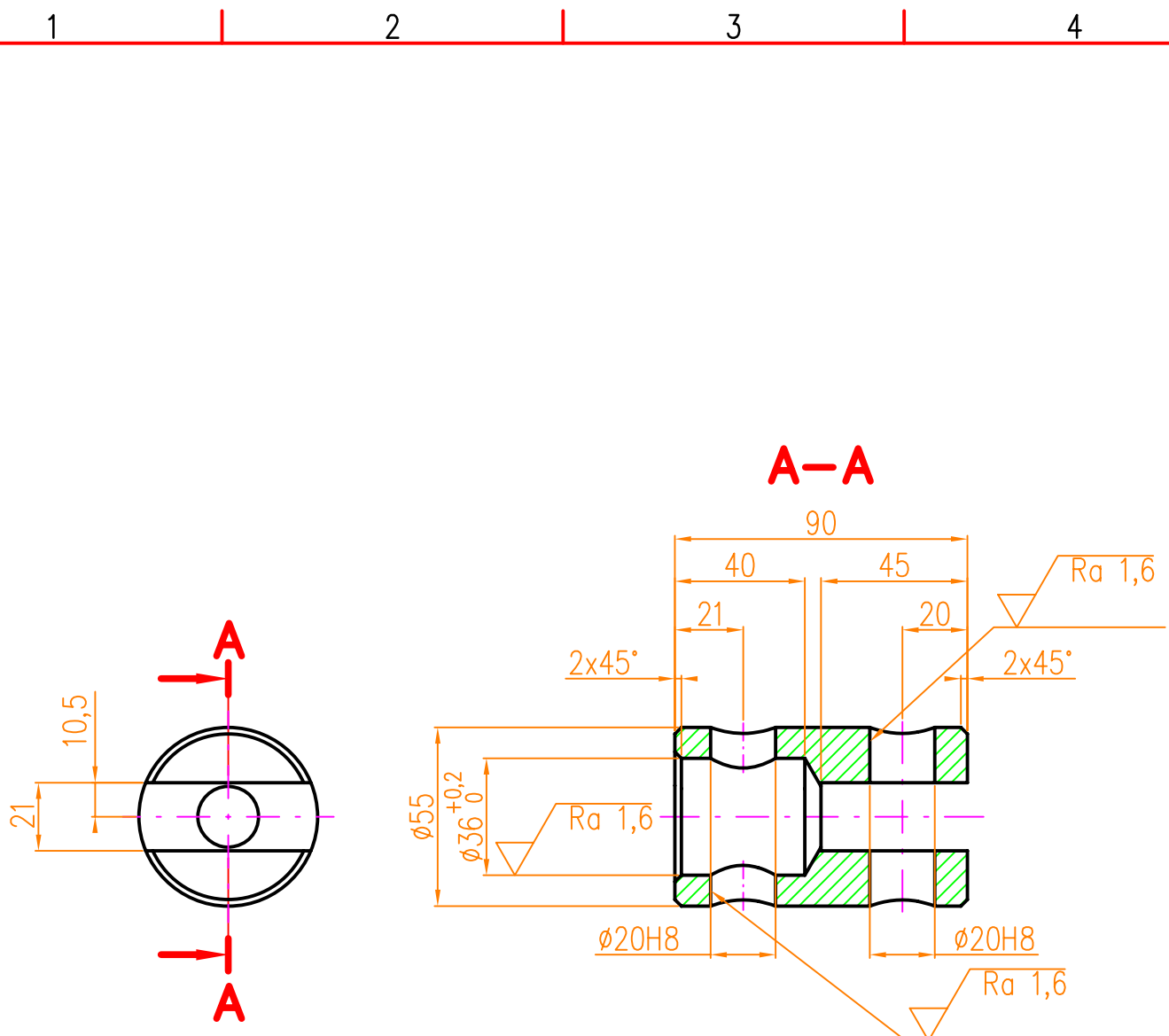
INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	UTB ZLÍN	
				ZN.MAT. S355JO	T.O.
				ROZM.-POLOT. 100x15x2000	HMOTNOST kg
				POM. ZAŘ.	MĚŘ. 1:2
				VYPR. KUČERA RADEK	ČSN
				NORM.REF.	TR.Č.
				PŘEZK.	Č. KUSOVNIKU
				TECHNOL.	SCHVÁLIL
				5.5.2009	STARÝ V.
				NÁZEV	Č.V.
UPÍNACÍ RÁM – DÍL 4				DP - 05 - 09 - 09 - 006	
				Listů	List

1

2

3

4



INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	UTB ZLÍN	
				HMOTNOST kg	MĚŘ. 1:2
ZN.MAT. E335GC			T.O.	ČSN	TR.Č.
ROZM.-POLOT. ø60x95				POZN.	Č. KUSOVNIKU
POM. ZAŘ.					
VYPR. KUČERA RADEK		NORM.REF.			
PŘEZK.					
TECHNOL.		SCHVÁLIL	5.5.2009	STARÝ V.	Č.V.
NÁZEV				DP - 05 - 09 - 09 - 007	
UPÍNACÍ PŘÍPRAVEK				Listů	List

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

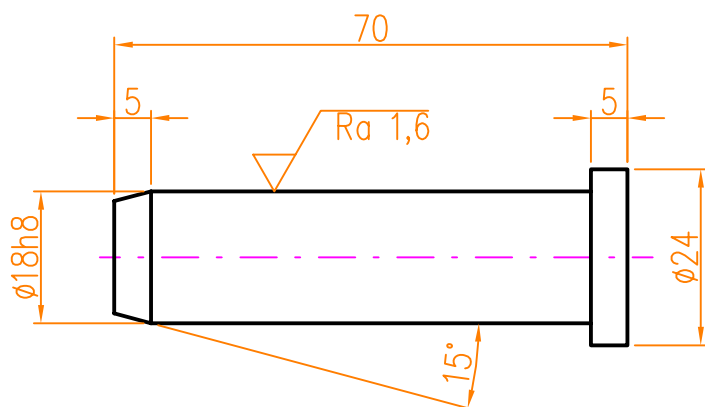
D

E

E

F

F



INDEX	ZMENA	DATUM	PODPIS	UTB ZLÍN	
ZN.MAT. E295GC			T.O.	HMOTNOST kg	MÉR. 1:1
ROZM.-POLOT. $\phi 25 \times 75$				ČSN	TR.Č.
POM. ZAŘ.				POZN.	Č. KUSOVNIKU
VYPR. KUČERA RADEK	NORM.REF.			STARÝ V.	Č.V.
PŘEZK.					
TECHNOL.	SCHVÁLIL	5.5.2009			
NÁZEV				DP - 05 - 09 - 09 - 008	
ČEP				Listů	List

1

2

3

4

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

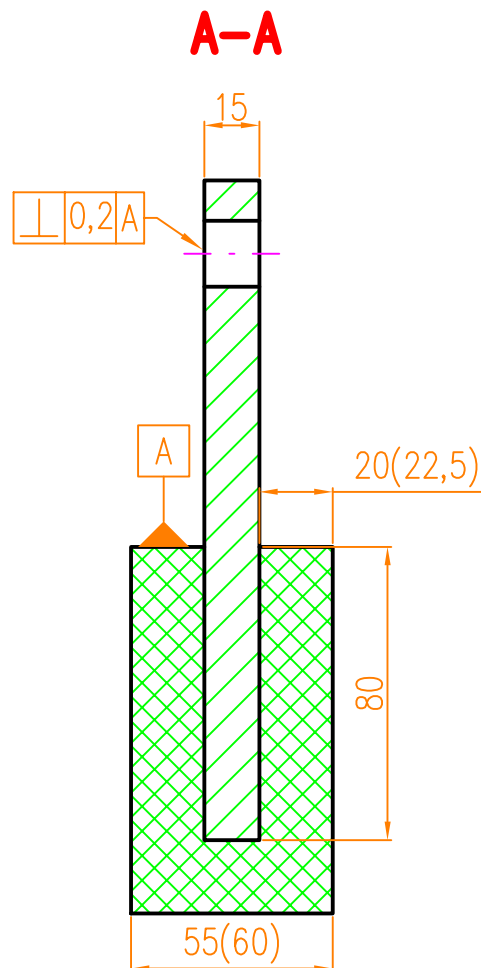
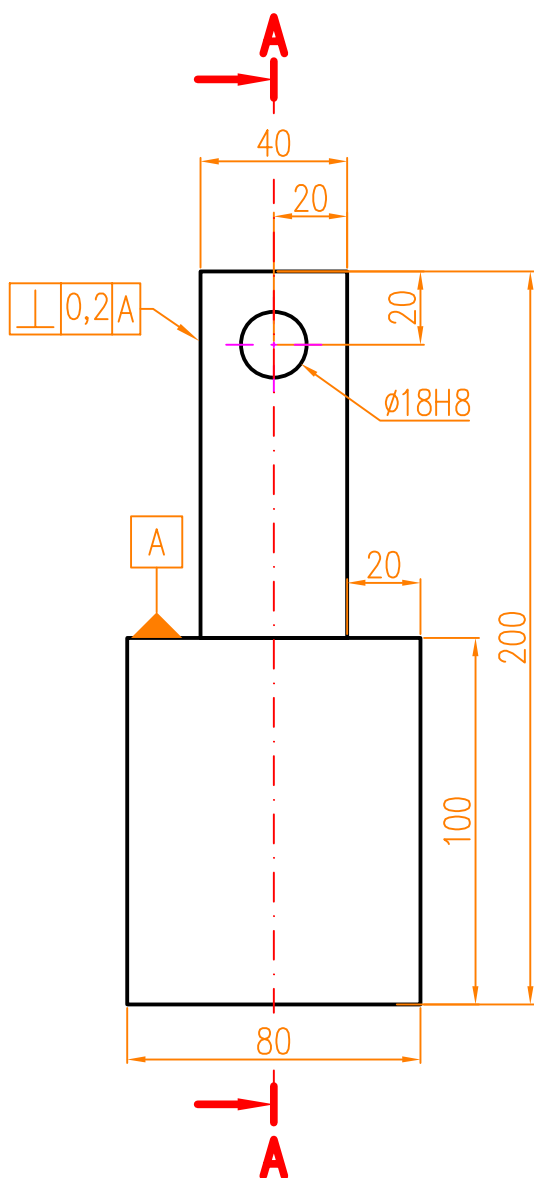
D

E

E

F

F



INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	UTB ZLÍN	
				ZN.MAT. S355JO	T.O. HMOTNOST kg
				ROZM.-POLOT.	MĚŘ. 1:2
				POM. ZAŘ.	ČSN TR.Č.
				VYPR. KUČERA RADEK	NORM.REF. POZN. Č. KUSOVNIKU
				PŘEZK.	
				TECHNOL. SCHVÁLIL	5.5.2009 STARÝ V. Č.V.
				NÁZEV	
				ZKUŠEBNÍ TĚLESO 1	DP - 05 - 09 - 09 - 009
				Listů	List

1

2

3

4

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

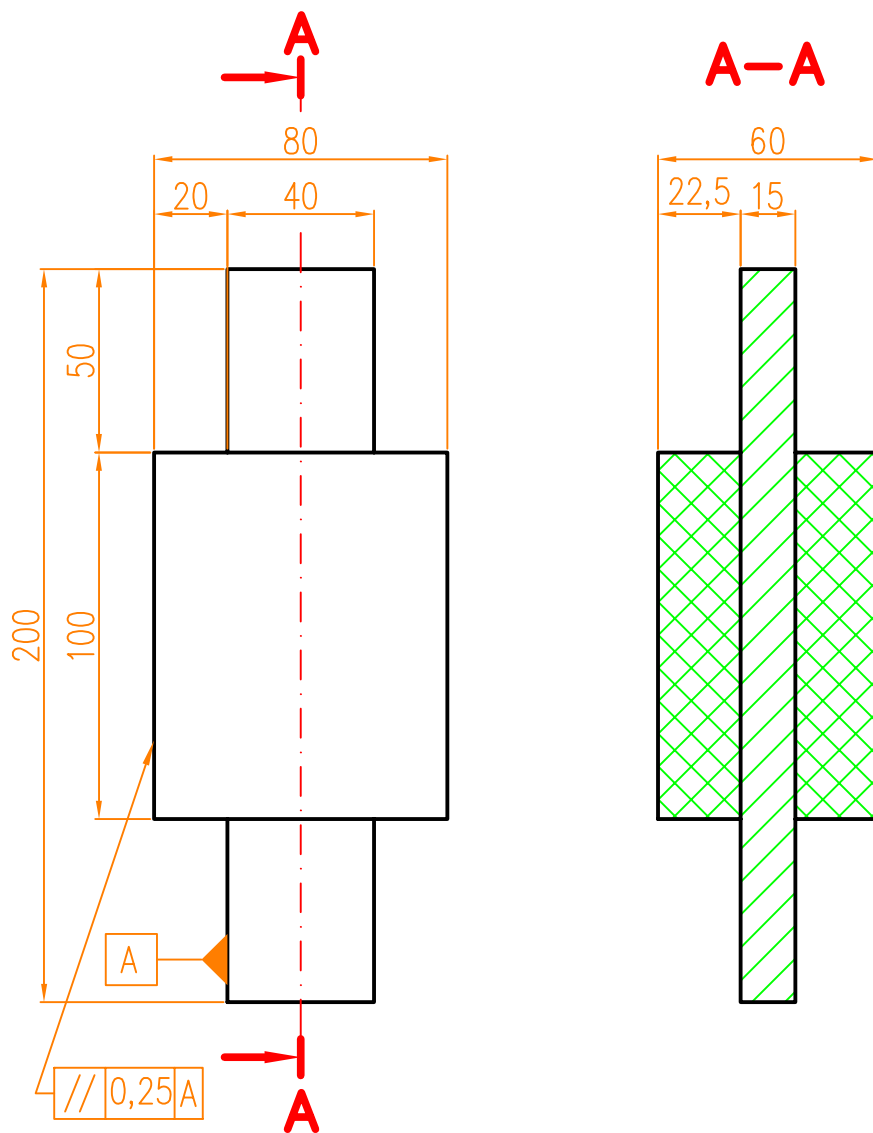
D

E

E

F

F



INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	UTB ZLÍN	
				T.O.	HMOTNOST kg
					MĚŘ. 1:2
					ČSN
					TR.Č.
					Č. KUSOVNIKU
					Č.V.
				5.5.2009	STARÝ V.
NÁZEV				DP - 05 - 09 - 09 - 010	
ZKUŠEBNÍ TĚLESO 2				Listů	List

1

2

3

4