



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

DYNAMICKÉ VLASTNOSTI LEPENO – NITOVANÝCH SPOJOV
DYNAMIC PROPERTIES OF COMBINED RIVET AND ADHESIVE BONDED JOINTS

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. TOMÁŠ URÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF KLEMENT, CSc.

BRNO 2010

Prehlásenie autora o pôvodnosti práce

Prehlasujem, že som dizertačnú prácu na téma Dynamické vlastnosti lepeno – nitovaných spojov vypracoval samostatne s použitím uvedenej literatúry.

V Brne dňa 5.4. 2010

.....

Podakovanie

Touto cestou by som chcel poďakovať môjmu školiteľovi doc. Klementovi za cenné rady a trpezlivosť pri vedení. Moja vďaka patrí aj vedeniu Leteckého ústavu prof. Píšťkovi a doc. Juračkovi v prvom rade za to, že mi dali šancu byť jeho súčasťou a i za to, že najväčšou mierou prispeli k materiálnemu a finančnému zabezpečeniu celého výskumu, ktorý je v tejto práci vykonaný. Ďalej musím poďakovať kolegom Adamíkovi, Šplíchalovi a Mališovi za rady, pripomienky a spoluprácu v oblasti MKP analýz. A nemôžem zabudnúť ani na kolegov Augustína, Zablitzkeho a firmu EVEKTOR, s ktorými som sa mohol spolu podieľať na únavových skúškach typických spojov použitých na letúne VUT 100.

V poslednej rade chcem poďakovať mojej rodine, ktorá mi vždy bola a je oporou.

Obsah

DEFINÍCIE, VELIČINY A SKRATKY	6
ABSTRAKT.....	7
1 ÚVOD	8
1.1 TECHNIKY SPÁJANIA V LETECKEJ VÝROBE	9
1.1.1 Zváranie.....	9
1.1.2 Lepenie	9
1.1.3 Nitovanie.....	10
1.2 KOMBINÁCIA LEPENIA A NITOVANIA	11
1.3 DYNAMICKÉ VLASTNOSTI SPOJOV V PRAXI	14
2 CIELE PRÁCE A METODIKA RIEŠENIA	16
3 HISTÓRIA A SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	17
3.1 MERANIE NAPÄTIA A DEFORMÁCIÍ NA NITOVÝCH SPOJOCH.....	17
3.2 NAPÄŤOVO DEFORMAČNÉ ANALÝZY LEPENÝCH SPOJOV.....	23
3.3 NAPÄŤOVO DEFORMAČNÉ ANALÝZY LEPENO – NITOVANÝCH SPOJOV	25
3.4 VYHODNOCOVANIE ŽIVOTNOSTI LEPENÝCH SPOJOV	29
3.5 SKÚŠKY ÚNAVOVÝCH VLASTNOSTÍ LNS.....	31
3.6 VPLYVY PROSTREDIA NA LNS.....	36
3.7 PREHĽAD A ZHRNUTIE ZISTENÝCH SKUTOČNOSTÍ	37
4 NAPAŤOVO – DEFORMAČNÁ ANALÝZA NS A LNS.....	39
4.1 CHARAKTERISTIKY JEDNOTLIVÝCH ČASTÍ TESTOVANÝCH SPOJOV	39
4.1.1 Geometria a materiál vzoriek.....	39
4.1.2 Nity.....	40
4.1.3 Lepidlo.....	40
4.2 MKP ANALÝZA	41
4.3 OPTICKÉ MERANIE ROZLOŽENIA DEFORMÁCIE	48
4.4 SÚHRN A HLAVNÉ ZÁVERY Z ANALÝZY	52
5 ÚNAVOVÉ SKÚŠKY.....	53
5.1 METODIKA SKÚŠKY	54
5.1.1 Spôsob vyhodnocovania	55
5.2 NAMERANÉ HODNOTY A VYHODNOTENIE.....	56
5.3 SÚHRN A HLAVNÉ ZÁVERY ÚNAVOVÝCH SKÚŠOK	61
6 ZÁVER	63
6.1 VPLYV LEPIDLA NA KONCENTRÁTORY NAPÄTIA A ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI LNS	63
6.2 DYNAMICKÉ VLASTNOSTI LNS – NEZODPOVEDANÉ OTÁZKY	64
LITERATÚRA.....	65
PUBLIKÁCIE AUTORA	68



Prílohy

PRÍLOHA 1 – ROZMERY ÚNAVOVÝCH VZORIEK	70
PRÍLOHA 2 – ÚNAVOVÁ SKÚŠKA – NAMERANÉ HODNOTY	75
PRÍLOHA 3 – STATICKÁ ÚNOSNOSŤ A MERANIE HRÚBKY LEPIDLA ÚNAVOVÝCH VZORIEK	80
ŽIVOTOPIS AUTORA	83

Definície, veličiny a skratky

<i>NS</i>	<i>nitovaný spoj</i>
<i>LS</i>	<i>lepený spoj</i>
<i>LNS</i>	<i>lepeno – nitovaný spoj</i>
<i>FSW</i>	<i>friction stir welding</i>
<i>S/N krivka</i>	<i>Wöhlerova únavová krivka</i>
σ	<i>ťahové napätie (MPa)</i>
σ_c	<i>medza únavy (MPa)</i>
σ_a, S_a	<i>amplitúda napätia (MPa)</i>
σ_m	<i>stredné napätie (MPa)</i>
σ_h	<i>horné napätie (MPa)</i>
$\sigma_{h,nom}$	<i>nominálne horné napätie (MPa)</i>
σ_d	<i>dolné napätia (MPa)</i>
τ	<i>šmykové napätie (MPa)</i>
<i>F</i>	<i>sila (N)</i>
<i>F_d</i>	<i>minimálna zaťažovacia sila (N)</i>
<i>F_h</i>	<i>maximálna zaťažovacia sila (N)</i>
<i>N_f</i>	<i>počet cyklov do poruchy</i>
<i>R</i>	<i>koeficient asymetrie cyklu</i>
<i>f</i>	<i>frekvencia (Hz)</i>
<i>k_L</i>	<i>súčiniteľ vplyvu lepidla na únavovú životnosť NS</i>
<i>b</i>	<i>šírka únavovej vzorky</i>
<i>t</i>	<i>hrúbka únavovej vzorky</i>
<i>S₀</i>	<i>nominálny prierez vzorky</i>
<i>l₀</i>	<i>pôvodná nedeformovaná dĺžka (mm)</i>
<i>l</i>	<i>dĺžka po deformácii (mm)</i>
Δl	<i>predĺženie (mm)</i>
ε	<i>pomerná deformácia (-), $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$</i>
γ	<i>šmyková deformácia (-)</i>
λ	<i>ťahová extenzia (-), $\lambda = \frac{l}{l_0}$</i>
<i>a</i>	<i>veľkosť trhliny (mm)</i>
<i>C_{ij}</i>	<i>koeficienty Moonye – Rivlinovho modelu (MPa)</i>
<i>MKP (FEM)</i>	<i>metóda konečných prvkov (finite element analyses)</i>
<i>GA</i>	<i>General Aviation</i>
<i>ULL</i>	<i>ultra ľahké lietadlá</i>

Abstrakt

Ako bolo dokázané niekoľkými autormi ^[napr. 1, 2] použitie kombinovanej technológie nitovania a lepenia zlepšuje statické mechanické vlastnosti nitovaných i lepených spojov. Na druhú stranu dynamické vlastnosti spojov ako napr. únava a korózia významne ovplyvňujú správanie sa konštrukcií počas ich prevádzkového života. V predloženej práci je riešená kombinácia spájania trňovými nitmi pri súčasnej aplikácii vysoko ťažného lepidla. Komplexný popis dynamických vlastností tejto kombinácie technológií spájania nebol až do súčasnosti publikovaný.

Jedným z hlavných cieľov práce je popis vplyvu vrstvy vysoko ťažného lepidla na koncentrácie napätí v oblasti otvorov pre nity. V ďalšej časti sa rieši vplyv tohto lepidla na únavové vlastnosti kombinovaných spojov vytvorených pomocou trňových nitov a plných nitov so zápusťou hlavou.

Napätovo deformačná analýza NS a LNS prevedená pomocou MKP analýzy a experimentálneho merania deformácií naznačuje, že vrstva lepidla – tmelu s vysokou ťažnosťou má priaznivý vplyv na znižovanie napätových špičiek v okolí otvorov pre nity. Toto je v súlade s pozorovaním únavovej životnosti lepeno – nitovaných spojov (AAPL), u ktorých bolo pozorované približne dvadsať percentné zvýšenie napätovej hladiny zaťaženia pri únavovej poruche spoja v porovnaní s čisto nitovanými spojmi.

Kľúčové slová

trňové nity, únava, S/N krivky, koncentrácie napätia, MKP analýza

Abstract

The improvement of static properties of combined rivet and adhesive bonded joints have been proven by several authors ^[1, 2]. On the other side, dynamic properties of joints (for example fatigue and corrosion) significantly affect final function of structures during their service life. In this thesis, the combine joints created by blind rivets and hyper elastic sealant are solved. Complex description of dynamic properties of this particular combined joining technology has not been publicised, yet.

Description of sealant layer influence on stress concentration in rivet hole regions is one of the main goal of this work. The next stage of the thesis is focused on the influence of above mentioned sealant layer on fatigue properties of combined blind rivet and solid countersunk rivet joints.

Stress strain analysis of rivet and combined joints done by FE analysis and by experimental optical measurement of strain field proved that hyper elastic sealant layer has a positive effect on decreasing of stress peaks in rivet hole regions. This findings are in direct compliance with fatigue measurement of combined joint (AAPL). The influence of applied sealant in this combined joints improved fatigue properties by twenty percentage increasing of stress to failure in comparison with rivet joints.

Keywords

blind rivet, fatigue, S/N curves, stress concentration, finite element analysis

Bibliografická citácia

Urík, T.: Dynamické vlastnosti lepeno – nitovaných spojov, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010

1 ÚVOD

Spájanie konštrukčných častí a celkov je stále nevyhnutným zlom pri výrobe lietadiel. Používanie integrálnych dielov vedie k určitému zníženiu spojovaných častí i tak sú ale technológie spájania jedným z hlavných faktorov, ktoré ovplyvňujú kvalitu výslednej konštrukcie. K nedostatkom spojov patrí samotná nutnosť spájania. Z nej pramení napríklad vyššia cena danej konštrukcie. Každý spoj je navyše pôvodcom určitého druhu alebo druhov nelinearity – geometrickej, materiálovej, napät'ovej. Snahou pri optimalizácii spájania by malo byť, čo možno v najväčšej miere eliminovať vplyvy týchto nelinearit.

Kvôli vyššie zmieneným nelinearitám bývajú práve spoje veľmi často kritickým miestom konštrukcií počas ich prevádzkového života. Pojem dynamické vlastnosti spojov v širšom slova zmysle popisuje chovanie týchto spojov v čase, v určitom prostredí a pod vplyvom určitého zaťaženia (napr. vplyvy starnutia, korózie, únavy). Poznanie týchto vlastností hrá dôležitú úlohu pri navrhovaní, výrobe ale i pri samotnej prevádzke lietadla.

Najpoužívanejšou technikou spájania v leteckej výrobe stále ostáva nitovanie, nasledované lepením a zváraním. Lepenie je pravdepodobne najperspektívnejšou technikou spájania s najväčším potenciálom. Zváranie sa dostáva do popredia vďaka vylepšeniu technológií ako sú zváranie laserom alebo zváranie trením (friction stir welding, FSW). Každá z týchto troch základných technológií má veľa výhod ale i nevýhod. Nitovanie si svoju pozíciu drží vďaka svojej jednoduchosti a vďaka dlhoročným skúsenostiam s touto technológiou. Avšak práve nitované spoje vytvárajú v porovnaní s lepenými a zváranými najväčšie nelinearity v konštrukciách, čoho výsledkom sú ich horšie mechanické vlastnosti ako pevnosť, tuhosť a únavová životnosť. Tieto nedostatky nitovaných spojov z časti eliminuje použite kombinovanej technológie nitovania s lepením, využívajú sa tak najlepšie vlastnosti z oboch technológií.

Priaznivý vplyv kombinácie technológií nitovania a lepenia na statické mechanické charakteristiky bol preukázaný niekoľkými autormi (napr. Klement ^[1], Duda ^[2]). O dynamických charakteristikách toto jednoznačne povedať nemôžeme. Výskumy prevedené v minulosti, (napr. ESDU ^[3, 4], Imanaka ^[5]), na lepeno – nitovaných spojoch (LNS) síce čiastočne potvrdili, že kombinácia nitovania a lepenia zvyšuje únavovú životnosť spoja, ako z hľadiska nitovaného tak aj z hľadiska lepeného spoja, avšak tieto práce boli skôr výnimkami v tejto oblasti a boli zamerané na odlišné typy spájaných materiálov a lepidiel než sa v súčasnosti používajú pri výrobe modernej leteckej techniky.

Dôvodom a určitým mementom, prečo sa zaoberať dynamickými vlastnosťami LNS je napríklad havária Boeingu 737-200 Aloha z roku 1988, ktorá ukázala, že okrem únavy je u tohto typu spoja kritické súčasné pôsobenie vplyvov prostredia (korózia, starnutie) a cyklického zaťaženia. Lepidlo je v LNS príčinou určitej neurčitosti a nepredvídateľnosti, čo spôsobuje, že spoľahlivá predikcia prevádzkovej životnosti je možná až na základe komplexných testov dynamických vlastností.

Táto dizertačná práca nadväzuje na rozsiahli výskum LNS, ktorý prebieha na Leteckom ústave. Mala by ho doplniť a vytvoriť ucelený prehľad o možnostiach využitia LNS v letectve. Značná časť práce je preto venovaná zhrnutiu a vyhodnoteniu doterajších poznatkov o LNS. Výskumné ciele sú stanovené tak, aby tieto poznatky rozšírili a umožnili plynule nadviazať na publikované závery. Hlavná časť práce sa zaoberá popisom vplyvu lepidla na únavové vlastnosti LNS pomocou experimentálne určených S/N kriviek nitovaných a lepeno – nitovaných spojov. Ďalej je v práci prevedená napät'ovo deformačná analýza NS a LNS za účelom stanovenia a porovnania rozloženia napätia

v okolí nitov pri zaťažovaní týchto spojov. Tak isto sa posudzuje aj vplyv lepidla na napät'ové špičky v okolí otvorov pre nity a s tým súvisiaci vzťah medzi distribúciou zaťaženia v LNS a ich únavovými vlastnosťami.

1.1 Techniky spájania v leteckej výrobe

1.1.1 Zváranie

Používané materiály a pevnostné nároky na draky lietadiel sú limitujúcim faktorom využitia zvárania pri ich konštrukcii. Vysoko – pevné hliníkové zliatiny sú viac menej ťažko zvariteľné. Zvary vytvorené bežnými technológiami sú charakteristické zlými mechanickými vlastnosťami. Novo presadzujúcou sa metódou je zváranie trením (FSW) ^[6]. Zvar sa vytvára pôsobením tepla, ktoré vzniká v dôsledku trenia medzi rotujúcim hrotom zváracieho zariadenia a zváranými materiálmi. Rotujúca tyč sa pohybuje pozdĺž na tupo k sebe priložených zváraných častí. Táto technológia umožňuje zvärať i odlišné hliníkové zliatiny dokopy a bola aplikovaná a testovaná napr. pri výrobe malého prúdového letúnu Eclipse 500.

Na niektorých lietadlách bola úspešne použitá kombinácia bodového zvárania a lepenia. V súčasnosti sa skúma využitie kombinácie zvárania laserom a lepenia ^[7]. V oboch prípadoch prispieva lepenie k zvýšeniu pevnosti, tuhosti a životnosti spoja. Zvary naopak zvyšujú odolnosť lepidla voči odlupovaniu. Spoločným problémom starších aj nových techník zvárania je cenová náročnosť strojového vybavenia.

1.1.2 Lepenie

Lepenie je najstaršou a zároveň najprogressívnejšie sa rozvíjajúcou technológiu spájania v leteckom priemysle. Už prvé lietajúce stroje využívali lepenie vo veľkej miere. Prechodom z drevených konštrukcií na kovové došlo k dočasnému útlmu používania lepenia, avšak vynájdenním polymérneho lepidla Aerolite (1937) na báze formaldehydovej živice a postupným nástupom kompozitných materiálov na báze vláknami vystužených polymérov sa lepenie opäť dostalo do popredia. U celo kompozitných konštrukcií je lepenie prevažujúcou technológiou spájania. Výhody lepenia sú nesporné i pri spájaní kovových konštrukcií. V porovnaní s nitovaním neoslabujú prierez spoja ani nevytvárajú koncentrátoary napätia, z čoho pramení ich výrazne vyššia tuhosť, pevnosť a únavová životnosť. Z aerodynamického hľadiska sú čistejšie, počet dielov potrebných k vytvoreniu spoja je s nitovaním neporovnateľný. Oproti zváraníu nevznikajú pri lepení tepelne ovplyvnené zóny. Veľkou výhodou lepenie je i to, že sa môžu spájať rôzne materiály (nedochádza ku galvanickej korózii). Vrstva lepidla pôsobí taktiež proti šíreniu trhlin.

Hlavnými nevýhodami lepených spojov sú malá pevnosť pri odlupovaní, dosť významná citlivosť na vplyvy prostredia a času (vlhkosť, UV žiarenie, teplota) a v neposlednej rade je to nutnosť dokonalej kontroly procesu výroby spoja, pretože je preukázaná značná závislosť medzi povrchovou úpravou adherendov pred lepením a životnosťou lepeného spoja ^[8]. Zvážiť by sa tiež mali spôsoby opravy lepených konštrukcií.

Najčastejšie používané lepidlá v praxi sú na báze syntetických polymérov a ako také ich môžeme rozdeliť na reaktoplasty a termoplasty. Do skupiny reaktoplastov patria napríklad lepidlá na báze epoxidov, polyesterov, polyimidov. Táto skupina lepidiel sa vyznačuje vysokými mechanickými vlastnosťami a preto sú často lepidlá z tejto skupiny označované ako „konštrukčné“. Zo skupiny termoplastov sa bežne používajú napríklad polyuretany (tmely, hermetiká) a kyanoakriláty.

1.1.3 Nitovanie

Nitovanie je štandardne používaná a takmer dokonale zvládnutá technológia. V súčasnosti je to ešte stále dominantná technológia spájania pri výrobe kovových drakov lietadiel. Je možné, že s výraznejším nástupom kompozitných materiálov i u vyšších kategórií lietadiel, dôjde k zníženiu jeho používania na úkor lepenia. Technológia a aj jej nedostatky sú natoľko známe, že ich vieme dostatočne presne predpovedať a tým pádom i úspešne eliminovať. Veľkým problémom nitovania je rýchlosť a efektívnosť výroby. K zlepšeniu produktivity práce pri nitovaní v poslednej dobe prišlo zavedenie používania trňových nitov (*Obr. 1.1*) v širšom meradle.

1 – hlava nitu

2 – telo nitu

3 – trň

4 – hlava trňa

5 – driek trňa

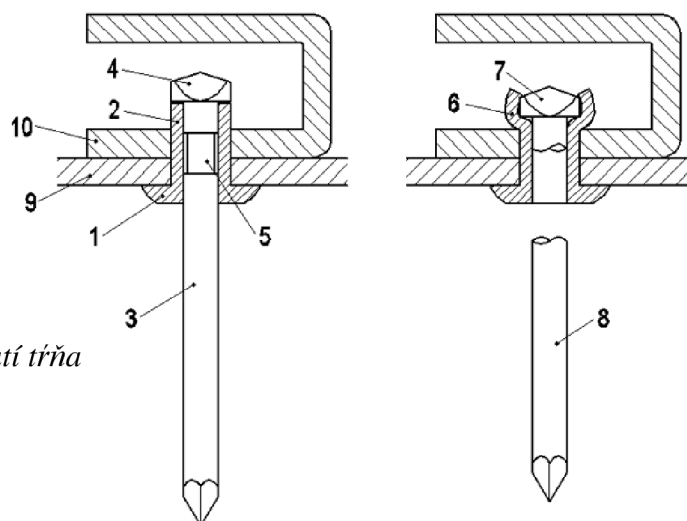
6 – uzatváracia hlava nitu

7 – uzatváracia hlava nitu po roztrhnutí trňa

8 – zvyšok trňa

9 – spojovaný materiál – poťah

10 – spojovaný materiál – výstuha



Obr. 1.1 Trňový nit

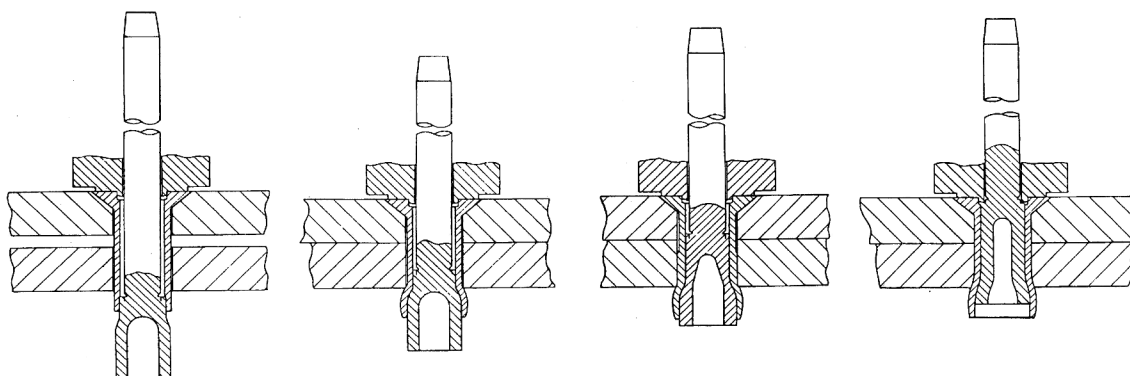
Tieto nity umožňujú nitovanie z jednej strany, jedným pracovníkom, čo výrazne zrýchľuje a zlacňuje proces výroby nitovanej konštrukcie. Jedným z prvých lietadiel, ktoré využívali trňové nity vo veľkej miere bola KP2U Sova, projektovaná na Leteckom ústave pod vedením prof. Pišťeka.



Obr. 1.2 KP2U Sova

Trňové nity boli v minulosti používané najmä ako náhrada za porušené plné nity pri opravách rôznych častí leteckej techniky. S výhodou sa využívali a využívajú hlavne v miestach, kde je obmedzený prístup z oboch strán, čím je významne limitované použitie klasických plných nitov. S

rozvojom ľahkých športových lietadiel sa začali využívať vo veľkom aj pri výrobe primárnych konštrukčných celkov. K ich hlavným výhodám v porovnaní s klasickými plnými nitmi patrí rentabilita procesu spájania, spočívajúca hlavne v rýchlosti ich inštalácie, menšej náchylnosti na vznik rôznych chýb pri nitovaní a v z toho vyplývajúcej menšej náročnosti na kvalifikovanú pracovnú silu. Nevýhodou prevažne používaného typu trňových nitov (Obr. 1.1) sú ich nižšie mechanické vlastnosti. Vyššími mechanickými vlastnosťami disponujú trňové nity, pri ktorých sa na prenose zaťaženia podieľa aj samotný trň, ktorý zostáva po znitovaní zalisovaný v tele nitu (Obr. 1.3). Dizajn nitu a proces nitovania zabezpečujú, že sa trň podieľa na prenose zaťaženia počas celej životnosti spoja. Nevýhodou týchto nitov je ich relatívne vyššia cena a obmedzenie použitia z hľadiska minimálnej hrúbky spájaných častí.



Obr. 1.3 Trňové nity so zalisovaným trňom

Jednou z najnovších aplikácií trňových nitov je ich využitie pri bodovom rotačnom zváraní trením^[9] hliníkových zliatin. Trňový nit, rotujúci vysokou rýchlosťou, je vtlačávaný do základného materiálu. Generované teplo vytvára bodový zvar. Po kompletnom preniknutí trňového nitu cez oba spájané materiály dochádza k jeho zanitovaniu. Táto technológia spájania má podľa autorov potenciál konkurovať bodovému zváraniu, či už ide o rýchlosť výroby alebo o mechanické vlastnosti vrátane únavy.

1.2 Kombinácia lepenia a nitovania

Lepeno – nitované spoje patria medzi hybridné techniky spájania. Hybridné spájanie je kombináciou dvoch alebo viacerých technológií spájania a ako také môže poskytnúť veľa dodatočných výhod vyplývajúcich z kombinácie týchto technológií. Súčasná aplikácia technológií lepenia a nitovania dáva možnosť vytvoriť spoj, ktorý sa bude vyznačovať lepšími vlastnosťami hlavne v porovnaní s nitovaním. Výhodami lepeno – nitovaných spojov sú v tomto prípade:

- vyššie mechanické vlastnosti (tuhosť, pevnosť)
- dlhšia životnosť spoja
- menší počet nitov, kratšia dĺžka preplátovania spoja
- tesnosť spoja

U lepených spojov sa použitím nitov zlepšuje predovšetkým odolnosť voči odlupovaniu. Nity tak tiež vymedzujú presnú polohu a vyvodzujú potrebný tlak pri vytvrdzovaní lepidla.

Lepeno – nitované spoje majú i niekoľko nevýhod, ktoré vyplývajú z dodatočného použitia lepidla. Môžeme medzi ne zaradiť nasledovné body:

- dlhší čas výroby v porovnaní so samostatným nitovaním
- môže byť potrebná dôkladná úprava povrchov adherendov pred lepením k zaisteniu požadovanej kvality a životnosti spoja
- problém s kontamináciou nitovacích nástrojov
- nerovnomerné rozloženie lepidla spôsobené lokálnymi rozdielmi v tlaku vyvinutom na plochu spoja pri nitovaní
- skomplikovanie opraviteľnosti konštrukcie

LNS môžeme rozdeliť z hľadiska využitia nitov respektíve lepidla pri prenose zaťaženia do troch základných skupín ^[1, 10]:

- 1) Nitované spoje, ktoré využívajú lepidlo iba ako tmel (hermetik) na utesnenie. Pri návrhu spoja sa uvažuje s prenosom zaťaženia len cez nity. Vplyv lepidla na tuhosť a pevnosť spoja je malý.
- 2) Lepené spoje s technologickými nitmi. Použitie nity slúžia predovšetkým k zvýšeniu pevnosti spoja pri odlupovaní, prípadne nahrádzujú montážne prípravky. Zaťaženie prenáša lepidlo.
- 3) Lepeno – nitované spoje, u ktorých sa pri návrhu počíta s prenosom zaťaženia nitmi i lepidlom. Jedným z problémov tejto technológie je zistiť ako sa rozdeľuje zaťaženie medzi lepidlom a nitmi pri namáhaní spoja.

Spoje typu 2 a 3 sú často využívané na dopravných lietadlách s pretlakovými kabínami. Spoje z prvej kategórie boli a sú využívané pri konštrukcii nádrží a v miestach, kde je dôležitá tesnosť a ochrana voči korózií. Zvláštnu kategóriu tvorí kombinácia trňových nitov a pružného polyuretánového lepidla. V praxi sa osvedčila najmä na ľahkých športových letúnoch. Primárnym cieľom pri použití trňových nitov je zníženie ceny a zvýšenie efektivity spájania. Majú však nižšie mechanické vlastnosti ako plné nity a práve i príspevok pružného polyuretánového lepidla na prenose zaťaženia býva významnejší. Toto lepidlo by malo taktiež znižovať koncentráciu napätia v okolí otvorov pre nity a v neposlednej rade plniť svoju základnú funkciu hermetiku, čiže utesňovať spoj a zabezpečovať ho proti vniknutiu vlhkosti a následnému možnému vzniku korózie. Tento druh LNS by sme teda mohli zaradiť niekde na rozhranie skupín 1 a 3.

V súčasnosti sa využitie takejto kombinácie spojov posúva i na konštrukčné celky lietadiel s vyššou hmotnosťou, spadajúcich do vyšších kategórií certifikačných predpisov. Hlavným dôvodom je efektivita tejto technológie. Jej použitie však nemôže viesť k zníženiu spoľahlivosti a bezpečnosti spojov respektíve k degradácii charakteristík nimi vytvorených konštrukčných celkov. Príkladom použitia takejto kombinovanej technológie spájania je letún VUT-100 (Obr. 1.4) spolu vyvíjaný na Leteckom ústave. Pre túto kategóriu lietadiel je okrem popisu statických mechanických vlastností dôležité aj poznanie životnosti spojov resp. konštrukčných celkov.

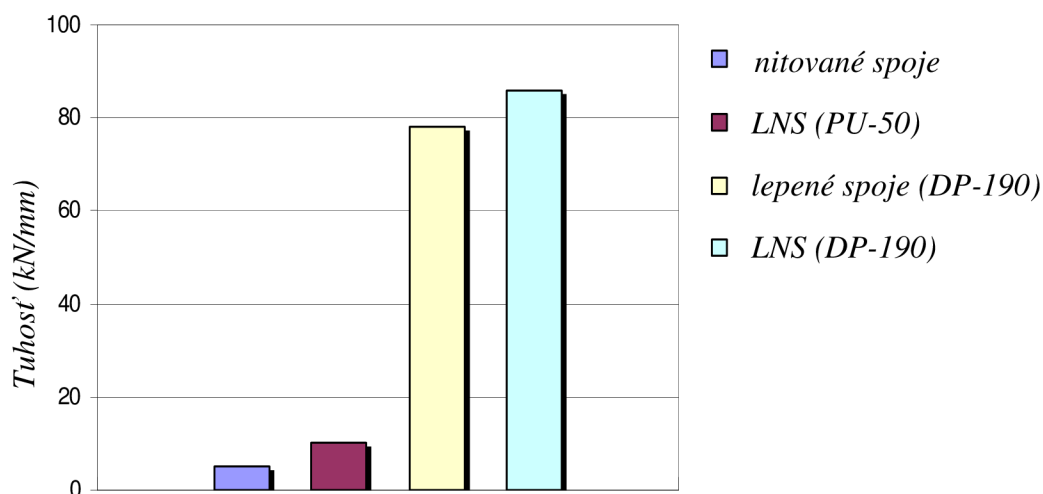


Obr. 1.4 Príklad použitia kombinácie trňových nitov a polyuretánového lepidla na VUT-100

V kooperácii s firmou EVEKTOR prebieha na Leteckom ústave rozsiahli výskum kombinovaných lepených a nitovaných spojov. Doteraz prevedené a publikované experimenty boli zamerané hlavne na statické mechanické vlastnosti LNS^[1, 2]. Testované spoje boli kombináciou trňových nitov (POP ϕ 3,2 mm) a polyuretánového lepidla EMFIMASTIC PU – 50, respektíve dvojzložkového epoxidového lepidla DP – 190. Statické experimenty potvrdili priaznivý vplyv lepidla na tuhosť a šmykovú pevnosť resp. únosnosť spoja i v prípade pružného lepidla PU – 50 (Tab. 1.1, Obr. 1.5).

Tab. 1.1 Šmyková únosnosť jedno strižného NS a LNS s jedným nitom^[1]

Typ spoja	Nit/Lepidlo	Hrúbka spájaných plechov t_1/t_2 (mm)	Šírka preplátovania L (mm)	Únosnosť F_{str} (N)
NS	POP 3,2 mm	0,8/0,8	25	1024
LNS	POP 3,2mm/PU-50	0,8/0,8	18	1992
LNS	POP 3,2mm/PU-50	0,8/0,8	25	2423
LNS	POP 3,2mm/PU-50	0,8/0,8	30	2504
LNS	POP 3,2mm/PU-50	0,8/0,8	45	2914



Obr. 1.5 Porovnanie tuhosti spojov ^[1]

1.3 Dynamické vlastnosti spojov v praxi

Vplyv dynamických vlastností na konštrukcie v reálnych podmienkach dokumentuje havária letu 243 amerických aerolínií Aloha ^[11, 12]. Na lietadle typu Boeing 737-200 pri lete z Hilo do Honolulu (Hawaii) 28. apríla 1988 došlo k havárii. Vo výške 7 300 metrov sa odtrhla malá časť počahu na ľavej strane trupu, čo viedlo k náhlej „explozívnej“ dekompresii. Lietadlo stratilo značnú časť trupu (Obr. 1.6). Pilotovi sa napriek rozsiahlemu poškodeniu podarilo úspešne pristáť. Bohužiaľ pri dekompresii prišla o život jedna zo stewardiek.



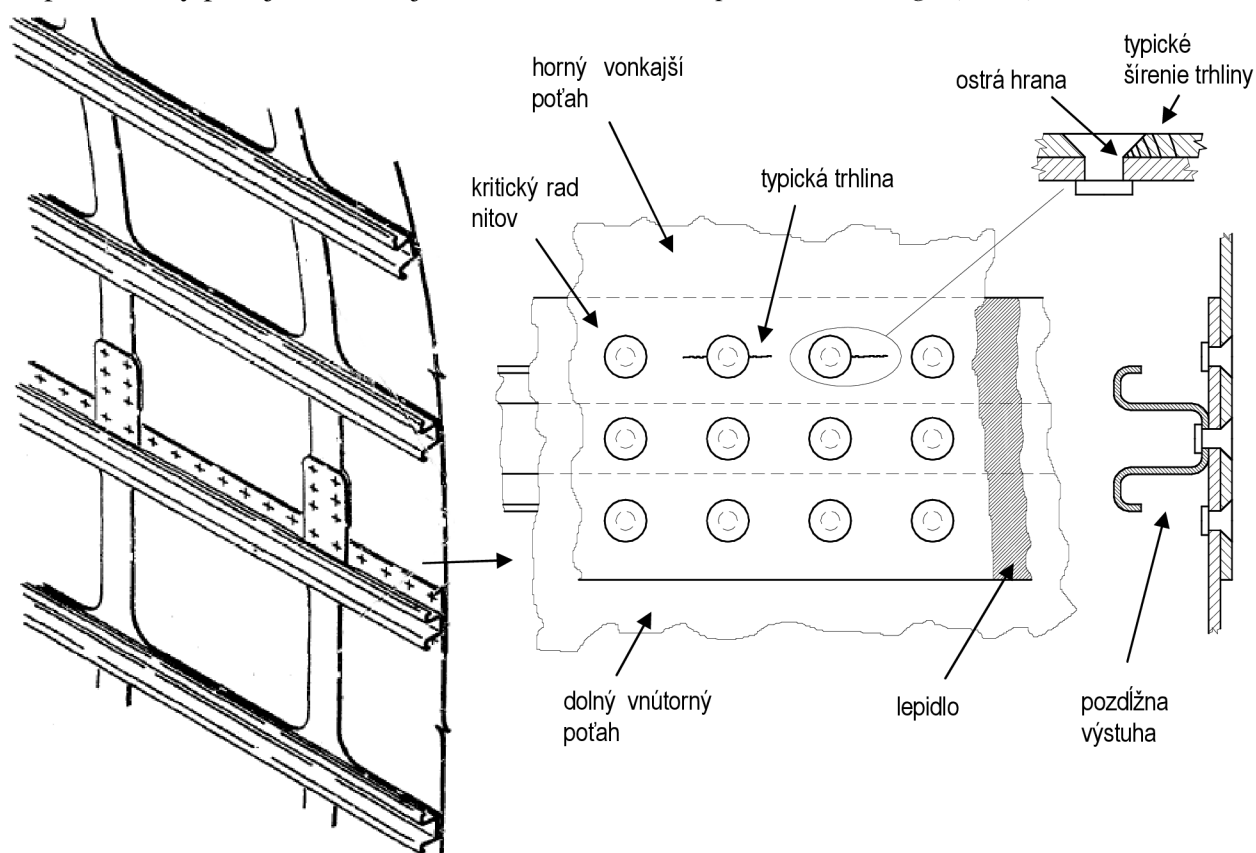
Obr. 1.6 Nehoda Boeingu 737-200 Aloha, 1988

Konštrukcia trupu bola navrhnutá tak, aby pri jeho poruche došlo ku kontrolovanej dekompresii. Príčiny neštandardného chovania trupu i príčiny samotného vzniku poškodenia boli predmetom rozsiahleho vyšetrovania. Základné údaje o lietadle ukázali, že bolo vyrobené v roku 1969. V dobe

nehody malo nalietaných 35 456 letových hodín, počet cyklov zem – vzduch – zem (ZVZ) bol 89 680. Počet cyklov úplného pretlakovania kabíny (52 kPa) bol výrazne nižší ako počet cyklov ZVZ kvôli krátkym vzdialenostiam medzi destináciami aeroliniiek Aloha. Na druhú stranu bola konštrukcia lietadla vystavená pôsobeniu teplého, vlhkého, prímorského prostredia.

Vyšetovanie zistilo, že poškodenie vzniklo v lepeno – nitovanom spoji (Obr. 1.7), ktorý bol vytvorený kombináciou lepenia za studena a nitovania zápustnými nitmi. Boeing pred prvým použitím tohto spoja previedol testy, na malých vzorkách i väčšej sekcii trupu, ktoré splnili požiadavky predpisu. Avšak už čoskoro po zavedení tejto technológie, zistili technici Boeingu, že príprava povrchu pred lepením nezabezpečuje vznik dostatočne stabilnej oxidickej vrstvy na adherendoch, čo by v kombinácii s lepením za studena mohlo viesť k predčasnému starnutiu lepidla a korózii adherendov. Boeing vydal manuály, v ktorých na toto upozornil a predpísal preventívne, pravidelné prehliadky kritických miest. Vyšetovanie preukázalo, že údržba aeroliniiek tieto prehliadky zanedbala.

Počas prevádzky lietadla došlo pôsobením pretlakovania a vplyvmi prostredia k starnutiu lepidla a vzniku korózie na rozhraní adherend – lepidlo, čo viedlo k postupnému odlepovaniu spoja. Celý spoj bol navrhnutý tak, že väčšinu zaťaženia od pretlakovania malo prenášať lepidlo. Po jeho porušení prenášali toto zaťaženie len tri rady zápustných nitov. Únavová životnosť týchto nitov bola kvôli ostrej hrane zapustenia (vysoká koncentrácia napätia → rýchli vznik trhlín) veľmi nízka. Čoskoro sa po porušení lepidla začali pozdĺž celého spoja, najmä na vrchnej rade nitov, tvoriť trhliny. Tento proces vyústil až do havárie. Proces postupného vzniku a šírenia malých trhlín, prvý krát pozorovaný po tejto havárii, je dnes známi ako *multiple – site damage (MSD)*.



Obr. 1.7 Konštrukcia poškodeného panelu a popis vzniku poškodenia ^[11]

Faktory, ktoré sa spolupodieľali na vzniku poškodenia, ktoré následne spôsobilo haváriu môžeme v skratke zhrnúť do týchto bodov:

- *nedostatočná príprava povrchu adherendov*
- *vytvrdzovanie lepidla za studena (izbová teplota)*
- *zapustenie (nitov) s ostrou hranou*
- *pôsobenie agresívnej vlhkej, teplej prímorskej atmosféry*
- *zanedbanie preventívnych prehliadok*

2 CIELE PRÁCE A METODIKA RIEŠENIA

Práce publikované o riešenej problematike popisujú hlavne správanie lepeno – nitovaných spojov vytvorených kombináciou plného nitu najčastejšie so zápusťou hlavou a epoxidového konštrukčného lepidla. Tieto spoje sa s výhodou využívajú u väčších lietadiel s pretlakovými kabínami. Únavové vlastnosti nitovaných a lepeno – nitovaných spojov tvorených progresívnymi trňovými nitmi neboli až do súčasnosti komplexne popísané. Výnimkou sú pravdepodobne len staršie výskumy ESDU ^[3, 4] a Imanakov výskum ^[5], ktorý však rieši problém únavy LNS s trňovými nitmi na oceľových adherendoch. Technológia nitovania trňovými nitmi najmä v kombinácii s polyuretánovými lepidlami je v súčasnosti jednou z najrozšírenejších pri výrobe menších lietadiel, kde patrí Česká Republika medzi čelných producentov. Doteraz prevedený výskum lepeno - nitovaných spojov, ktorý prebiehal na LÚ bol zameraný na popis statických mechanických vlastností. Taktiež bol vykonaný rozsiahly výskum, ktorý popisoval vplyv rôznych druhov prostredí na tieto statické mechanické vlastnosti LNS ^[13].

Ďalším doposiaľ neuspokojivo popísaným problémom je proces distribúcie zaťaženia v kombinovanom lepeno – nitovanom spoji. Prevažná väčšina autorov rieši tento problém pomocou kombinácie experimentov a MKP simulácií ale opäť hlavne na LNS tvorených plnými nitmi. Kombinácia MKP analýzy a experimentov je vhodná i k popisu vplyvu lepidla na rozloženie napätia v okolí nitu, čím by sa dal objasniť jeho účinok na únavové vlastnosti.

Táto práca je zameraná na zmapovanie vlastností LNS, ktorým v doposiaľ publikovaných výskumoch nebolo venovaného mnoho priestoru. Ide hlavne o únavové vlastnosti LNS tvorených kombináciou trňových nitov a polyuretánového lepidla. V nadväznosti na výskum LNS na Leteckom ústave a predbežnej rozsiahlej rešerše riešenej problematiky je cieľom práce vyriešenie nasledujúcich bodov:

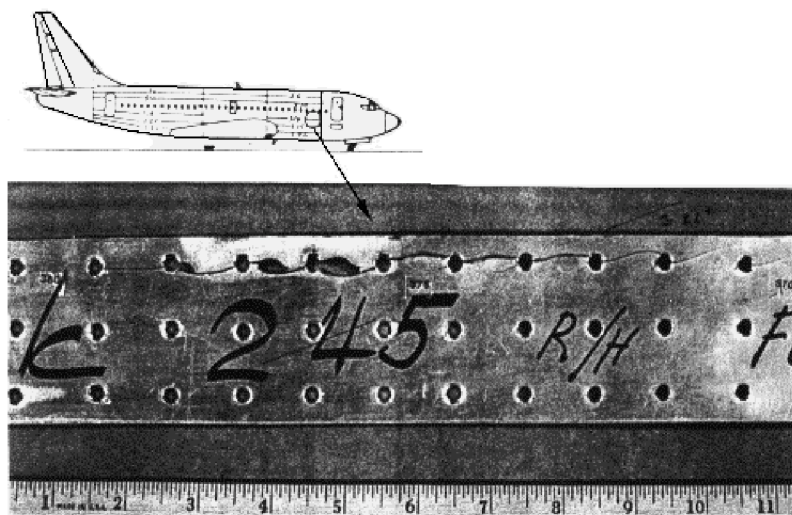
- 1) *Analýza gradientu napätia a napätových špičiek v okolí otvoru pre nit počas zaťažovania nitovaných a lepeno- nitovaných spojov.*
- 2) *Posúdenie a popis vplyvu lepidla na gradient napätia a napätové špičky v okolí nitu.*
- 3) *Overenie únavových vlastností typických nitových spojov používaných na malých lietadlách. Porovnanie S/N kriviek lepeno - nitovaných a nitovaných spojov.*
- 4) *Posúdenie a popis vzťahu medzi použitím lepidla a únavovými vlastnosťami LNS*

Na základe vyššie stanovených cieľov, bolo prvým krokom riešenia zosumarizovanie a popis relevantných výskumov zameraných na prenos zaťaženia, napätový stav a dynamické vlastnosti nitovaných a lepeno – nitovaných spojov. Niektoré zaujímavé výsledky a závery týchto výskumov sú uvedené v nasledujúcej kapitole a ovplyvnili i ďalšie smerovanie práce. Vychádzajúc zo zistených informácií sú ďalšími krokmi riešenia napätovo deformačná analýza NS a LNS a únavové skúšky týchto spojov prevedené za účelom získania S/N kriviek. Napätovo deformačná analýza prebehla v dvoch fázach. Prvou bola MKP analýza, pri ktorej boli vytvorené a testované MKP modely nitovaného a kombinovaného spoja s jedným nitom. Druhou časťou tejto analýzy bola experimentálno - verifikačná fáza, pri ktorej sa pomocou modernej optickej metódy merania deformácií popisoval napätovo deformačný stav skúmaných spojov počas ich zaťažovania. Podrobná metodika únavových skúšok je uvedená v kapitole 5.1. Posledným krokom práce je zhrnutie a vyhodnotenie všetkých nameraných a vypočítaných výsledkov, ktorého hlavným cieľom je posúdenie vplyvu lepidla na prenos zaťaženia a únavové vlastnosti lepeno – nitovaných spojov.

3 HISTÓRIA A SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

3.1 Meranie napätia a deformácií na nitových spojoch

Väčšina výskumných projektov, ktoré sa zaoberali napätovými stavmi v nitovaných spojoch, bola zameraná na popis vplyvu roznitovania nitu, resp. nitovacej sily na rozloženie zvyškového napätia v okolí otvoru pre nit. Skúmané boli jednoduché jedno strižné vzorky ako aj viac radové nitované spoje, ktoré simulovali časti poťahových panelov na trupe. Vo väčšine prípadov boli použité plné nity so zápustnou hlavou. Účelom týchto výskumov bolo hľadanie väzieb medzi splasticizovanou zónou v okolí nitu a vznikom malých mnohonásobných trhlín (MSD, *Obr. 3.1*) na nitovaných spojoch pri cyklickom únavovom zaťažení.



Obr. 3.1 Časť poťahu trupu B737 s poškodením MSD [NASA]

Fitzgerald ^[17] napríklad popisoval zvyškové napätia po nitovaní v materiáli pomocou röntgenovej techniky. Ukázalo sa, že rovnako ako pri väčšine spôsobov meraní vyvinutých neskôr je použitie tejto techniky limitované na meranie v blízkosti povrchu spájaného plechu.

Rozsiahli experimentálny program prevedený Müller-om ^[18] preukázal, že únavová životnosť nitovaného spoja závisí na nitovacej sile a pri jej zväčšení dochádza k významnému predĺženiu životnosti spoja. Pri experimentoch zameraných na meranie zvyškového napätia v okolí nitu využíval fotoelastické merania deformácií a merania mikro tvrdosti. Inak pri vyhodnocovaní týchto

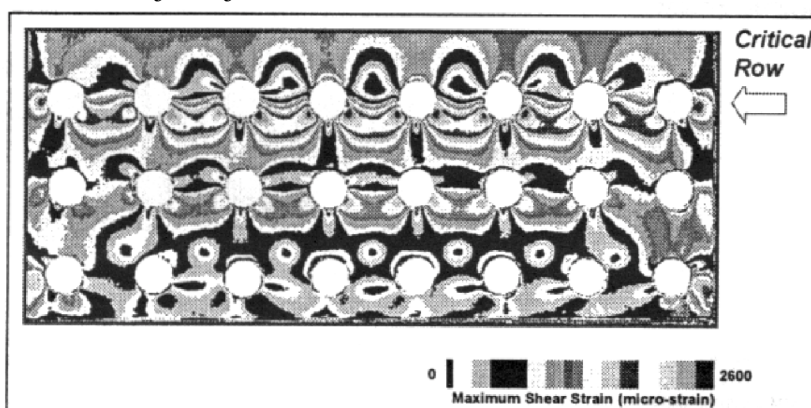
lokálnych stavov pracoval hlavne s MKP modelom nitového spoja vytvorenom v preprocesore PATRAN a riešeného solverom ABAQUS.

de Rijck ^[19] v tom istom duchu, vo veľkej miere na základe verifikovaného MKP modelu, pojednáva o vplyve nitovacej sily a veľkosti uzatváracej hlavy (priemer, výška) ako o indikátoroch únavových charakteristík leteckých nitovaných spojov.

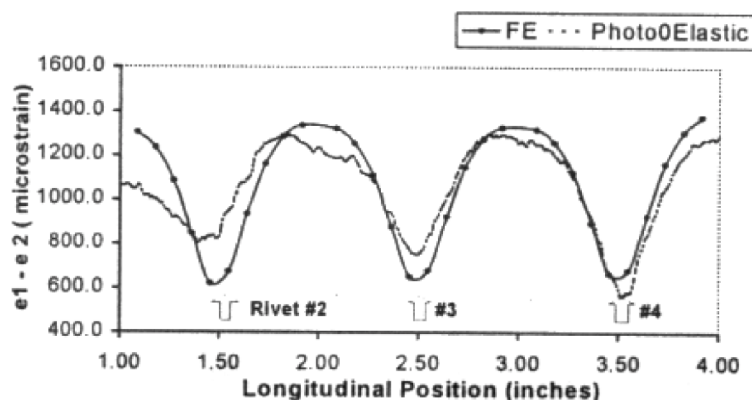
Li a Shi ^[20] previedli *in-situ* meranie zmien pomerných deformácií počas celého nitovacieho procesu pomocou mikrotenzometrov. Cieľom tohto výskumu bolo vytvoriť presný 3D MKP model, ktorý by umožnil štúdium zvyškových napätí a deformácií rovnako ako sledovanie ich zmien v priebehu zaťažovania nitového spoja.

Markiewicz a Langrand ^[21, 22] využili pole tenzometrov pri meraní rozloženia deformácie počas a po procese nitovania nitu so zápustnou hlavou ($d = 4 \text{ mm}$). Taktiež previedli MKP analýzu nitovacieho procesu, ktorú validovali s experimentálne nameranými hodnotami. Zistili, že proces nitovania môže byť rozdelený do siedmych fáz, ktoré zodpovedajú rozličnému transferu energie medzi nitom a spájanými materiálmi. Konštatujú, že nitovanie viedlo k vzniku oblasti s významným nárastom pomernej deformácie približne do $0,5 \text{ mm}$ od hrany otvoru pre nit.

Eastaugh ^[23, 24] pri štúdiu vzťahu medzi koróziou, únavou a vznikom mnohonásobného únavového poškodenia (MSD) použil na popis napät'ového stavu, na k tomuto účelu špeciálne vyvinutých vzorkách, kombináciu MKP modelu a automatického fotoelastického systému merania pomerných deformácií. Vizualizácia nameraného rozloženia pomerných deformácií je znázornená na Obr.3.2. Porovnanie medzi MKP simuláciou a fotoelastickým meraním pomernej deformácie je na Obr. 3.3. Z tohto obrázku je zrejmé v celku dobrá zhoda medzi simuláciou a meraním.

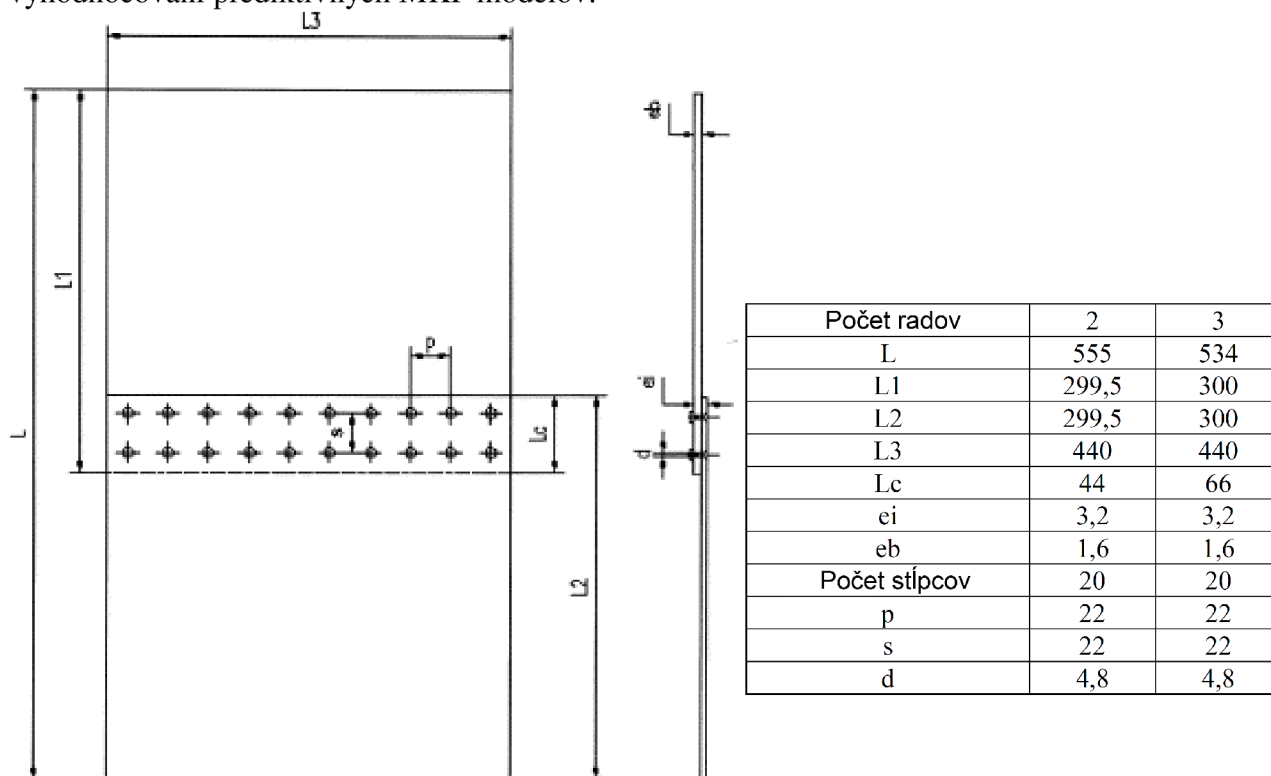


Obr. 3.2 Rozloženie pomernej šmykovej deformácie zaznamenané fotoelastickou metódou ^[23]



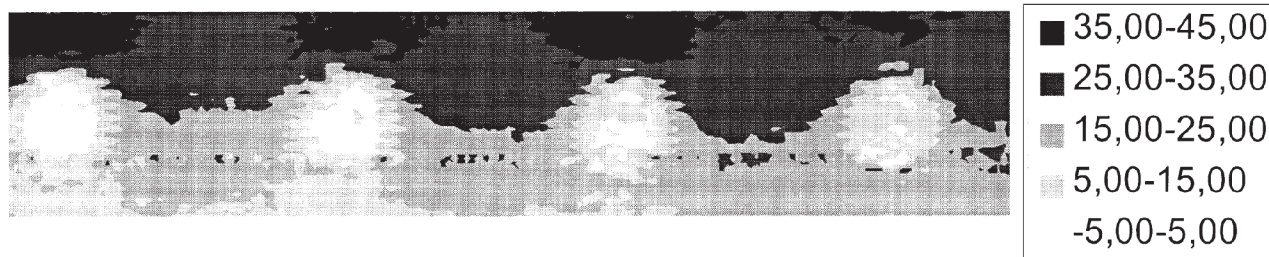
Obr. 3.3 Porovnanie profilu pomerných šmykových deformácií medzi fotoelastickým meraním a MKP modelom na viac radovom nitovom spoji ^[23]

Silva-ov výskum ^[25] zahŕňa únavové skúšky nitovaného preplátovaného vzorku (Obr. 3.4), konštantnou amplitúdou zaťaženia, zloženého z duralových plechov (2024-T3) o hrúbke 1,6 mm a zápusných nitov s priemerom 4 mm (2117-T4). V priebehu a i po ukončení únavových skúšok boli prevádzané kontroly za účelom stanovenia času vzniku, miesta a rozsahu únavového poškodenia. Dáta o iniciácii a raste trhlín ako aj o zvyškových napätiach boli použité pri tvorbe a vyhodnocovaní prediktívnych MKP modelov.



Obr. 3.4 Skúšobná únavová vzorka ^[25]

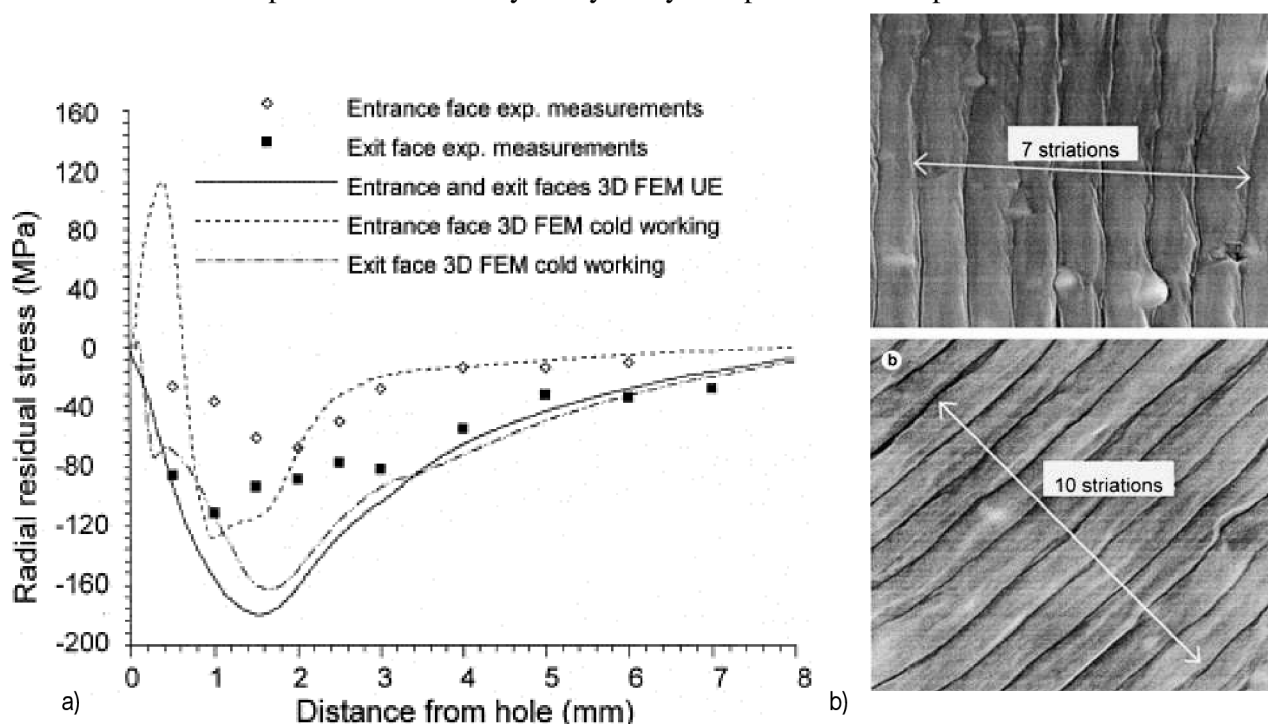
Meranie napätí bolo prevedené pomocou tenzometrov a infračervenej techniky SPATE za účelom determinácie rozloženia zaťaženia a z dôvodu popísania jeho prerozdelenia v dôsledku vzniku trhlín na otvoroch pre nity na skúmanom spoji. Tento spoj prenáša zaťaženie z jedného plechu na druhý hlavne prostredníctvom šmykového zaťaženia cez nity, ale určitou mierou sa na prenose zaťaženia podieľa aj trenie medzi spojenými plechmi. Prenos zaťaženia, koncentrácia napätia v okolí nitu a prídavné ohybové zaťaženie spôsobujú vznik komplexného rozloženia napätia zobrazeného na Obr. 3.5. Na tomto obrázku je infračervený snímok zaznamenaný systémom SPATE, ktorý zobrazuje rozloženie napätia na nitovom spoji. Legenda zobrazuje napätie v MPa. Oblasti s nízkym napätím medzi nitmi sú výsledkom sekundárneho ohybového namáhania.



Obr. 3.5 Rozloženie napätia v okolí nitov merané systémom SPATE ^[25]

de Matos, Pina a de Castro ^[26, 27] nadväzujú na Silvov výskum a dopĺňajú ho hlavne popisom reziduálneho napät'ového poľa vytvoreného procesom studenej expanzie otvorov (cold expansion). Toto pole bolo experimentálne vyhodnocované použitím röntgenovej techniky. Previedli i MKP analýzu rôznych detailov spoja pomocou programu ABAQUS, za účelom popisu poľa zvyškového napätia, faktoru intenzity napätia, prenosu zaťaženia a v neposlednej rade aj za účelom simulácie šírenia únavových trhlín.

Na Obr. 3.6a je porovnané zmerané a vypočítané rozloženie napätia v okolí otvoru. Zároveň sú na Obr. 3.6b fotografie únavového poškodenia upraveného a neupraveného otvoru. Medzery medzi únavovými striacami sú v okolí upravovaného otvoru menšie, čo bolo priamym dôsledkom pomalšieho šírenia trhlín spôsobeného tlakovým zvyškovým napätím v tomto priestore.

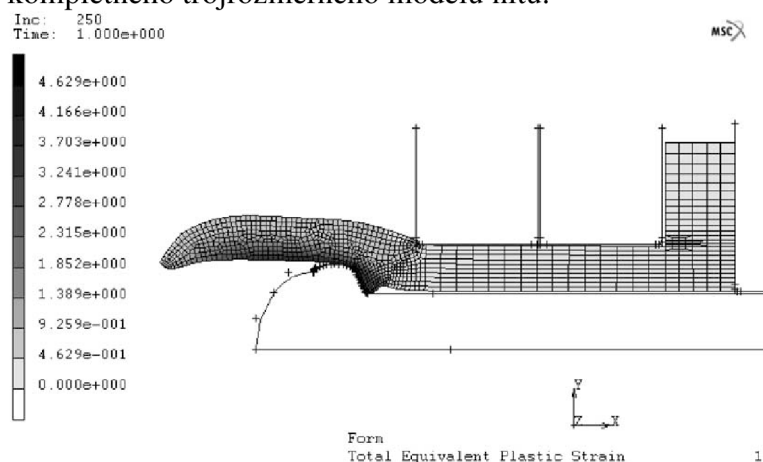


Obr. 3.6 a) Rozloženie radiálnych zvyškových napätí v okolí otvoru; b) Medzery medzi únavovými striacami: Neupravovaný otvor (hore), dĺžka trhliny $a = 2.71 \text{ mm}$ ($\times 20,000$); otvor upravený expanziou za studena (dole), dĺžka trhliny $a = 2.50 \text{ mm}$ ($\times 40,000$) ^[27]

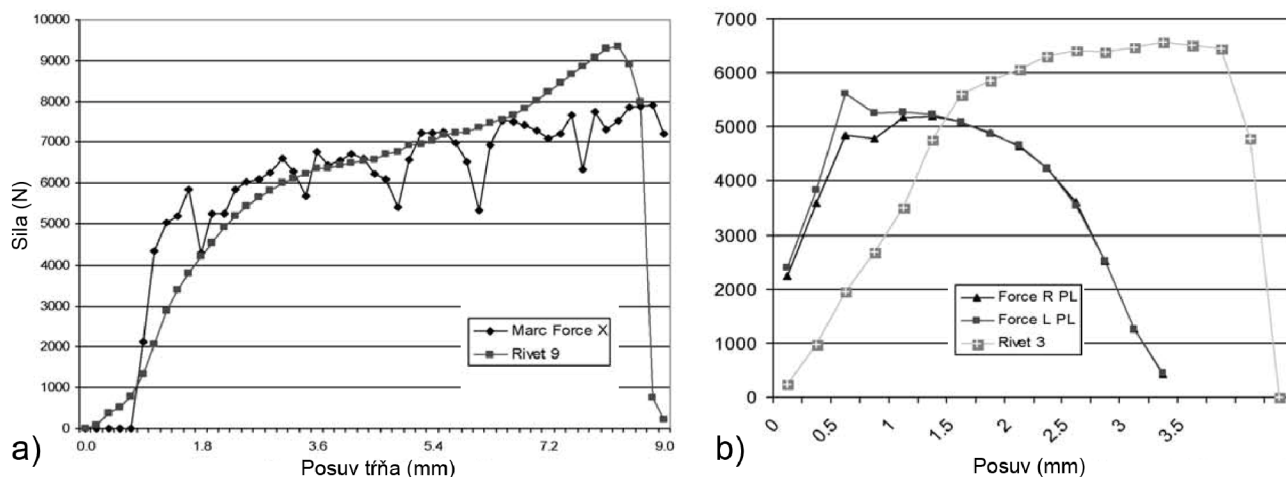
Všetky doteraz popísané analýzy, uvedené v tejto kapitole, boli zamerané na plné nity väčšinou so zápuštnou hlavou. Napät'ovo deformačným analýzám spojov tvorených trňovými nitmi nie je venovaná taká veľká pozornosť. V dostupných elektronických databázach sa podarilo objaviť tri práce, ktoré podrobnejšie analyzujú proces samotnej tvorby nitu spojenej s následnou simuláciou ťahovej skúšky spoja (Kelly ^[28], Cebulski ^[29], Adamík ^[30]).

Kelly ^[28] sa vo svojej práci zaoberá MKP simuláciou procesu nitovania trňového nitu a následným modelovaním ťahovej skúšky vzorky s jedným nitom. Využíva pri tom dvojdimenzionálny, osovo symetrický model nitu vytvorený v programe MSC.MARC/Mentat (Obr. 3.7). Modelovaný spoj je zložený z plechov z Al zliatiny o hrúbke 4 mm , ktoré sú spojené pomocou jedného trňového nitu s priemerom $6,4 \text{ mm}$ (materiál 5056). V práci sú skúmané sily potrebné k vytvoreniu uzatvárackej hlavy a je porovnávaná MKP simulácia odlupovacej skúšky s reálnym testom. Pre popis vlastností nitovacieho procesu previedol autor sériu skúšok, pri ktorých meral nárast nitovacej sily na posunutí trňa. Porovnanie MKP simulácie, nameraných hodnôt a výsledného

tvary uzatvárajacej hlavy ukázalo, že dvoj dimenzionálny model uspokojivo predikuje skutočný priebeh formovacieho procesu nitu (Obr. 3.8a). Zhody sa nepodarilo dosiahnuť pri simulácii ťahového poškodenia nitu (Obr. 3.8b). Túto nezhodu pričíta autor práve použitiu 2D modelu a odporúča použitie kompletného trojrozmerného modelu nitu.

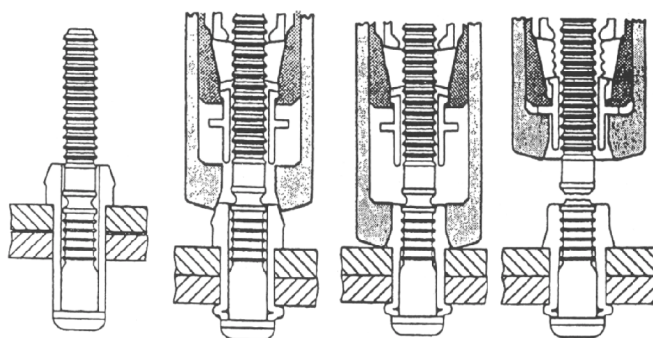


Obr. 3.7 MKP simulácia procesu tvorby uzatvárajacej hlavy pri posunutí trňa o 9 mm [28]



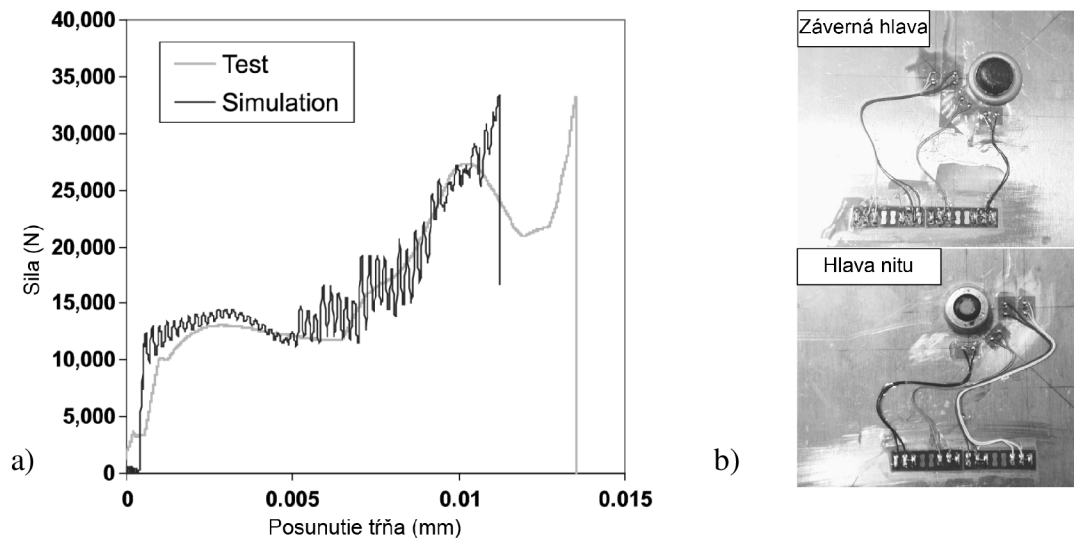
Obr. 3.8 a) Závislosť nitovacej sily na posunutí trňa; b) Závislosť sily a celkového posunutia pri ťahovej skúške nitu [28]

Podobný druh experimentov previedol i Cebulski [29]. Použil však iný typ trňového nitu (Huck BOB R10, Obr. 3.10) s priemerom 7,9 mm. Spájané plechy boli z hliníkovej zliatiny 6061 T6 s hrúbkou 3 mm. MKP simulácia bola prevedená explicitne v programe PAMCRASH na trojrozmernom modeli nitového spoja.



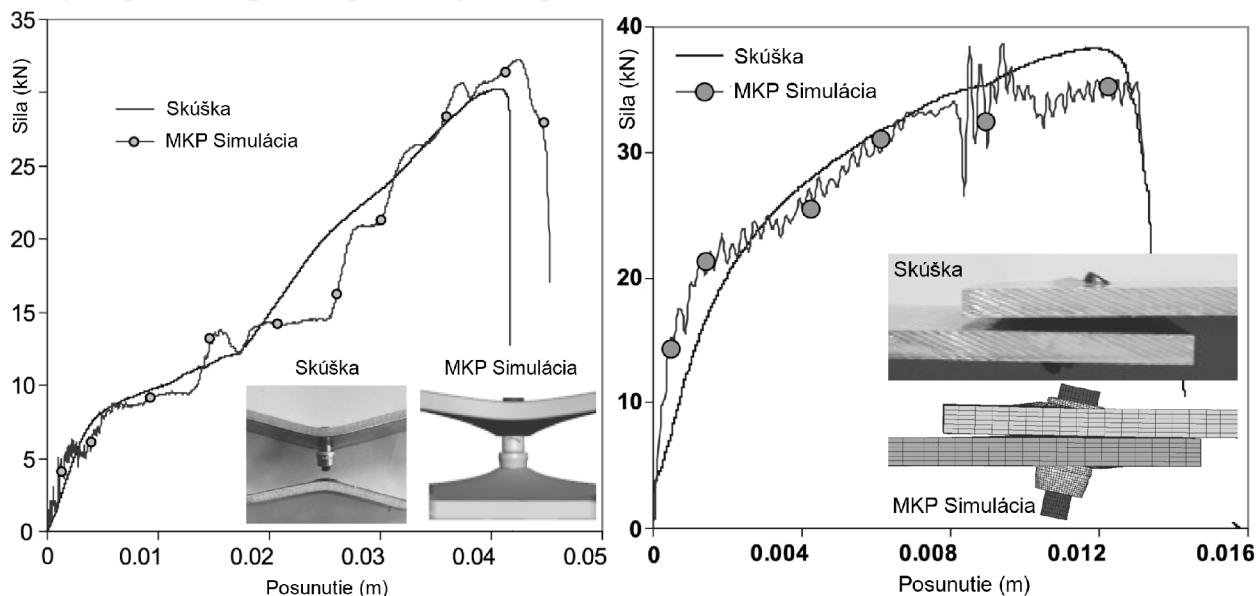
Obr. 3.10 Trňový nit Huck BOB R10 a schéma procesu nitovania [29]

Simulácia nitovacieho procesu v porovnaní s experimentmi bola s pohľadu závislosti sily na posunutí trňa uspokojivá (Obr. 3.11a). Zároveň sa pomocou mikrotenzometrov (VISHAY EP-08-031EC-120), nalepených na plechoch v blízkosti otvoru pre nit pred nitovaním, pokúsili zmerať prípadný vznik zvyškového napät'ového poľa, resp. plastickej zóny v okolí nitu po nitovaní (Obr. 3.11b). Po skúškach však nebol zaznamenaný žiadny významný nárast plastickej deformácie v tomto priestore. V ďalšom kroku využili týmto spôsobom vytvorený model spoja pri simulácii odlupovacej a ťahovej – šmykovej skúšky.



Obr. 3.11 a) Závislosť nitovacej sily na posunutí trňa; b) Spoj po zanitovaní^[29]

Z porovnania tvaru skutočných poškodení a silového prenosu s MKP simuláciami príslušných testov (Obr. 3.12a, b) je zrejmé, že použitím trojrozmerného modelu došlo k priblíženiu ku skutočnému stavu aj pri simulácii odlupovacej a ťahovej skúšky. Takto validovaný model a simulácie umožňujú okamžitý prístup k informáciám, ktoré sa nedajú získať alebo len veľmi náročným spôsobom priamo pri reálnych experimentoch.



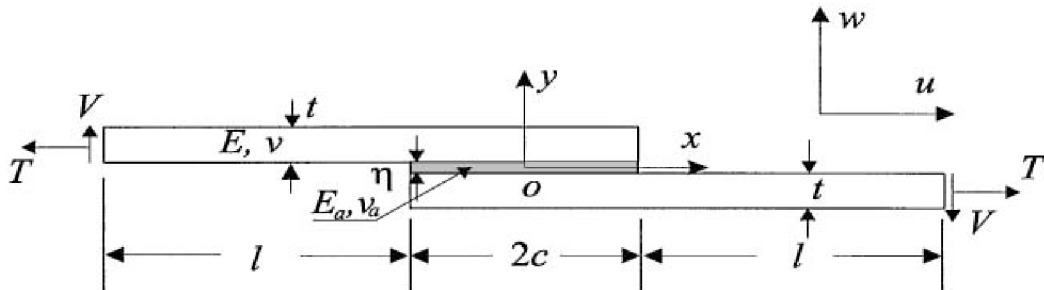
Obr. 3.12 Porovnanie MKP simulácií s experimentmi^[29]

Výskum kolegu Adamíka^[30] je popísaný v kapitole 4.2, keďže táto práca, konkrétne časť MKP analýzy lepeno – nitovaného spoja, priamo na tieto experimenty nadväzuje.

3.2 Napätovo deformačné analýzy lepených spojov

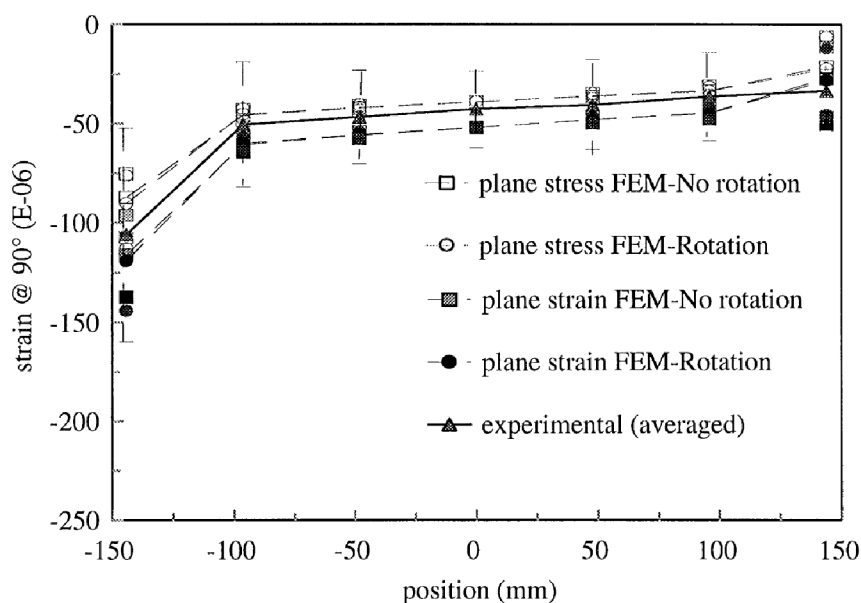
Z historického pohľadu je analýzám lepených spojov venovaný minimálne rovnaký priestor ako nitovaným spojom. V súčasnosti sa skoro bez výnimky využívajú pri analýzách MKP metódy, ktoré sa modifikujú alebo verifikujú pomocou teoretických výpočtových modelov. Veľký počet prác publikovaných o lepených spojoch sa zaoberá analýzami spojov vytvorených pomocou vysoko pevných, prevažne epoxidových lepidiel. Naproti tomu sa len veľmi málo zverejnených výskumov venuje simuláciám spojov s pružným lepidlom. V tejto kapitole je rozobraný jeden príklad z oboch týchto skupín.

Li a Lee-Sullivan^[31] skúmali lepený jedno strižný spoj (Obr. 3.13) s využitím MKP analýz, ktoré verifikovali experimentálne aj teoretickým výpočtom. Pri MKP simulácii využili dvojrozmerný nelineárny model vytvorený v programe ANSYS. Vyhodnocovali napríklad rozloženie pomerných deformácií a napätia v spoji, okrajové podmienky na koncoch spoja a dva rôzne systémy lepidiel odlišujúce sa tuhosťou. Išlo o epoxidové lepidlá s modulmi pružnosti 0,85 GPa resp. 1,25 GPa ($\nu = 0,31$). Adherendy boli z Al zliatiny 6061-T6 ($E = 65.8$ GPa).



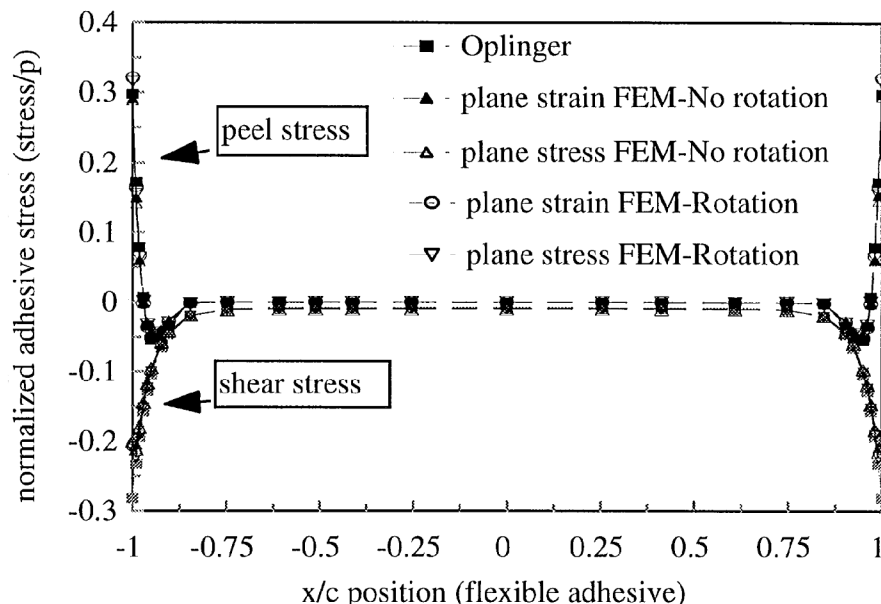
Obr. 3.13 Schéma analyzovaného lepeného spoja (rozmery v mm: $t = 6,35$; $W = 50,8$; $\eta = 0,3$; $c = 149,22$; $l = 238,18$)^[31]

MKP simulácia ťahovej skúšky bola porovnávaná len s výsledkami experimentu vzorky lepenej lepidlom s menšou tuhosťou. K tomuto účelu boli na tejto vzorke nalepené tenzometry. Ako je možné vidieť na obr. 3.14 experimentálne namerané hodnoty pomerných deformácií sa zhodujú s MKP simuláciou. Výnimkou sú však koncové hrany spoja.



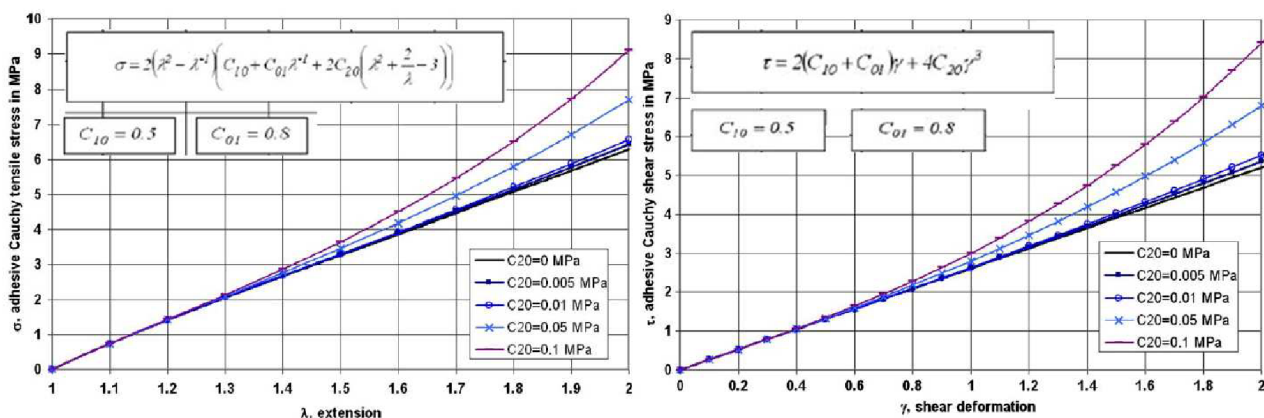
Obr. 3.14 Porovnanie MKP simulácie a merania tenzometrov pri zaťažení 5 kN^[31]

Výsledky namerané na vzorkách bez prechodového rádiusu na konci lepeného spoja, boli porovnané pre oba systémy lepidiel s analytickou výpočtovou metódou navrhnutou Oplingerom [32]. Príklad výsledkov - porovnanie rozloženia napätia v odlupovaní a šmykového napätia pozdĺž spoja je na Obr. 3.15. Medzi inými závermi bolo zistené, že vplyv okrajových podmienok u MKP modelu (kĺb, votknutie) je významnejší pri nižších hladinách zaťaženia. Ďalej napríklad, že analytická Oplingerova metóda dobre popisuje napätia v odlupovaní pričom u šmykového napätia, dochádza pri jej použití k vyšším odhadovaným hodnotám v porovnaní s MKP simuláciami.



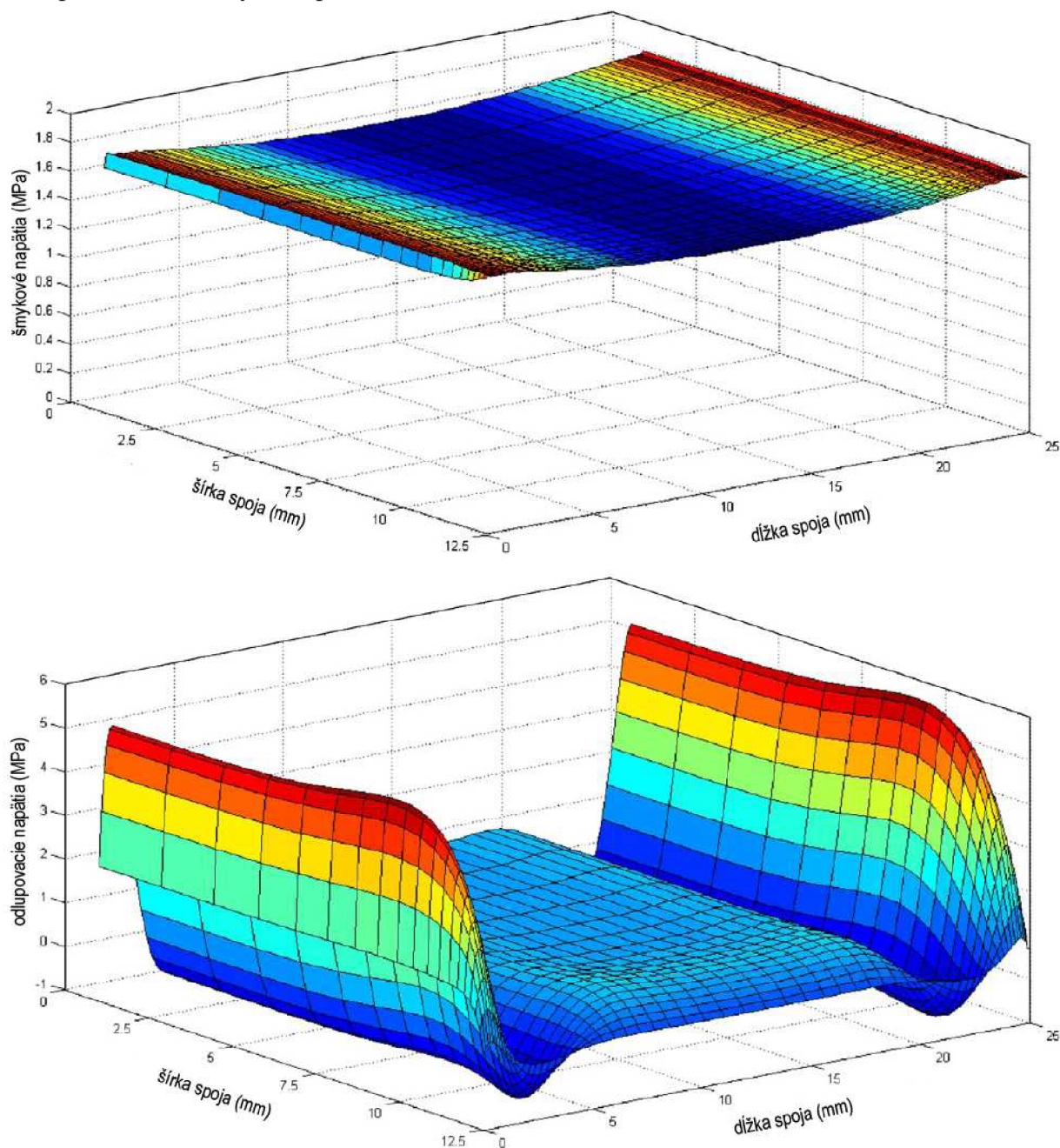
Obr. 3.15 Rozloženie napätia v lepenom spoji: porovnanie MKP simulácie a analytického výpočtu pri zaťažení 5 kN [31]

Hoang-Ngoc [33] analyzoval pomocou MKP metód jedno strižný lepený a kombinovaný skrutkový a lepený spoj, pri ktorých bolo použité extrémne pružné lepidlo s charakterom gumi. Správanie tohto lepidla bolo popisované s využitím hyperelastického materiálu, vytvoreného na základe Mooney – Rivlinovovho modelu. Previedol dvoj rozmernú a trojrozmernú analýzu napätosti so zahrnutím geometrických a materiálových nelinearít. Teoretické závislosti hyperelastického materiálu pri jednoosej ťahovej a jednoduchej šmykovej deformácii sú zobrazené na Obr. 3.16. Na základe týchto kriviek vytvoril niekoľko MKP modelov, na ktorých testoval vplyv stlačiteľnosti lepidla a Mooney – Rivlinovho parametru C_{20} .



Obr. 3.16 Teoretické napätové krivky $\sigma(\lambda)$, $\tau(\gamma)$ hyperelastického materiálu popísaného pomocou Mooney – Rivlinovho modelu ($C_{10}=0,5$, $C_{01}=0,8$) [33]

Skúmaná bola taktiež tuhosť spoja ako aj rozloženie napätia v spoji (Obr. 3.17). V práci uvádza, že skrutkové spoje v kombinácii s hyperelastickým lepidlom (tmelom) disponujú lepšími únavovými vlastnosťami na základe zníženia koncentrácie napätia v okolí ich otvorov. Túto hypotézu však nepodložil únavovými experimentmi.



Obr. 3.17 Rozloženie napätia na povrchu lepeného spoja

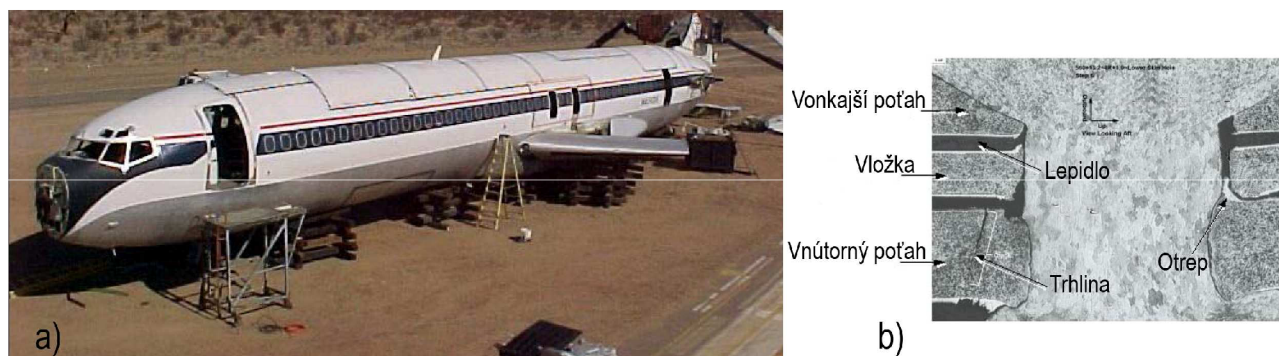
3.3 Napätovo deformačné analýzy lepeno – nitovaných spojov

Dechwayukul^[34, 35] navrhol pre vyhodnocovanie vplyvu tmelov a lepidiel v nitovaných spojoch metódu TALA (Thin Adhesive Layer Analysis). Ide o spôsob popisu vlastností lepidla pri MKP analýze, kedy sa vrstva lepidla nahrádza pružinovými ťahovými a šmykovými elementmi. Metódu konfrontoval so stávajúcimi spôsobmi riešenia ako pre lineárne lepidlá s vysokým modulom pružnosti tak aj pre nízko modulové lepidlá vyznačujúce sa nelineárnym správaním. Experimenty

a analýzy, ktoré previedol naznačujú, že i tenká vrstva tmelu znižuje koncentráciu napätia a zvyšuje únavovú životnosť nitovaných spojov so zapustenou a pologulátou hlavou.

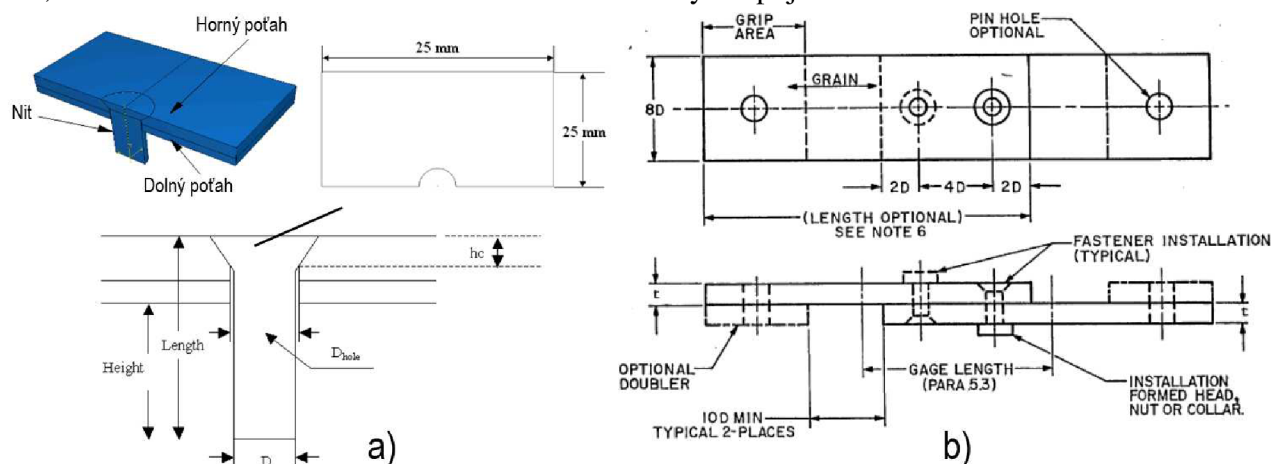
Fongsamotr^[16, 36] nadväzuje na predchádzajúci výskum a zameriava sa hlavne na popis vlastností kombinovaných nitových spojov, ktoré využívajú konštrukčné epoxidové lepidlá. Konkrétne skúma vplyv rozstupov nitov a dvoch rôznych druhov epoxidových lepidiel na vlastnosti jedno strižných vzoriek pomocou MKP a TALA metódy. Výsledky analýz vykazujú v porovnaní s experimentmi rozdiely v rozmedzí 6 až 32 %.

Atreho práce^[14, 37] sú súčasťou spoločného projektu FAA a Delta Airlines, v rámci ktorého sa prevádzali deštrukčné skúšky, MKP analýzy, únavové skúšky a inšpekcie deviatich panelov získaných z vyradeného dopravného lietadla Boeing 727-232 (Obr. 3.18a). Zväčšený rez jednej časti nitového spoja B 727 je na Obr. 3.18b.



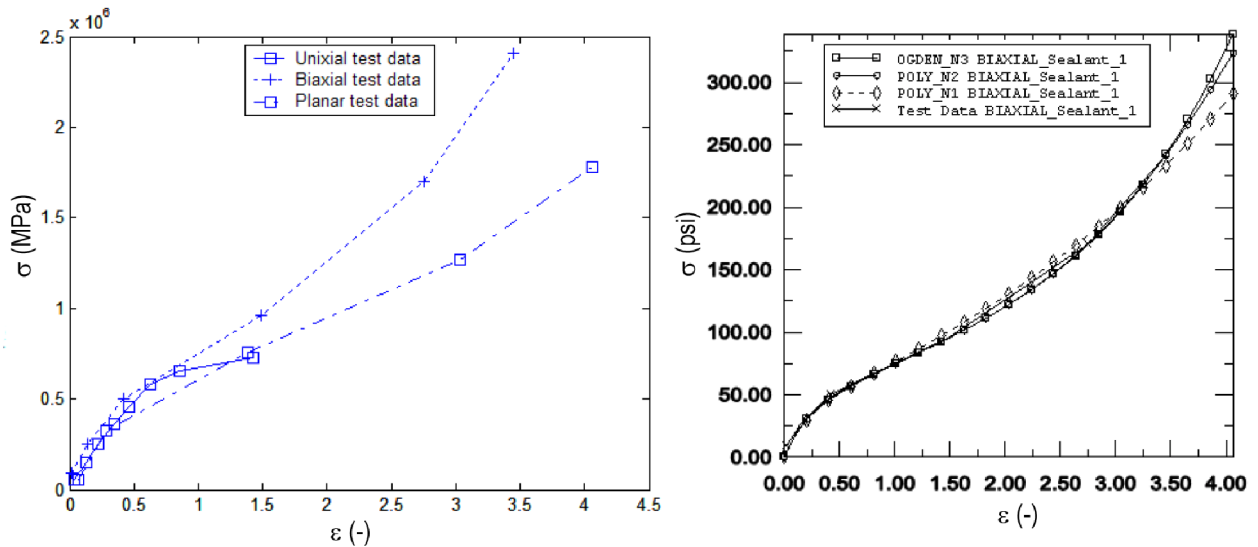
Obr. 3.18 a) Boeing B 727-232, b) rez nitovým spojom^[37]

Atre sa v tomto projekte zaoberá štúdiom zvyškového napätia generovaného pri procese nitovania a jeho vplyvom na vznik a šírenie únavového poškodenia. Taktiež posudzuje i vplyv tmelu použitého v nitových spojoch. Hlavným cieľom jeho práce je stanovenie vzťahu medzi kritickými parametrami procesu nitovania a únavovým poškodením nitovaných spojov. Ako hlavnú metódu riešenia spojenú s popisom nitovacieho procesu a plastickej oblasti vzniknutej v okolí otvoru si zvolil simulácie modelov pomocou MKP. Vytvoril sériu modelov: 2D osovo symetrický a štvrtinovo symetrický kvázi statický 3D model, ktoré riešil implicitne a explicitne v MKP programe ABAQUS (Obr. 3.19a). Súčasťou jeho výskumov sú aj únavové skúšky jedno strižných lepeno – nitovaných vzoriek (Obr. 3.19b) zamerané na popis vzťahu medzi kvalitou inštaláciou nitu, kvalitou otvoru a únavovou životnosťou testovaných spojov.



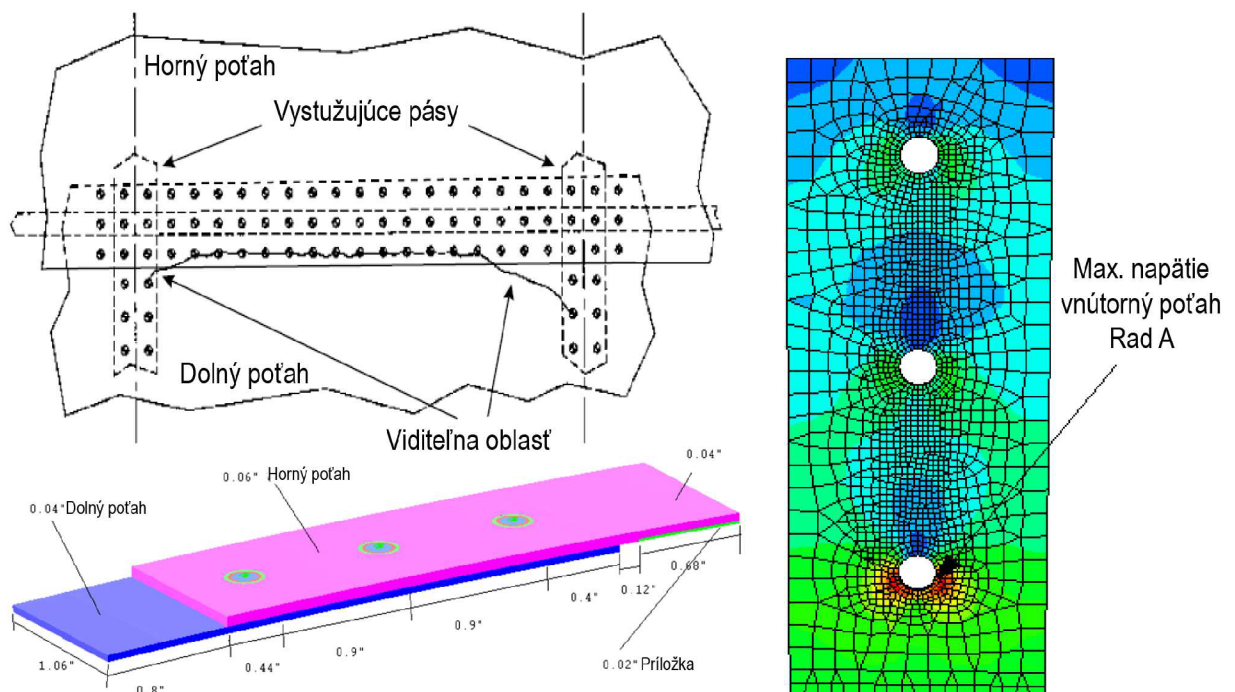
Obr. 3.19 a) Schéma geometrie MKP modelu, b) Schéma únavovej vzorky^[37]

Pri explicitnom MKP modeli boli plechy skúmaného spoja vyrobené z hliníkovej zliatiny 2024-T3 o hrúbkach $1,5\text{ mm}$ a 1 mm . Nít so zápusťou hlavou a priemerom $3,9\text{ mm}$ bol zo zliatiny 2117-T4. Tmel bol modelovaný ako nelineárny hyperelastický materiál (Obr. 3.20).



Obr. 3.20 Závislosti napätia na deformácii pre model hyperelastického materiálu [37]

Výsledky simulácií spoja bez lepidla Artre verifikoval podľa experimentov a modelov publikovaných Li-om [20], Markiewiczom [21] a Langrandom [22]. Následne vytvoril trojradový jedno strižný model spoja ako ekvivalent typického poťahového panelu (Obr. 3.21), ktorý zaťažoval spojitým tlakovým zaťažením po celej vnútornej ploche spoja (simulácia pretlakovania kabíny). Na tomto modeli vyhodnocoval vplyv veľkosti uzatvárackej hlavy, tmelu a trenia na napätový stav na kritickom otvore. Výsledky z týchto analýz použil pri výpočte rastu trhlin, ktorý previedol pomocou Smith – Watson – Topperovho modelu a programu AFGROW. Prehľad výsledkov analýz trojradového modelu je uvedený v Tab. 3.1.



Obr. 3.21 Trojradový jedno strižný model nitového spoja [37]

Tab. 3.1 Porovnanie rôznych parametrov nitového spoja z hľadiska max. napätia a iniciácie trhliny

Parameter	Max. napätie v kritickom rade A na dolnom poťahu (MPa)	Počet cyklov do náraste trhliny na dĺžku 1,27mm
Základný model	296	76361
Vysoká uzatváracia hlava	337	41548
Nízka uzatváracia hlava	303	66361
Tmel	310	60761
Tmel a vysoká uzatváracia hlava	330	44761
Tmel, vysoká uzatváracia hlava a otrep po vŕtaní	337	41548
Vplyv trenia	289	90761

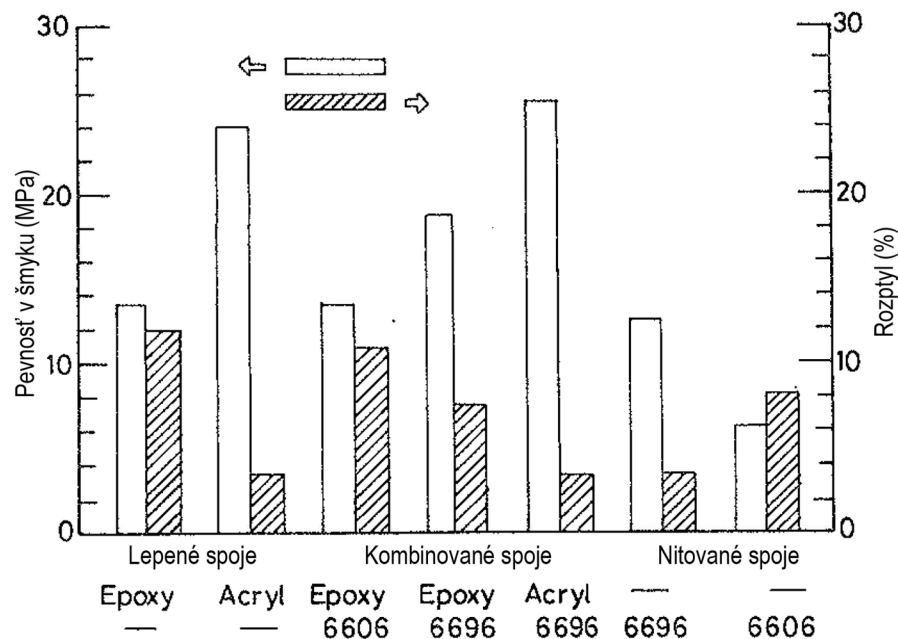
Artre konštatuje, že prítomnosť tmelu zvyšuje reziduálne ťahové napätia v porovnaní s čisto nitovanými spojami. A, že tento efekt by v prípade správne zanitovaného spoja nemal mať významný vplyv na únavové poškodenie. Avšak v kombinácii s nedostatočnou (tzn. vysokou) alebo šikmou uzatváracou hlavou, po prípade pri výskyte otrepov od vŕtania, by mohli mať spoje s tmelom vyššiu náchylnosť na vznik trhlín na rozhraní nitu a poťahu.

Liu a Sawa^[15] analyticky a experimentálne testovali jedno strižný lepený spoj skombinovaný s nitmi vystavený pôsobeniu ohybového momentu. Adherendy boli z ocelevej zliatiny SS400JIS (šírka 25 mm, preplátovanie 25 mm, hrúbky 1,6; 3 a 6 mm). Použili epoxidové lepidlo a spoj bol zostavený pomocou trňových nitov typu NSA (hliník A5154JIS). Pre porovnanie pevnosti a spôsobu poškodenia bol kombinovaný spoj porovnávaný s čisto lepeným a nitovaným spojom. Kombinované a nitované spoje boli vyrobené v dvoch variantoch: s jedným nitom uprostred, resp. s dvoma nitmi umiestnenými v blízkosti okraja preplátovania. Skúmaný bol pomer tuhostí nitov a adherendov na pevnosť kombinovaného spoja a vplyv počiatocnej príťažlivej sily vyvinutej pri procese nitovania na rozloženie napätia na rozhraní medzi adherendmi a lepidlom. Experimenty boli prevedené štvorbodovým ohybom a boli porovnávané s MKP modelmi vytvorenými v programe MARC. Autori konštatujú, že so zvyšujúcim sa pomerom modulov pružností nitov a adherendov vzrastá pevnosť kombinovaného spoja. Ďalším záverom je, že trňové nity významne zvyšujú ohybovú pevnosť lepeného spoja najmä u adherendov s väčšími hrúbkami.

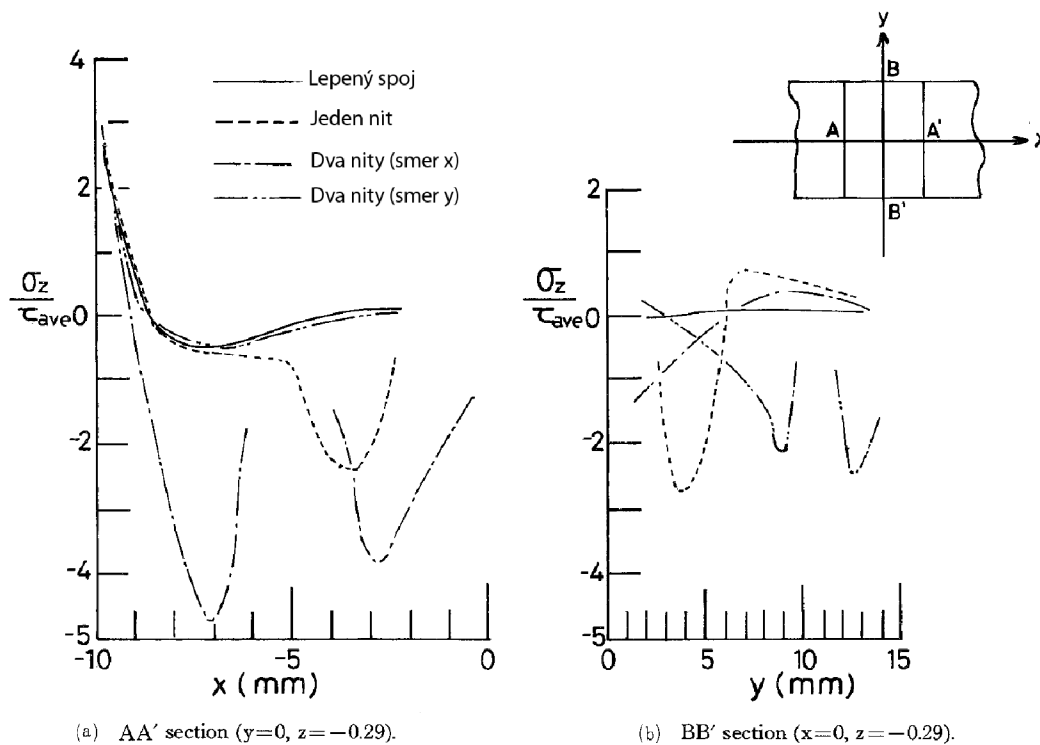
Imanaka^[38] v prvej časti svojho výskumu zameraného na LNS vyhodnocuje pevnosť v šmyku lepených a nitovaných spojov a porovnáva ju s pevnosťou kombinovaných lepeno - nitovaných spojov pri ťahovej skúške. Pri experimentoch použil dva druhy lepidiel (epoxid DP 190, akryl C355) a dva druhy trňových nitov (RV 6696-84, RV6606-84). Spájané plechy boli z ocele SUS304, každý o hrúbke 2 mm. Vzorky boli jedno strižné s jedným nitom, široké 25mm, s dĺžkou preplátovania 25 mm, pri celkovej dĺžke 175 mm. Konštatuje, že so zvyšujúcim sa pomerom pevnosti nitu k pevnosti lepidla sa pevnosť kombinovaného spoja zvyšuje najvýraznejšie (Obr. 3.22).

Pri nasledujúcich experimentoch^[5, 39] sa Imanaka zamerával na popis únavových vlastností lepeno – nitovaných spojov (viď. kapitola 3.5) a na analýzu rozloženia napätia na kombinovanom spoji pomocou MKP. Keďže bol tento výskum prevedený na konci rannej doby digitalizácie, rozhodli sa autori pre vytvorenie zjednodušeného elastického modelu, ktorý zanedbáva významné plastické správanie materiálu pri nitovaní, jeho výpovedná hodnota je tak nižšia. Nič menej autori na základe tohto MKP modelu zaznamenali negatívne tlakové napätie spôsobené utiahnutím ni-

tu u kombinovaného spoja (Obr. 3.23). Zistili tiež, že použitím nitov dochádza k zníženiu faktora intenzity napätia K_I vo vrstve lepidla.



Obr. 3.22 Porovnanie šmykovej pevnosti lepených, nitovaných a kombinovaných spojov^[38]



Obr. 3.23 Rozloženie napätia v rezoch lepeného a kombinovaného spoja pri ťahovom zaťažení^[39]

3.4 Vyhodnocovanie životnosti lepených spojov

U čisto nitovaných konštrukcií je kritickým faktorom cyklické únavové zaťaženie. Vplyvy okolitého prostredia na únavovú životnosť nitovaných spojov nie sú také významné ako je tomu u lepených spojov. Ak sa má lepidlo v LNS podieľať na prenose zaťaženia je priam nevyhnutné poznať jeho chovanie počas prevádzkového života. Lieng-Huan Lee^[8] vo svojej súbornej práci uvádza súhrn poznatkov o vyhodnocovaní životnosti lepených spojov.

Problémom lepenia je, že neexistuje univerzálna teória, ktorá by vysvetľovala vznik adhézneho spoja. Z toho vyplýva, že nie sme schopný priamo posúdiť kvalitu adhézie medzi adherendom a lepidlom^[8, 40] a sme odkázaný len na experimentálne získané poznatky. Tento fakt je ešte markantnejší pri odhadovaní dlhodobej životnosti lepeného spoja, ak ešte vezmeme v úvahu komplexnosť súbežného pôsobenia zaťaženia a vplyvov okolitého prostredia v prevádzkových podmienkach. Primárne životnosť lepeného spoja ovplyvňujú:

- *adherendy – lepidlo (modul pružnosti, koeficient tepelnej rozťažnosti)*
- *povrchová úprava adherendov*
- *proces vytvrdzovania lepidla (teplota, tlak)*

Sekundárne závisí životnosť lepeného spoja na:

- *veľkosti a dobe cyklického zaťažovania*
- *prostredí – druhu atmosféry v ktorej je lietadlo prevádzkované (teplota, vlhkosť, agresivita)*

Výskumy a experimenty ukazujú, že čím vyššia je zmáčavosť lepidla pri kontakte s povrchom adherendov, tým dokonalejšia a kvalitnejšia bude adhézie, ktorá medzi nimi vznikne, čo má priamy vplyv i na životnosť spoja. Zmáčavosť ovplyvňuje viskozita lepidla (teplota vytvrdzovania) a povrchová úprava adherendov. Najmä posudzovanie prínosov rozličných úprav povrchov je komplikované, pretože i spoj s horšou úpravou povrchu môže mať dobré mechanické vlastnosti a vykazovať kohézny typ poruchy, ak nebol vystavený pôsobeniu nejakej agresívnej atmosféry. *Tabuľka 3.2* uvádza vplyvy niekoľkých vyššie uvedených parametrov na životnosť lepeného spoja v podmienkach prímorskej atmosféry.

Tab. 3.2 Vplyvy rôznych faktorov na životnosť spoja (adherendy – Al zliatina)^[8]

Povrchová úprava	Lepidlo	Teplota vytvrdzovania	Životnosť spoja (dni)
odmastenie v pare rozpúšťadla	dvojsložkový epoxid	izbová	70 – 80
odmastenie v pare rozpúšťadla	jednosložkový epoxid	zvýšená	71 – 270
piklovanie*	dvojsložkový epoxid	izbová	270 – 760
piklovanie*	jednosložkový epoxid	zvýšená	760 – 1440
chromátovanie (Alodine1200)	dvojsložkový epoxid	izbová	1140 – 1150
chromátovanie (Alodine1200)	jednosložkový epoxid	zvýšená	2920

* *morenie v kyselíne chrómsírovej*

Ak teda chceme spoľahlivo odhadnúť životnosť lepeného spoja mali by sme poznať jeho správanie pri tých najnepriaznivejších prevádzkových podmienkach. Nižšie sú uvedené niektoré z používaných prostredí prípadne cyklov, ktoré majú simulovať prevádzkové podmienky^[41]:

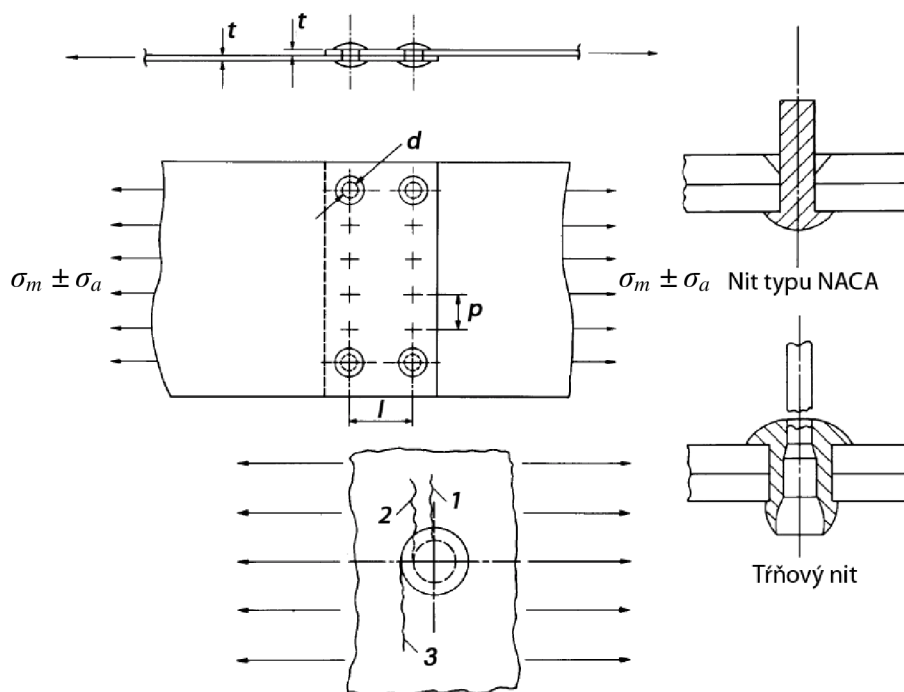
- *pôsobenie teploty (statické, cyklické v oblasti vyšších i nižších teplôt)*
- *úplné ponorenie vo vode (sladká, slaná)*
- *pôsobenie prevádzkových kvapalín (palivo, hydraulika)*
- *zmeny vlhkosti (rôzne hmly)*
- *cyklus vlhka – mrazu – roztopenia*

- pôsobenie prirodzenej atmosféry (industriálna, prímorská, tropická, púštna)
- simultánne pôsobenie zaťaženia a testovacieho prostredia

Nevýhodou lepenia je, že kvalita spoja závisí na mnohých faktoroch, preto je nutné testovať zvlášť každú odlišnú kombináciu adherend/lepidlo/povrchová úprava/teplota vytvrdzovania vo zvolenom prostredí a pri zodpovedajúcom zaťažení.

3.5 Skúšky únavových vlastností LNS

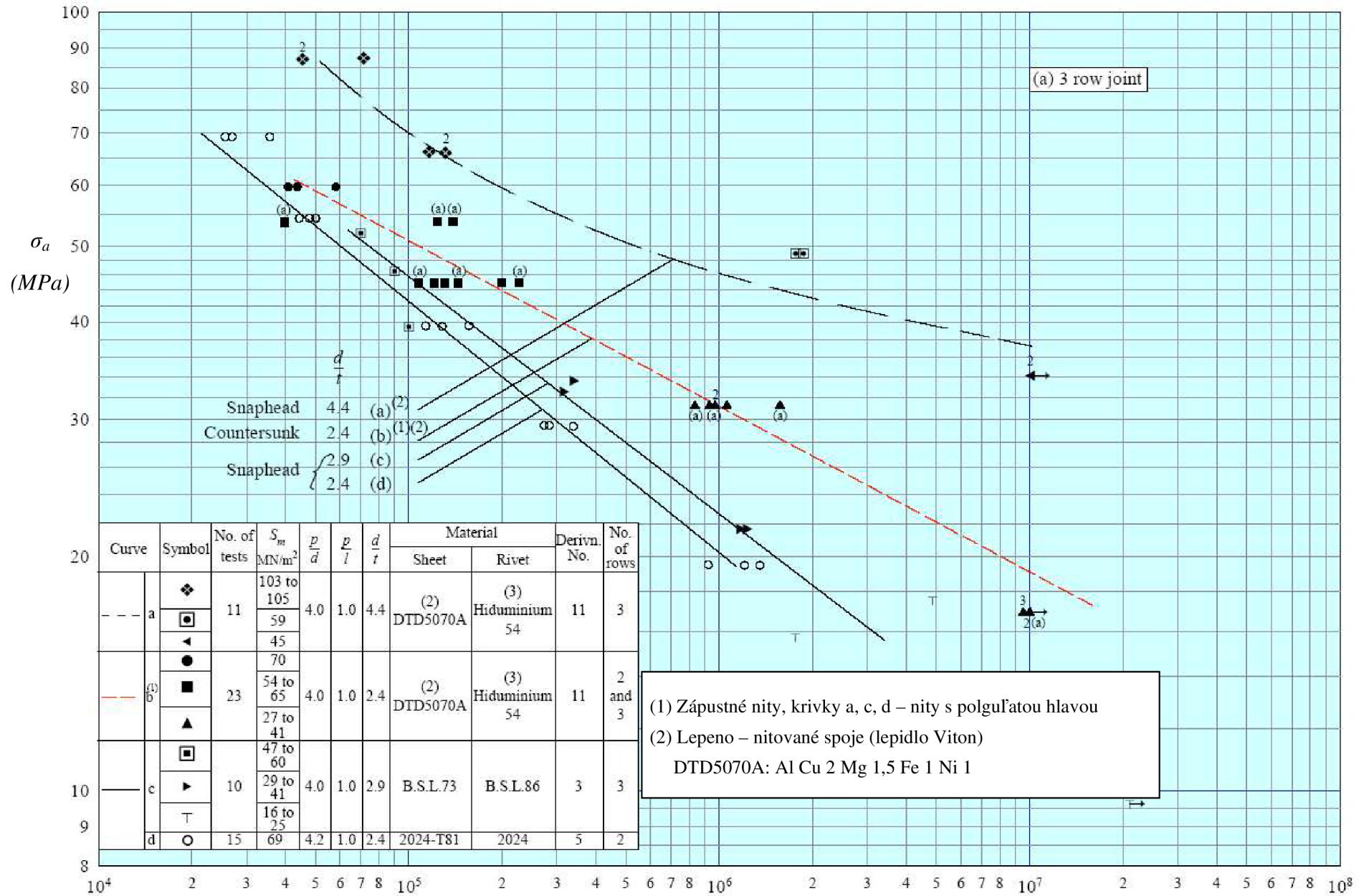
V rámci ESDU boli prevedené rozsiahle únavové skúšky nitovaných vzoriek [3, 4]. Išlo o jednoduché preplátované vzorky s dvomi alebo tromi radmi nitov (Obr. 3.24). Plechy boli zo zliatin $Al - Cu$ resp. $Al - Zn$. Nity boli buď s polguľatou (snaphead), zápustnou hlavou (countersunk) alebo trňové. Na Obr. 3.24 sú znázornené najčastejšie miesta iniciácie trhlín. Na základe prevedených testov určili približne optimálne geometrické charakteristiky ($d/t = 3$, $p/l = 0,8$, $p/d = 3$ až 4) z hľadiska únavového zaťaženia pre spoje s dvomi alebo tromi radmi nitov.



Obr. 3.24 Schéma vzoriek ESDU, miesta vzniku trhlín [3]

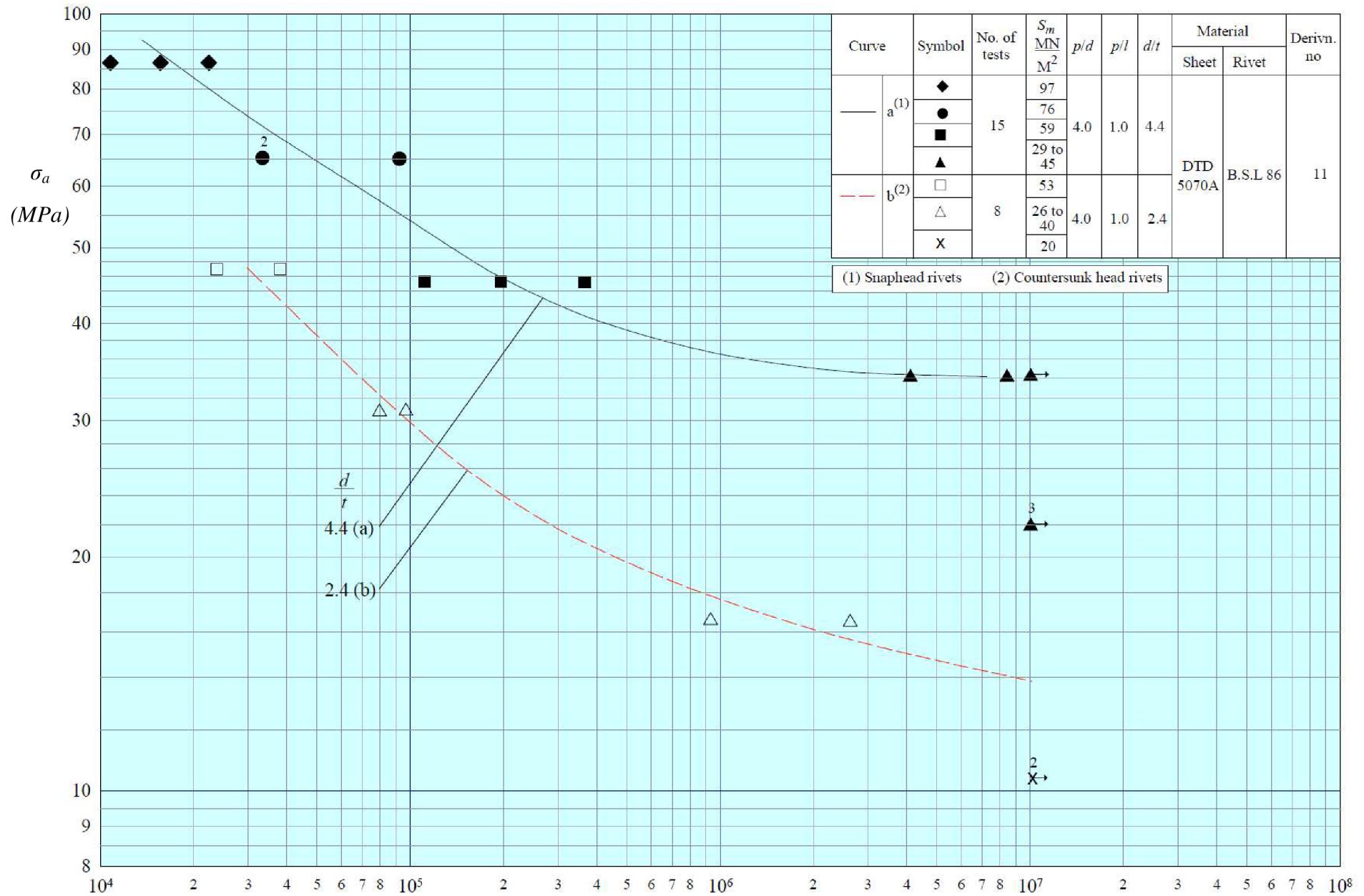
Skúšky sa vyhodnocovali pomocou S/N kriviek. S/N krivky čisto nitovaných vzoriek c , d (plné nity s poglobatou hlavou) a lepeno – nitovaných vzoriek a , b (čiarkované čiary) sú znázornené na obr. 3.25. U oboch typov lepeno – nitovaných vzoriek bolo použité lepidlo Viton (hermetik). Vzorky typu a boli znitované plnými nitmi s poglobatou hlavou, vzorky typu b zápustnými nitmi (82°). Materiály plechov všetkých štyroch vzoriek mali rovnaké únavové charakteristiky, z čoho môžeme usudzovať, že nárast únavovej životnosti bol u lepeno – nitovaných vzoriek spôsobený použitím lepidla.

Spoje s trňovými nitmi neboli priamo porovnávané s ich ekvivalentmi pri kombinácii s lepidlom. Na kombinovaných spojoch boli použité trňové nity s poglobatou a zápustnou hlavou (snaphead, countersunk), ktoré boli zostavené podobne ako v predchádzajúcom prípade cez lepidlo Viton. Spoje s poglobatou hlavou mali najdlhšiu únavovú životnosť ale nie sú priamo porovnateľné s inými typmi spoja kvôli inému pomeru d/t (Obr. 3.26).



(1) Zápustné nity, krivky a, c, d – nity s polgulfatou hlavou
 (2) Lepeno – nitované spoje (lepidlo Viton)
 DTD5070A: Al Cu 2 Mg 1,5 Fe 1 Ni 1

Obr. 3.25 S/N krivky kombinovaných spojov: plné nity s polgulfatou a zápustnou hlavou (lepidlo Viton) ^[3] log N

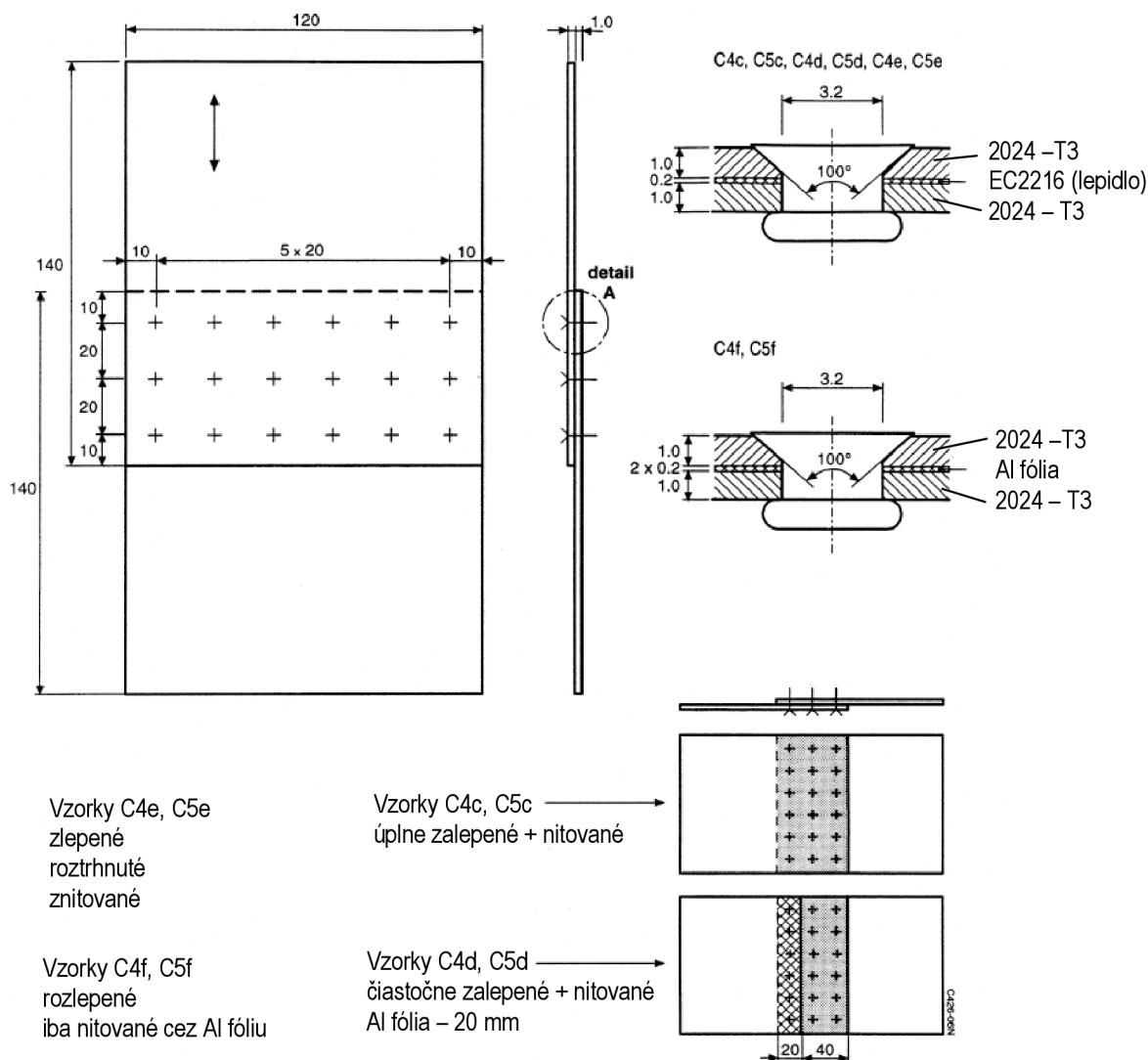


Obr. 3.26 S/N krivky kombinovaných spojov: trňové nity s pologulatou a zápusťou hlavou (lepidlo Viton)^[3] $\log N$

Zaujímavé závery z oblastí dynamických vlastnosti LNS poskytuje i výskum, ktorý v kooperácii s FAA (USA) vykonala NLR (Holandsko) [42]. Skúšané vzorky reprezentovali preplácané spoje trupu civilného dopravného lietadla s pretlakovou kabínou, na ktorých boli počas prevádzky objavené trhliny. Skúmané boli dve konfigurácie spojov:

- nitované s presadením (nit – MS 20426 AD4, 3,2 mm)
- lepeno – nitované so zahĺbením (NAS 1097 AD4, 3,2 mm, lepené za studena – epoxid EC2216)

Testované vzorky mali tri šírky 120, 160 a 480 mm a boli zaťažované buď jednoosovo alebo dvojosovo (Obr. 3.27). Parametre zaťaženia: maximálne napätie 94 MPa, koeficient asymetrie cyklu $R = 0,1$ a frekvencia zaťažovania $f = 10$ Hz (jednoosovo), $f = 3$ Hz (dvojsovo).



Obr. 3.27 Príklad testovaných vzoriek (šírka 120 mm) [42]

Tento výskum sa taktiež zaoberal vyhodnocovaním vplyvov rôznej kvality lepenia na únavovú životnosť spojov. Preto boli lepeno – nitované vzorky vyrobené štyrmi odlišnými kvalitami lepenia:

- typ 1: úplne zalepené
- typ 2: čiastočne zalepené (simulácia výrobných chýb)
- typ 3: zlepené → roztrhnuté → znitované (vplyv starnutia a degradácie lepidla počas prevádzky)
- typ 4: rozlepené (iba nitované cez fóliu 0,2 mm)

V tabuľke 3.3 sú uvedené výsledky pre 120 mm vzorky.

Tab. 3.3 Výsledky únavových testov pre 120 mm vzorky^[42]

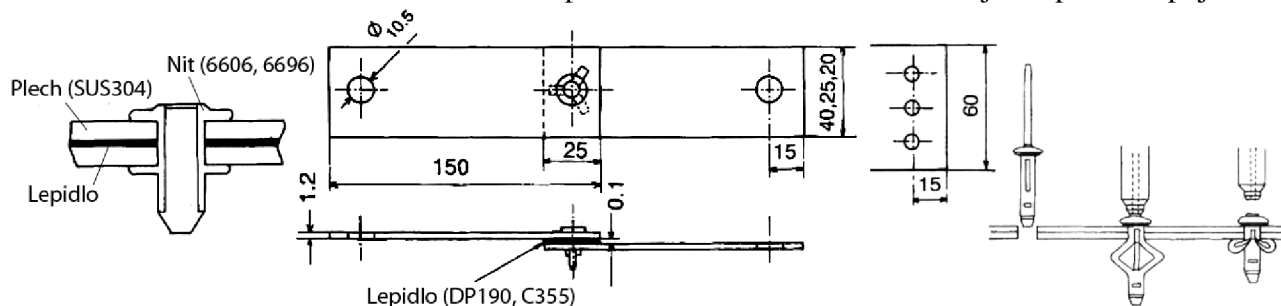
Vzorka	Zaťaženie	Prvá trhlina (10 ³ cykly)	Prvé spojenie trhlín (10 ³ cykly)	Roztrhnutie vzorky (10 ³ cykly)
C4c	jednoosové	-	-	500*
C5c	dvojsové	-	-	1000*
C4d	jednoosové	-	-	500*
C5d	dvojsové	-	-	500*
C4e	jednoosové	175	218	218
C5e	dvojsové	313	355	357
C4f	jednoosové	150	182	182
C5f	dvojsové	213	263	263

* test zastavený, žiadne trhliny

Z testov vyplynuli tieto závery:

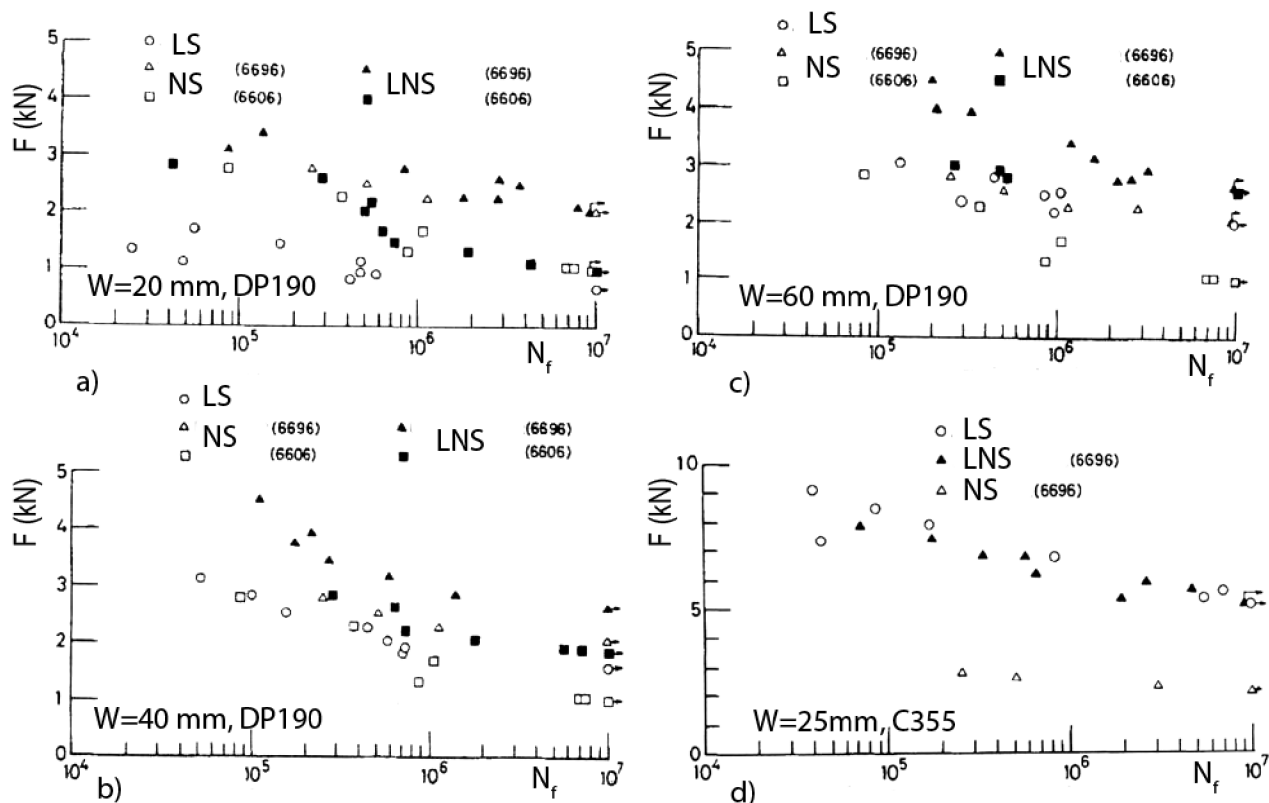
- U úplne a čiastočne zalepených vzoriek (typy 1, 2) nedošlo k porušeniu v priebehu 5.105 cyklov.
- Vzorky s degradovaným lepidlom (typ 3) vykazovali o 25 až 35 % vyššiu životnosť ako iba čisto nitované vzorky (typ 4).
- Životnosť menších vzoriek (120, 160 mm) bola približne o polovicu nižšia ako u 480 mm vzoriek
- Dvojsovo zaťažené vzorky mali významne vyššiu životnosť (35 až 75%).
- Počet cyklov do vytvorenia trhliny tvoril hlavnú časť z celkového počtu cyklov do poruchy. Interval od zaznamenania trhliny do poruchy vzorky tvoril maximálne 25 % z celkového počtu cyklov.

Imanaka^[5] uzatvára svoj výskum LNS sériou únavových skúšok, ktorej hlavnou náplňou je porovnanie vplyvu šírky preplátovaného spoja a porovnanie správania sa lepených, nitovaných a kombinovaných spojov z hľadiska iniciácie a šírenia trhlín pri cyklickom únavovom zaťažovaní. Schéma testovaných vzoriek je na Obr. 3.28. Základné parametre únavových skúšok: koeficient asymetrie cyklu $R = 0,1$ a frekvencia zaťažovania $f = 30 \text{ Hz}$. K posudzovaniu iniciácie, šírenia trhlín a zmien tuhosti boli na vzorkách nalepené tenzometre v blízkosti okrajov lepeného spoja.



Obr. 3.28 Schéma vzorky na únavové skúšky^[5]

Na Obr. 3.29 sú porovnávané závislosti zaťaženia na počte cyklov do poruchy pre LS, NS a LNS. Skúmaný je hlavne vplyv pevnosti lepidla na únavové vlastnosti kombinovaných lepeno – nitovaných spojov pomocou troch rôznych širok preplátovania (Obr. 3.29 a, b, c). K zlepšeniu vlastností LNS došlo u spojov so šírkou 40 a 60 mm. U 20 mm širokého spoja podobne ako u LNS v kombinácii s lepidlom C355 nedošlo vplyvom lepidla k výraznej zmene únavových vlastností.



Obr. 3.29 Závislosti hladiny zaťaženia na počte cyklov do poruchy^[5]

Imanaka s kolegami zistili, že maximálne napätie vo vrstve lepidla sa blíži k únavovej pevnosti kombinovaného spoja. Ďalej, že únavová životnosť lepených spojov skombinovaných s nitmi sa zlepšuje najvýraznejšie vtedy, keď je medza únavy nitového spoja skoro rovnaká alebo o trochu vyššia než medza únavy čisto lepeného spoja. Jedným z pozorovaných javov bolo aj, že porucha lepeného spoja nastáva takmer okamžite po iniciácii únavovej trhliny. Zatiaľ, čo v prípade kombinovaných LNS dochádza k iniciácii trhliny v skorých fázach únavového života a šírenie trhliny je postupné.

3.6 Vplyvy prostredia na LNS

Jedným z ďalších výskumov zaoberajúcich sa dynamickými vlastnosťami LNS je výskum vplyvu starnutia na vlastnosti LNS, ktorý prebehol na Leteckom ústave (Klement^[13]). Išlo o rozsiahle klimatotechnologické testy, pri ktorých boli pôsobeniu rôznych prostredí vystavené dva druhy vzoriek. Jedny určené na šmykové testy, druhé (lepené) na testy v odlupovaní. Oba typy vzoriek boli vyrobené z Al zliatiny 2024-T4. Povrch plechov (lepená strana) bol eloxovaný (ELOX6) a natretý syntetickou farbou 2003/0660. Vzorky určené na šmykové testy boli zlepené lepidlom PU – 50 a znitované dvomi trňovými nitmi 3,2 mm (AGS 717402). Šírka vzorku bola 60 mm, dĺžka preplátovania 40 mm a hrúbka jedného plechu 0,8 mm. V tabuľke 3.4 sú uvedené parametre skúšok a výsledky pre tieto vzorky.

Tab. 3.4 Vplyvy prostredia na šmykové vlastnosti LNS ^[13]

Prostredie	Teplota (°C)	Čas (dni)	Pevnosť v šmyku		Tuhosť spoja	
			(MPa)	%*	(kN/mm)	%*
Bez vplyvu	-	-	4,11	-	23,7	-
Relatívna vlhkosť 95 – 100 %	70 ± 3	10/20/30	4,2/4,3/3,8	1/4/-9	18,8/19,4/16,2	-20/-18/-32
Slaná hmľa	35 ± 2	30/60	3,87/3,75	-6/-9	15,9/17	-33/-28
Letecká hydraulická kvapalina	70 ± 3	15/30	4,18/4,04	2/-2	17,5/17,1	-26/-28
Tepelné cykly	-20 / 50	100 cyklov	4,02	-2	15,7	-34
		200 cyklov	4,07	-1	14,8	-37
		400 cyklov	4,25	3	15,5	-35
		600 cyklov	3,8	-8	14,6	-38
Natural 95	+40	30/60	4,05/4,09	2/0,5	19,7/19,7	-17/-17

*rozdiel voči vzorkám, ktoré neboli vystavené žiadnym vplyvom

Vzorky i skúšky odlupovania boli prevedené podľa normy EN 2243-2. Šírka vzorky 25 mm, dĺžka lepeného spoja 200 mm, lepidlo PU – 50. Vzorky boli vystavené pôsobeniu relatívnej vlhkosti a slanej hmle (Tab. 3.5).

 Tab. 3.5 Vplyvy prostredia na pevnosť v odlupovaní ^[13]

Prostredie	Teplota (°C)	Čas (dni)	Pevnosť v odlupovaní	
			(MPa)	%*
Bez vplyvu	-	-	6,2	-
Relatívna vlhkosť 95 – 100 %	70 ± 3	10/20/30	6,15/4,35/4,69	-1/-30/-24
Slaná hmľa	35 ± 2	30/60	5,49/5,59	-11/-10

*rozdiel voči vzorkám, ktoré neboli vystavené žiadnym vplyvom

Z tabuľky 3.4 je zrejmé, že najväčší vplyv na únosnosť spojov v šmyku malo v tomto prípade pôsobenie slanej hmly a tepelných cyklov. Výskum potvrdil významný vplyv prostredia na mechanické vlastnosti lepidla a následne i na vlastnosti LNS.

3.7 Prehľad a zhrnutie zistených skutočností

Väčšina výskumov zameraných na únavové skúšky resp. napätovo deformačné analýzy sa zaoberá nitovanými spojmi so zápusťou hlavou (plný nit). Ide o rozsiahle výskumy, koordinované prevažne FAA a NASA, zamerané hlavne na popis únavových javov ako „multiple site damage“ (MSD) alebo „widespread fatigue damage“ (WFD). Tieto výskumy sú využiteľné primárne u lietadiel s pretlakovými kabínami. Súčasťou mnohých výskumov z tejto oblasti boli experimentálne merania slúžiace na popis zvyškového napätia v okolí nitu pri a po procese nitovania a merania rozloženia napätia pri zaťažovaní nitovaných spojov. K technikám, ktoré boli najčastejšie u týchto meraní používané patria tenzometrické merania, fotoelastické merania, röntgenové merania a infračervený systém SPATE. Skoro bez výnimky boli vždy detailné napätové stavy posudzované validovanými MKP analýzami.

Potvrďuje sa, že kvalita prevedenia nitového spoja má zásadný vplyv na únavovú životnosť u plných nitov najmä v prípade variácií tvaru a veľkosti uzatváracej hlavy. Tento problém prakticky

u trňových nitov neexistuje, pretože veľkosť maximálnej nitovacej sily je konštantná a závisí len na sile pretrhnutia trňa, ktorá sa vyznačuje veľmi malým rozptylom.

Autori, ktorí sa venovali skúmaniu spojov vytvorených pomocou trňových nitov, používali nity s veľkými priermi (Kelly ^[28], Cebulsky ^[29]) a plechy väčších hrúbok. Imanaka ^[5], ktorý ako jeden z mála riešil i kombináciu lepenia a nitovania trňovými nitmi, skúmal únavové vlastnosti a analyzoval distribúciu zaťaženia v týchto spojoch. Avšak jeho výskum sa výhradne venoval štúdiu oceľových trňových nitov a ich kombinácii s konštrukčnými vysoko pevnými lepidlami. Pričom bol zameraný skôr na lepené spoje, u ktorých sa zisťovali prínosy pri ich kombinácii s oceľovými trňovými nitmi. Tieto typy NS a LNS nie sú najvhodnejšie pre letecké aplikácie, najmä ak sa jedná o lietadlá s nižšou vzletovou a pristávacou hmotnosťou. Únavové vlastnosti nitových spojov (trňové nity: pologuľatá, zapustená hlava) v kombinácii s tmelom Viton boli popísané v práci vytvorenej v rámci ESDU ^[3], neboli však porovnané s čisto nitovanými spojmi, takže vplyv lepidla nebolo možné posúdiť.

Z prehľadu uvedeného v tejto kapitole vyplýva, že v súčasnosti ešte stále chýba podrobnejší popis únavových vlastností nitovaných a lepeno – nitovaných spojov vytvorených použitím trňových nitov. Zároveň nebola do súčasnosti uverejnená analýza, príp. experimenty, ktoré by popisovali napätovo deformačné stavy v takomto type spojov napr. so zameraním na popis vplyvu lepidla na špičky napätí v okolí otvorov pre nity. Oba tieto problémy sú riešené v nasledujúcich experimentálnych kapitolách. Kapitola 4 sa zaoberá napätovo – deformačnou analýzou NS a LNS a v kapitole 5 sú popísané únavové skúšky kombinovaných spojov s trňovými nitmi.

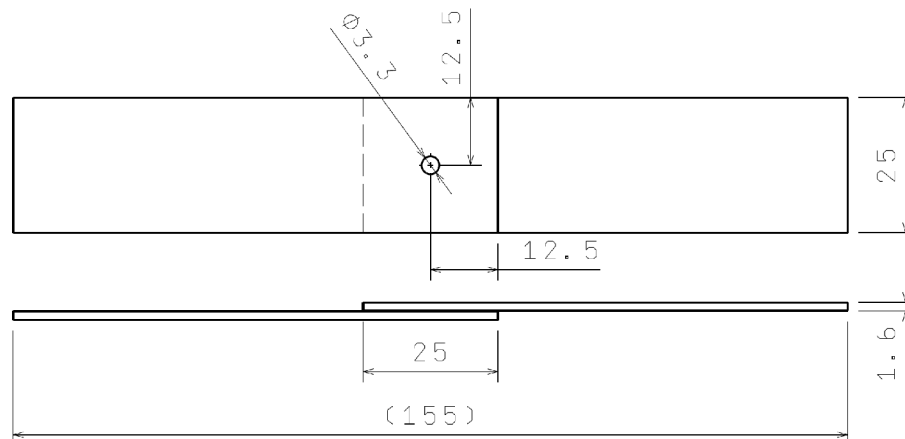
4 NAPAŤOVO – DEFORMAČNÁ ANALÝZA NS a LNS

Napät'ovo – deformačná analýza prebehla v dvoch krokoch. V prvom kroku sa na základe verifikovaného MKP modelu nitového spoja s trňovým nitom^[30] vytvoril model kombinovaného lepeno – nitovaného spoja. Tieto dva typy spojov sa následne analyzovali a vyhodnocoval sa vplyv lepidla. V druhom kroku napät'ovo deformačnej analýzy bolo pomocou fotogrametrického systému Aramis merané deformačné pole na NS a LNS vzorkách so siedmimi nitmi. Opäť sa vyhodnocoval vplyv lepidla na distribúciu zaťaženia a na napät'ové špičky v okolí otvorov pre nity.

4.1 Charakteristiky jednotlivých častí testovaných spojov

4.1.1 Geometria a materiál vzoriek

Pri MKP analýze a verifikačných statických skúškach bola použitá jedno strižná preplátovaná vzorka s jedným nitom (Obr. 4.1). Materiál spájaných plechov bol z Al zliatiny 424201.61 (Tab. 4.1). Fotogrametrická analýza bola vykonaná na spoji so siedmimi nitmi (Obr. 4.2). Jeho geometria je totožná s geometriou vzoriek použitých pri únavových skúškach (AAP, Tab. 5.1), rovnako ako materiál spájaných plechov D16 ČATV (Tab. 4.1).



Obr. 4.1 Geometria vzorky pre MKP analýzu

Tab. 4.1 Chemické zloženie a mechanické vlastností použitých materiálov

Chemické zloženie									
Obsah (%)	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Ni	Al
424201.61	3,8	0,4	0,4	0,7	0,7	0,3	-	0,1	zvyšok
	4,8	0,8	0,8						
D16 ČATV	3,8	1,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,05	zvyšok
	4,9	1,8	0,9						
Mechanické vlastnosti									
	Medza pevnosti R_m (MPa)		Medza klzu $R_{p0,2}$ (MPa)		Modul pružnosti E (MPa)		Ťažnosť A (%)		
424201.61	230		360		72000		14		
D16 ČATV	405		270		72000		13		

zníženie koncentrácie napätia v okolí otvorov pre nity. Vplyv lepidla EMFIMASTIC PU – 50 na únavové vlastnosti nitovaných spojov je predmetom výskumu v tejto práci.

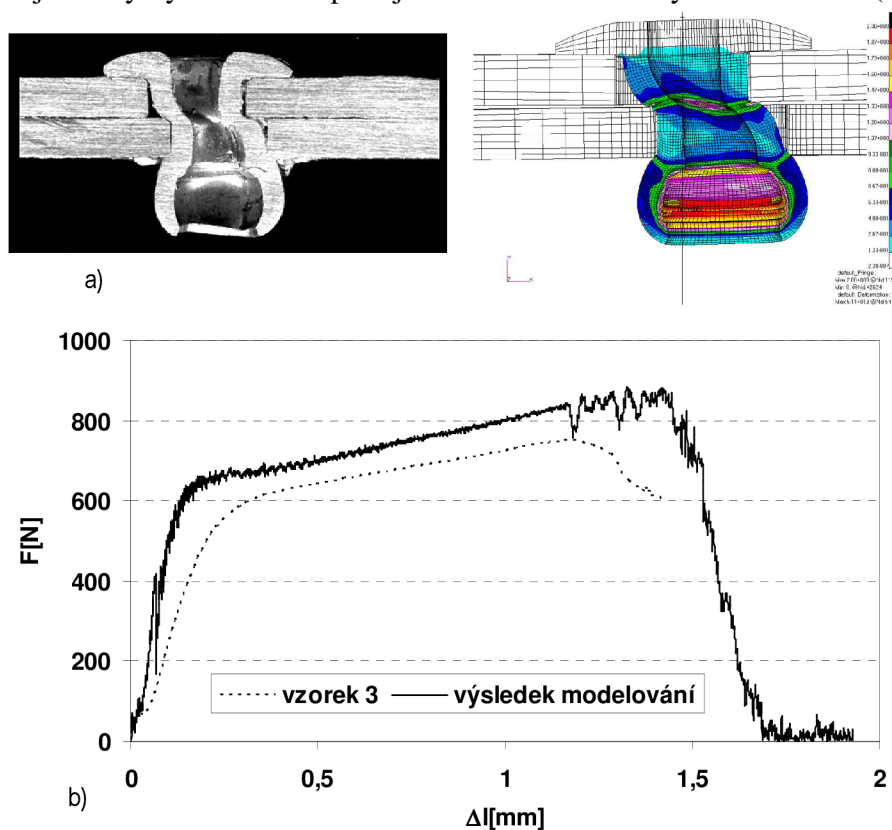
Tab. 4.2 Vlastnosti lepidla EMFIMASTIC PU – 50 ^[1]

Pevnosť v šmyku (MPa)	1,6
Modul pružnosti (MPa)	0,8
Predĺženie (%)*	80
Tvrdosť, Sh (A)*	50
Prevádzková teplota (°C)	-40 až 90
Viskozita	tixotropná pasta

* Tvrdosť – ISO 868. E – ISO 37. Predĺženie – ISO 8339

4.2 MKP analýza

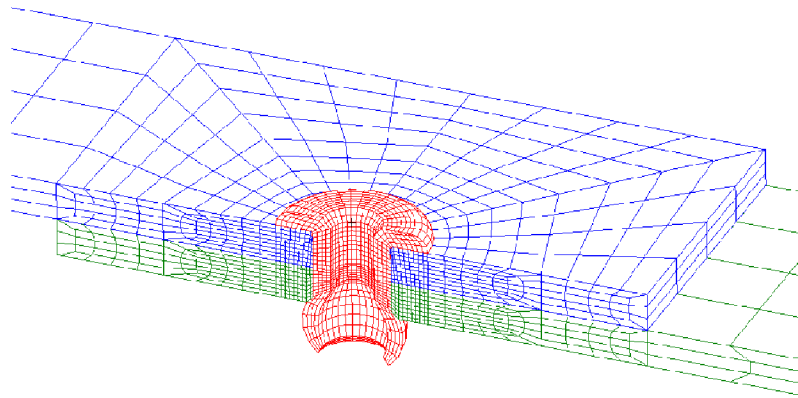
MKP analýza nitového spoja pri šmykovom zaťažení nadväzuje na výskum, ktorý bol prevedený kolegom Adamíkom ^[30]. Jeho analýza pozostávala zo série testov a vytvorenia MKP modelu v programe MSC Patran. Samotná MKP analýza tohto spoja bola riešená procesorom MSC Dytran. Simulácia ťahovej skúšky vykazovala uspokojivú zhodu s nameranými hodnotami (Obr. 4.4).



Obr. 4.4 Validačná napätovo deformačná analýza spoja s trňovým nitom pri šmykovom zaťažení: a) Porovnanie poškodenie nitu (skutočný stav vs. MKP model); b) Porovnanie závislosti sila – deformácia (skutočný test vs. MKP analýza) ^[30]

Na základe verifikovaných Adamíkových modelov trňových nitov bol vytvorený MKP model spoja s jedným nitom o priemere 3,2 mm (Obr. 4.5). Celková geometria spoja je na Obr. 4.1. Spoj bol modelovaný v preprocesore MSC Patran v polovičnom reze. Plechy a nit boli definované 3D prvkami HEX8. U nitového spoja boli medzi plechmi vytvorené kontakty pomocou 1D prvkov

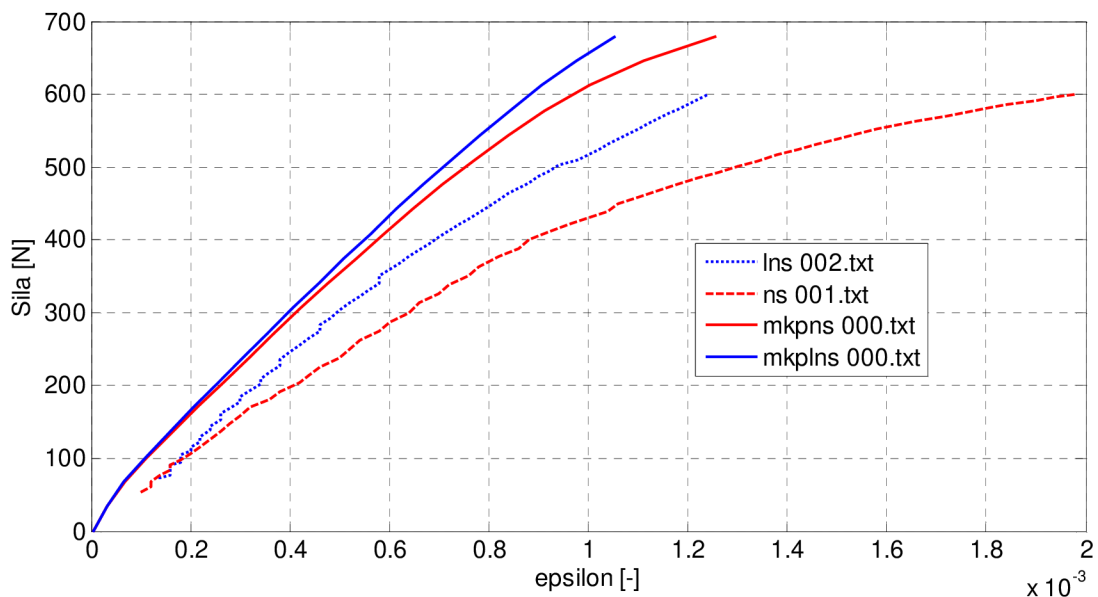
GAP. Vrstva lepidla o hrúbke $0,1\text{ mm}$ bola u kombinovaného spoja definovaná ako hyperelastický materiál na základe Mooney – Rivlinovho modelu prvkami MATHP.



Obr. 4.5 MKP model spoja s trňovým nitom (3,2 mm)

Proces MKP analýzy prebehol v troch krokoch. V prvom kroku bolo simulované osovú zaťaženie nitu od nitovacej sily. V druhom došlo k odľahčeniu nitu. Posledným krokom simulácie bolo zaťaženie takto vytvoreného spoja ťahovou silou $F = 680\text{ N}$. Zaťaženie prebiehalo nelineárne s päť percentným prírastkom sily. Výsledkom MKP analýzy bol popis tuhosti nitovaného a lepeno - nitovaného modelu spolu s popisom napätovo deformačných stavov v jednotlivých krokoch zaťažovania.

Nasledujúcou fázou tejto analýzy bolo porovnanie tuhostí MKP modelov nitovaného a lepeno – nitovaného spoja s experimentálne zmeranými tuhosťami zodpovedajúcich spojov pri ťahovom zaťažení. Ako je zrejmé z Obr. 4.6 oba MKP modely (NS, LNS) sa vyznačujú vyššou tuhosťou ako v prípade experimentálne meraných tuhostí vzoriek. Príčiny týchto rozdielov možno hľadať v nedokonalnej geometrii vzoriek, otvorov a nitov. Určité rezervy sú aj v definícií materiálových charakteristík modelovaných spojov. K spresneniu MKP analýzy by bolo nutné definovať modely s relevantnými imperfekciami, ktorými sa vyznačujú reálne vzorky.

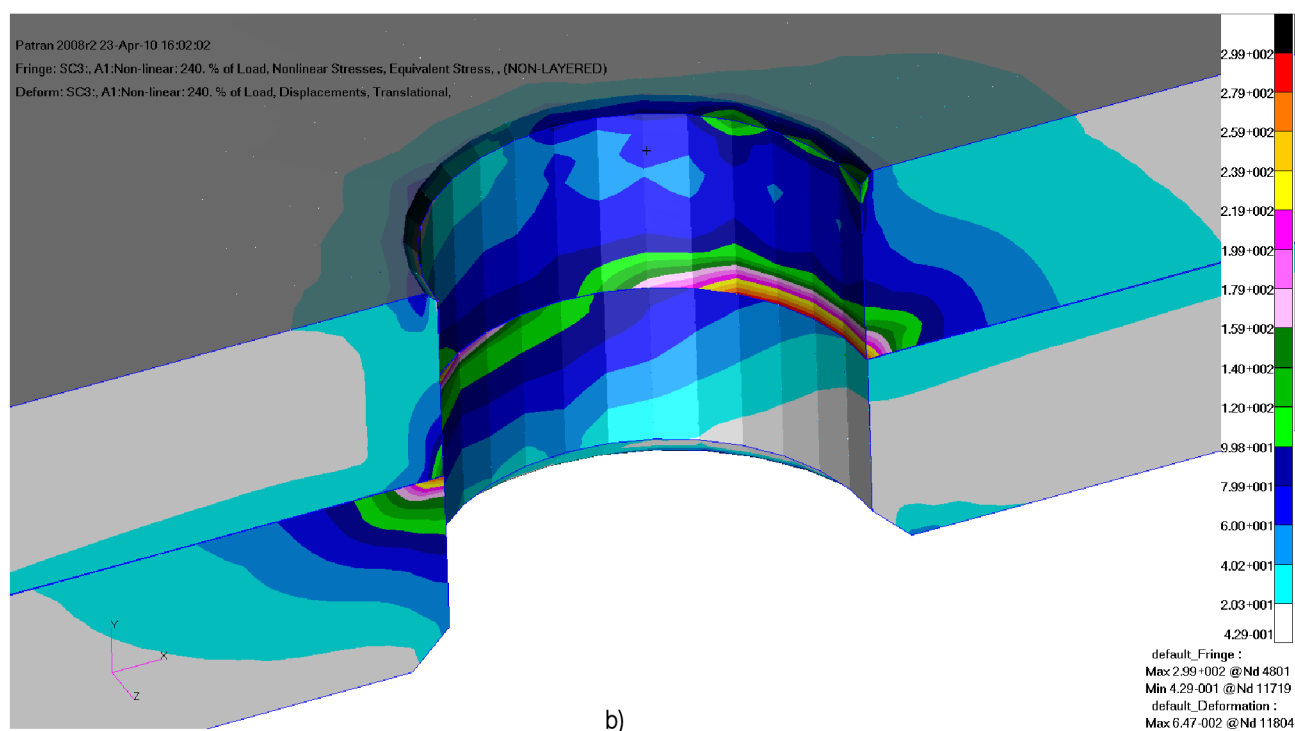
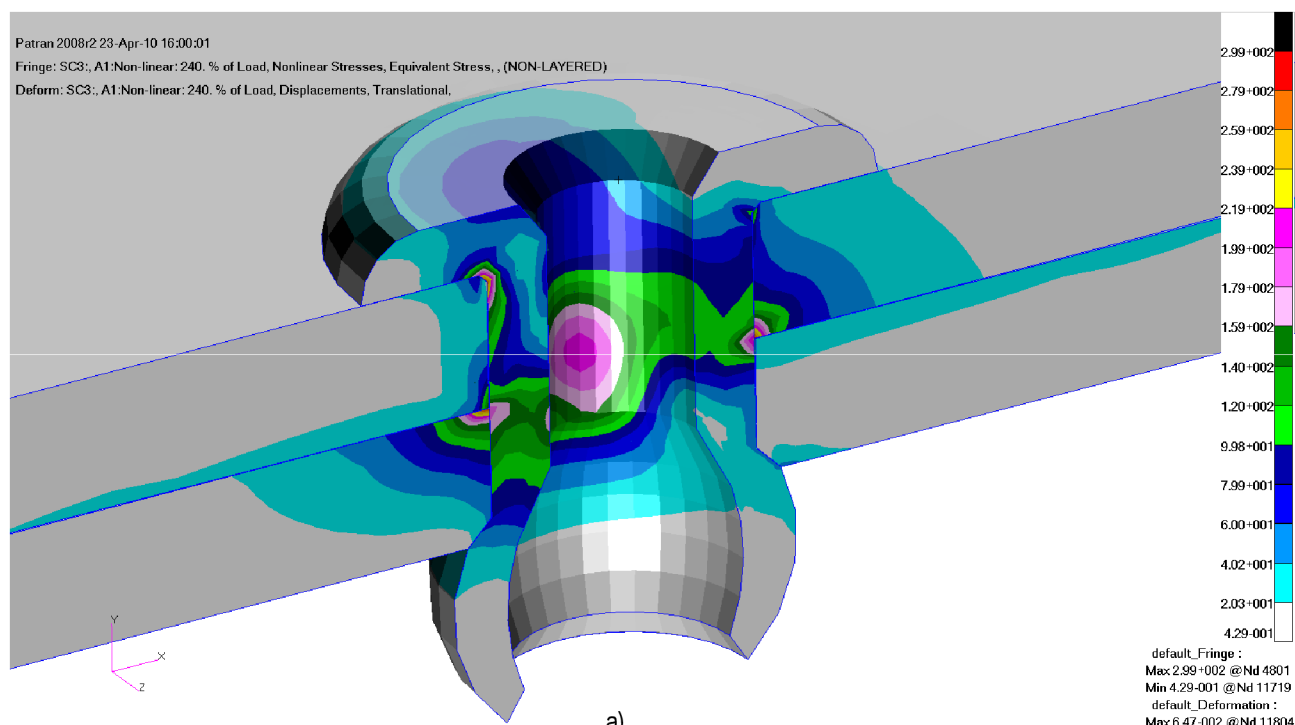


Obr. 4.6 Porovnanie tuhostí spojov zistených pomocou MKP simulácie a experimentov

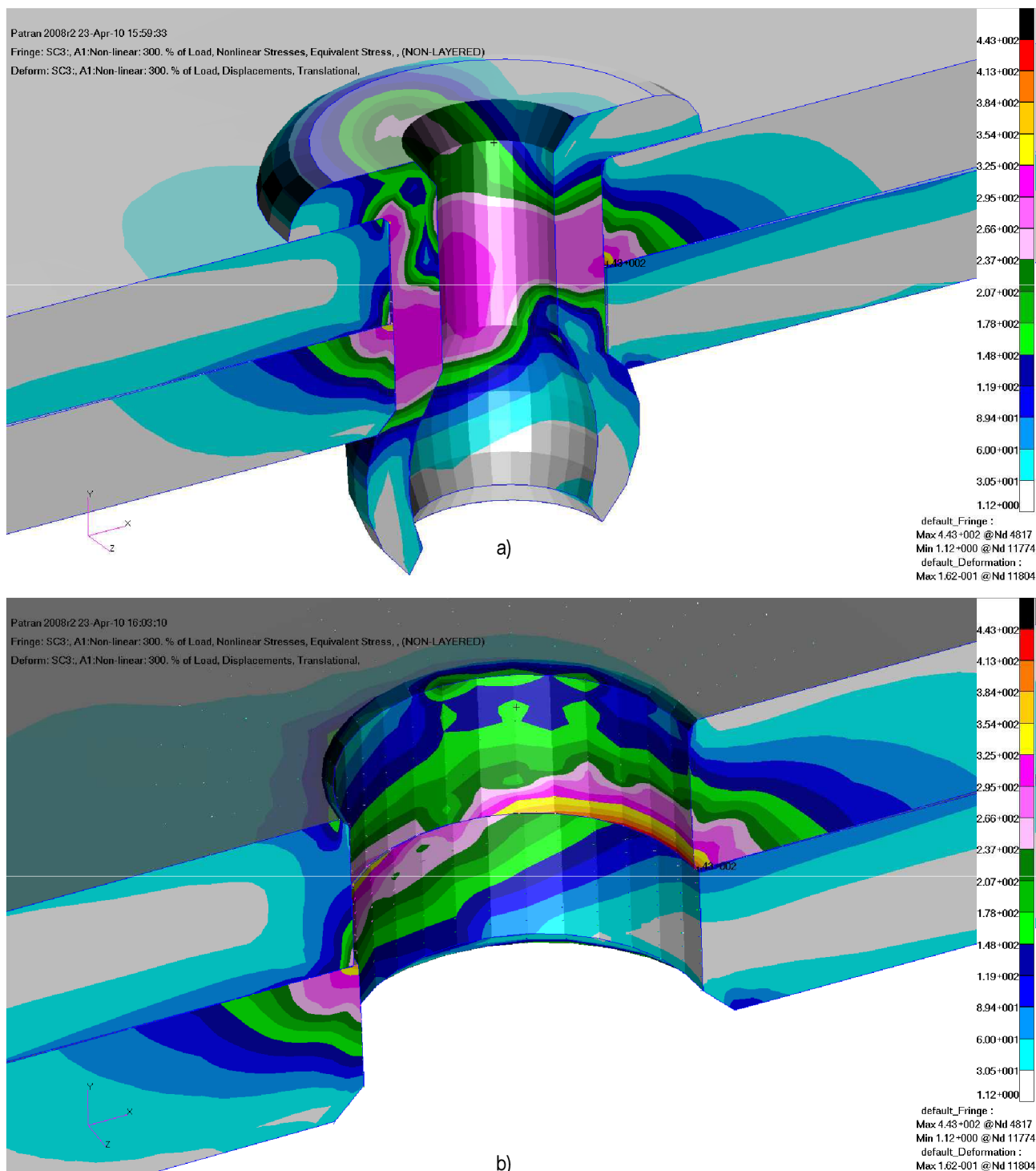
Väčší rozdiel je medzi tuhosťou MKP modelu a nameranou tuhosťou u nitového spoja. U lepeno - nitovaného spoja je zhoda lepšia, na čom mala pravdepodobne najväčšiu zásluhu vrstva

lepidla, ktorá zmenšila vplyvy nedokonalkej geometrie reálne testovaných spojov. Rozdiel medzi tuhosťami nitovaných a kombinovaných spojov je vyšší u nameraných hodnôt. Pričom rozdiely v tuhosti NS a LNS medzi MKP simuláciou a testami majú rovnaký trend. Z toho môžeme usudzovať, že i napäťovo deformačný stav zistený pri MKP simulácii bude mať obdobný charakter v porovnaní so skutočným napäťovým stavom na testovaných vzorkách.

Na nasledujúcich obrázkoch je zachytená distribúcia zaťaženie v nitovom a v kombinovanom lepeno – nitovanom spoji v polovičných pozdĺžnych rezoch. Ide o rozloženie ekvivalentného napätia pri zaťažení 272 N resp. 680 N.

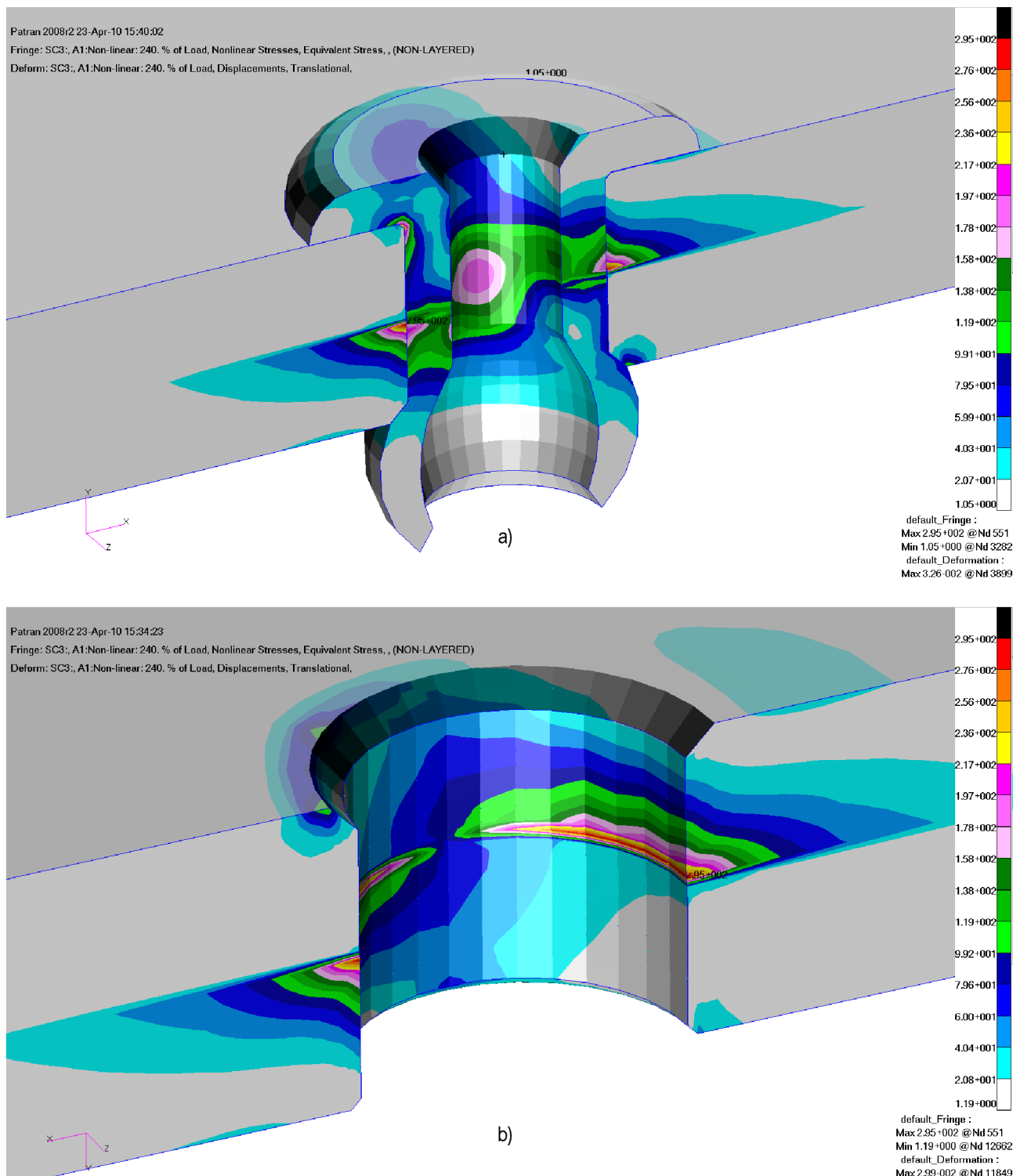


Obr. 4.7 Rozloženie napätia na nitovom spoji pri zaťažení 272 N



Obr. 4.8 Rozloženie napätia na nitovom spoji pri zaťažení 680 N

Pri šmykovom zaťažení spoja ťahovou silou o veľkosti 272 N (40% celkovej zaťažujúcej sily) bola na nitovom spoji zaznamenaná maximálna hodnota napätia vo výške 299 MPa (Obr. 4.7b). Maximálne napätie na nite bolo pri tomto zaťažení 219 MPa (Obr. 4.7a). U rovnako zaťaženého lepeno – nitovaného spoja bolo na otvore zaznamenané maximálne napätie 295 MPa (Obr. 4.9b) a na nite bolo napätie vo výške 217 MPa (Obr. 4.9a). Môžeme konštatovať, že na tejto hladine zaťaženia mala vrstva lepidla takmer zanedbateľný ale predsa pozitívny vplyv. Vypočítané špičky napätí na kombinovanom spoji (otvor i nit) boli o jedno percento nižšie ako v prípade špičiek napätí u nitovaného spoja.

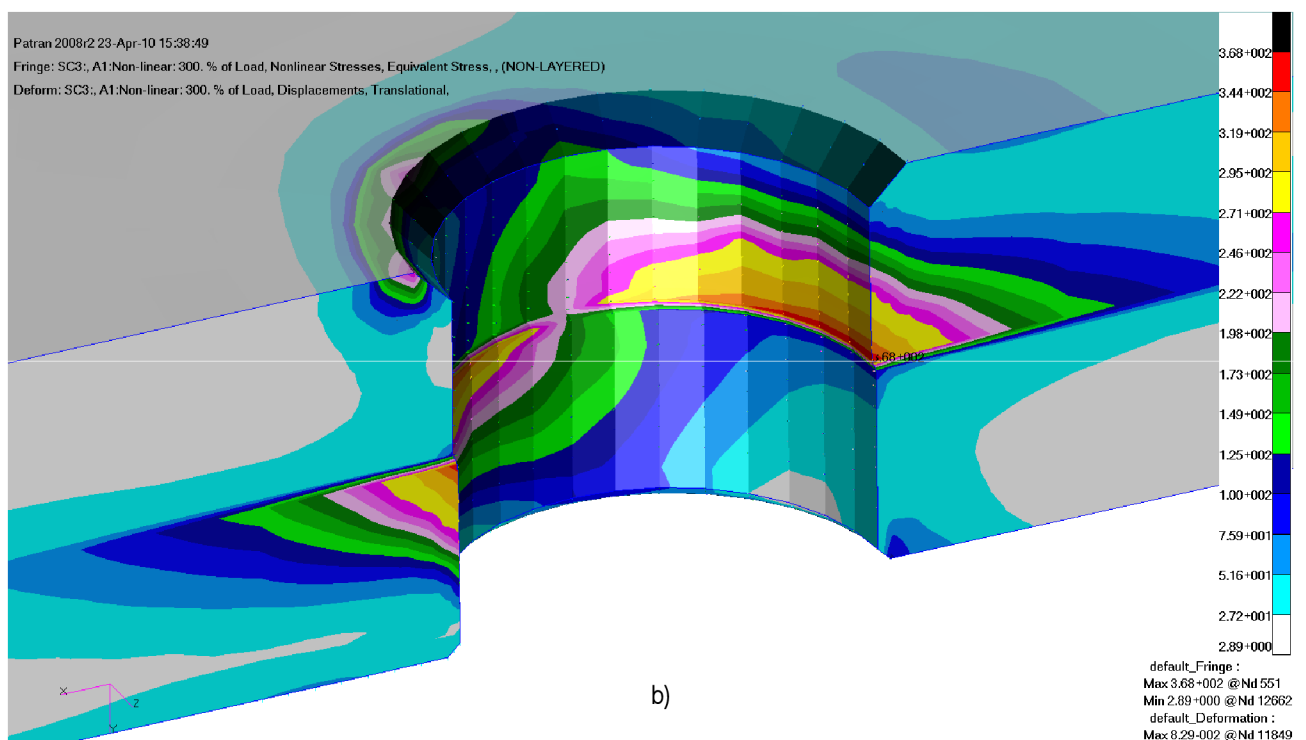
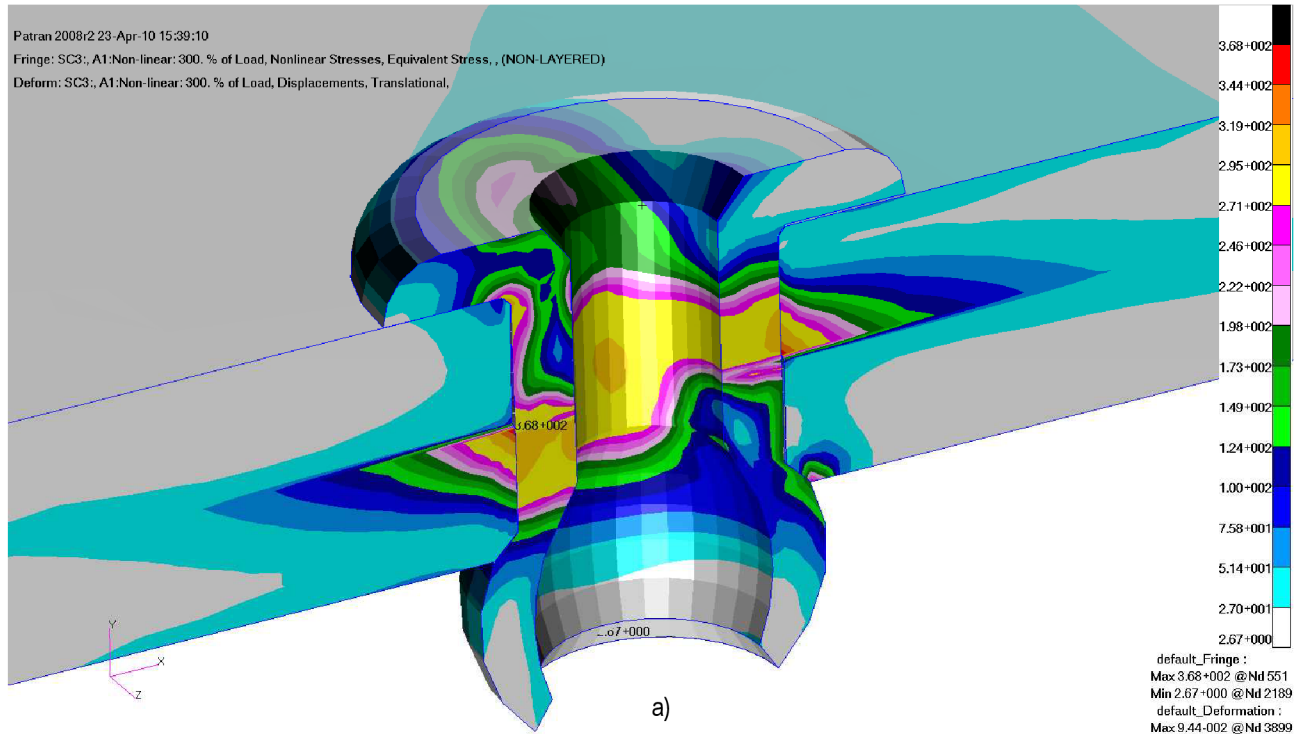


Obr. 4.9 Rozloženie napätia na lepeno – nitovanom spoji pri zaťažení 272 N

Pri zaťažení spoja silou 680 N bol rozdiel napät'ových špičiek vypočítaných pri MKP simuláciách nitového resp. kombinovaného spoja výraznejší. U nitovaného spoja bolo zaznamenané maximálne napätie na otvore vo výške 443 MPa (Obr. 4.8b). Na nite bolo pri tomto zaťažení maximálne napätie 325 MPa (Obr. 4.8a). U kombinovaného spoja bolo maximálne napätie na otvore 368 MPa (Obr. 4.10b) a na nite 319 MPa (Obr. 4.10a). Opäť ako v prípade nižšieho zaťaženia môžeme u LNS pozorovať mierne pozitívny vplyv na zaťaženie nitu, ktoré je zhruba o dve percentá nižšie ako u nitového spoja. Maximálne napätie zaznamenané na otvore lepeno –

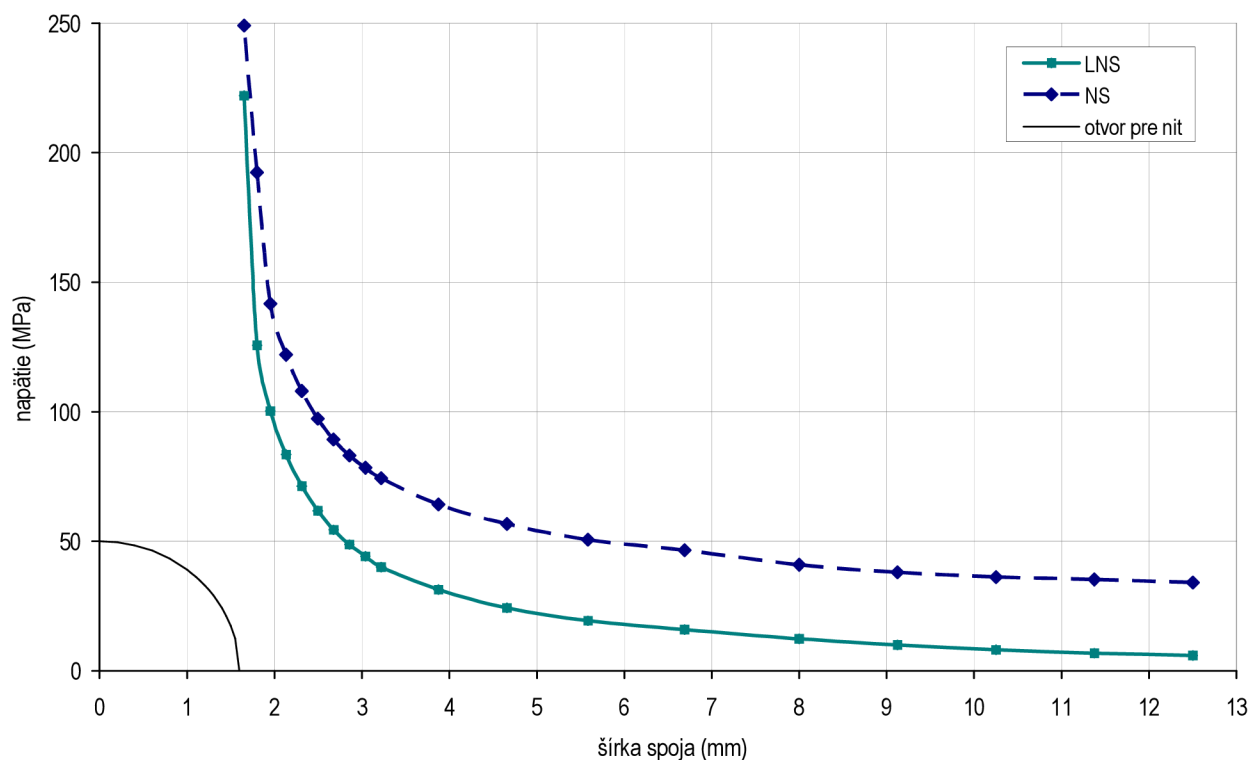
nitovaného spoja je však už výraznejšie nižšie (cca. o 17 %) ako u maximálneho napätia zaznamenaného na otvore nitového spoja.

Vypočítané napät'ové polia potvrdzujú predpoklad, že vrstva lepidla u kombinovaných spojov prispieva k rovnomernejšiemu zaťaženiu spoja a znižuje tak veľkosť napät'ových špičiek, ktoré vznikajú na otvoroch pre nity pri zaťažení spoja. Taktiež nebol pri simulácii zaznamenaný žiadny negatívny vplyv zvýšenia zaťaženia nitu od prídavného ohybového momentu v dôsledku väčšej vzdialenosti medzi nitmi (vrstva lepidla 0,1 mm).

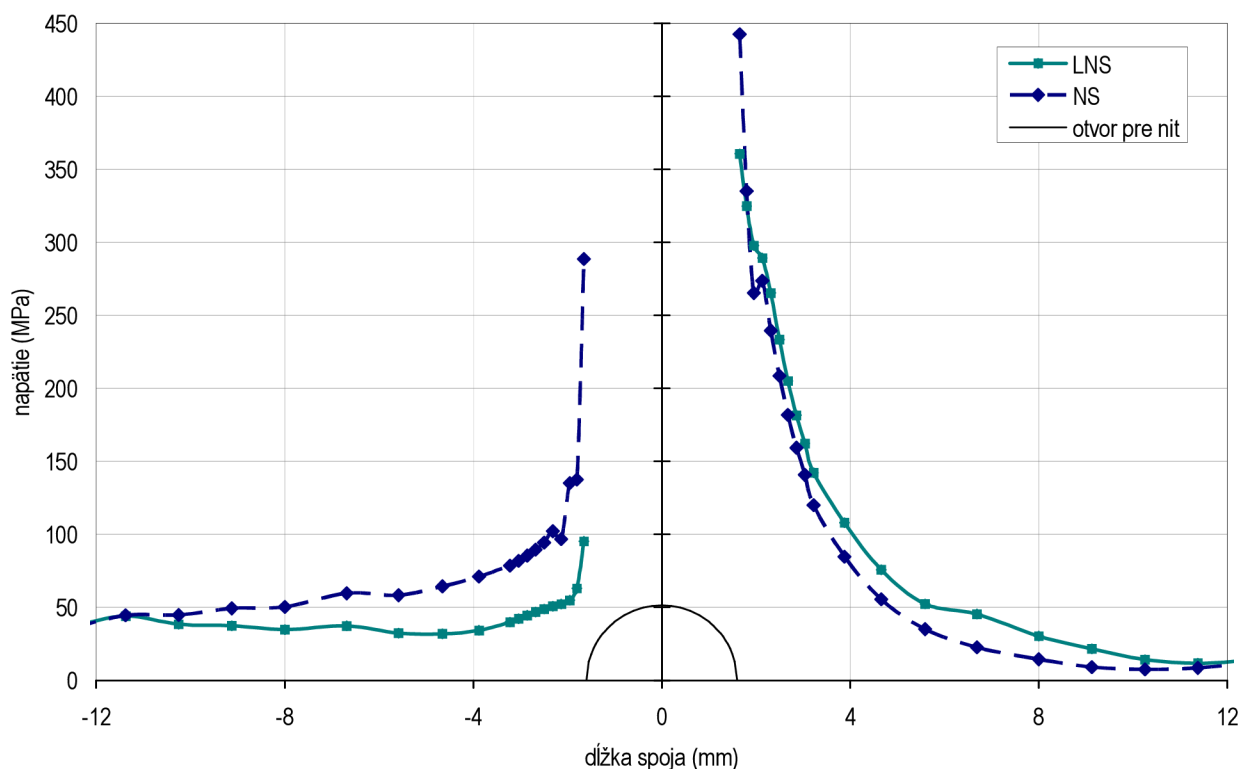


Obr. 4.10 Rozloženie napätia na lepeno – nitovanom spoji pri zaťažení 680 N

Gradienty napätí v priečnom reze (kolmom na zaťaženie) nitovaného a kombinovaného spoja sú pre kritickú vnútornú stranu horných spájaných plechov (kritickú z hľadiska iniciácie únavového poškodenia) vynesené na nižšie uvedených grafoch. Pre ilustráciu rozloženia napätia na týchto spojoch sú zobrazené i gradienty napätia v pozdĺžnych rezoch. Obe rozloženia napätí, naprieč i pozdĺž spojov sú zaznamenané pri sile 680 N.



Obr. 4.11 Gradienty napätia v priečnom reze spoja (rez je kolmý na zaťaženie)



Obr. 4.12 Gradienty napätia v pozdĺžnom reze spoja (rez je rovnobežný so zaťažením)

4.3 Optické meranie rozloženia deformácie

Hlavným cieľom tohto experimentu bolo popísať distribúciu zaťaženia v nitovaných a lepeno – nitovaných spojov s dôrazom na zaznamenanie gradientu deformácií v blízkosti otvorov pre nity. Posudzoval sa aj vplyv lepidla na vznik napäťovo deformačných špičiek v oblasti otvorov. Pre tento účel bola zvolená technika meranie rozloženia deformácie na povrchu telies.

Ako najvhodnejší systém z hľadiska pomeru kvalitatívneho popisu deformačného poľa a cenovej dostupnosti bol zvolený fotogrametrický systém ARAMIS. Fotogrametria sa zaoberá vyhodnocovaním objektov zaznamenaných na fotografiách. Ako taká bola spolu vyvíjaná s fotografiami a veľký rozvoj zaznamenala pri vyhodnocovaní leteckých fotografií. Rozvoj digitálnej výpočtovej a zobrazovacej techniky, najmä zvýšenie rozlišovacej schopnosti a rýchlosti vyhodnocovania umožnili využitie fotogrametrie aj pri komplexných meraniach deformácií.

Zvažované bolo aj použitie interferometrie, konkrétne systému Q100. Táto technika i systém sú citlivejšie než fotogrametria a priamo určené na merania zvyškových napätí, prípadne malých deformácií. Nič menej pokusné merania prevedené na vzorkách s jedným nitom a aj na vzorkách so siedmimi nitmi systémom Q100 nedopadli úspešne a z dôvodu horšieho prístupu k tomuto systému sa v ďalších meraniach nepokračovalo.

ARAMIS je bezkontaktný fotogrametrický systém firmy *GOM Optical Measuring Techniques* slúžiaci na meranie reálnych 3D deformácií. Výsledkom merania je pole rozloženia deformácií na objekte zaťažovanom buď staticky alebo dynamicky. Proces merania môže byť spúšťaný v pravidelných časových intervaloch alebo môže byť riadený externým signálom (napr. zo zaťažovacieho stroja). Maximálna rýchlosť snímkovania môže byť až 8000 snímok za sekundu.

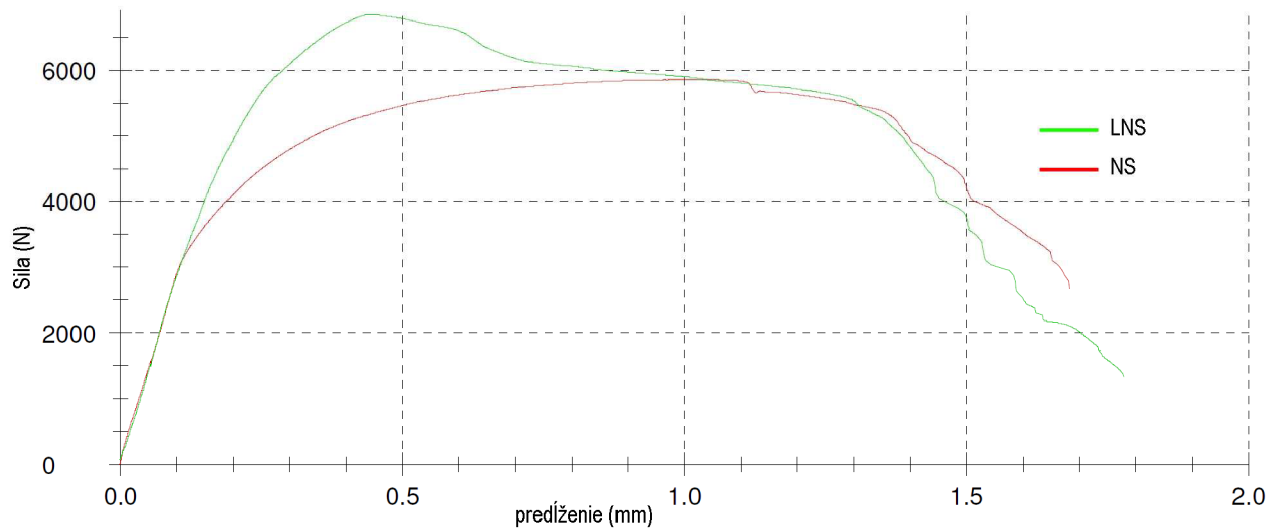
Proces merania:

- na objekt je pomocou spreja nanosený kontrastný vzor (tzv. *pattern*/šablóna)
- šablóna sa pri zaťažovaní objektu deformuje
- objekt je pre každú úroveň zaťaženia (tzv. *stage*) snímávaný 2 CCD kamerami
- zo snímok sú pomocou spracovania obrazu (*image processing*) vypočítané 3D súradnice bodov ležiacich na povrchu objektu
- porovnaním zodpovedajúcich bodov pri jednotlivých úrovniach zaťaženia systém vypočíta 3D posuvy a následne tvar deformovaného objektu a 3D deformácie

Geometria a materiál testovaných vzoriek sú popísané v kapitole 4.1 (*Obr. 4.2*). Samotné meranie pozostávalo z ťahovej skúšky, ktorá bola zaznamenávaná dvomi digitálnymi kamerami (*Obr. 4.13*). Ťahová skúška bola prevedená na skúšobnom zariadení Zwick. Výsledok ťahovej skúšky spojov vo forme závislosti sily na predĺžení je na (*Obr. 4.14*).

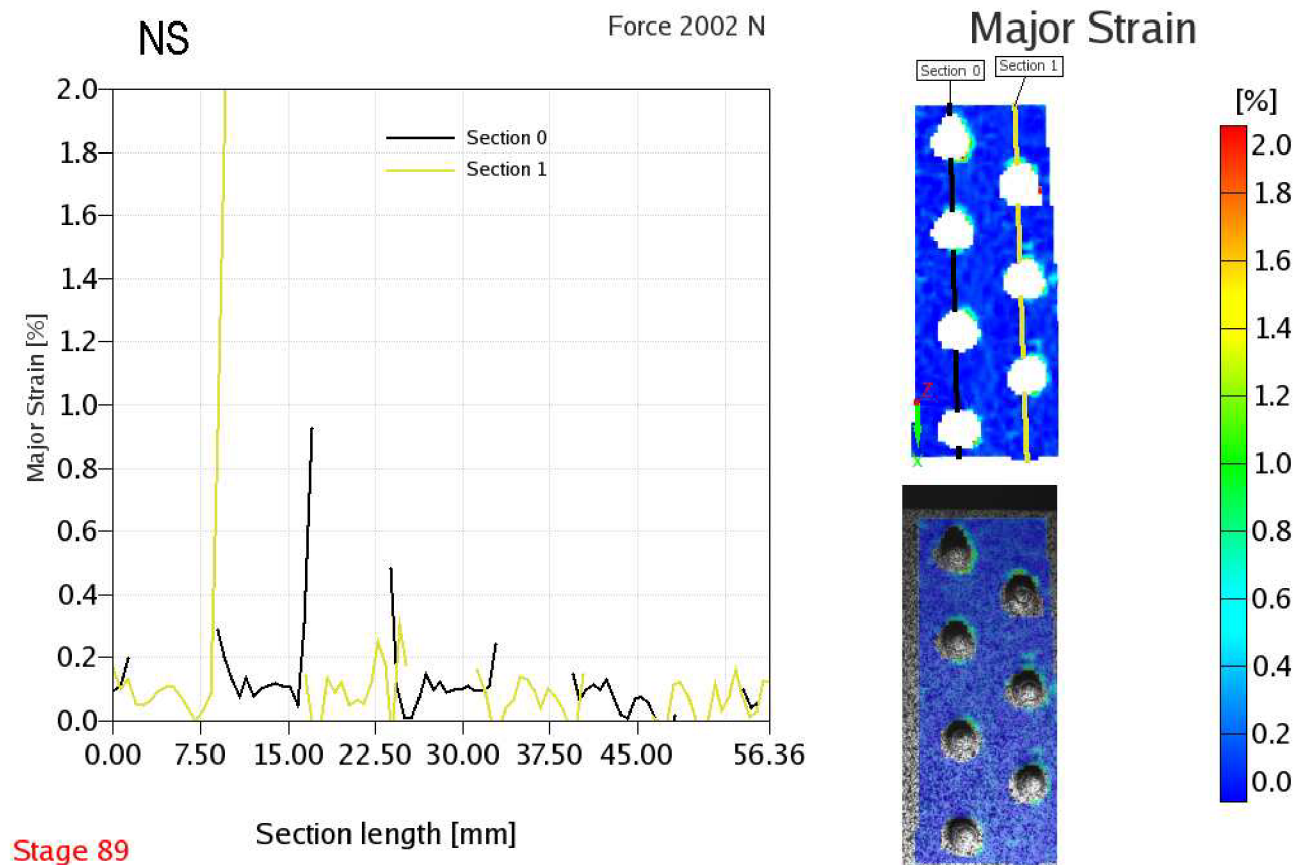


Obr. 4.13 Ilustračná fotografia ťahovej skúšky zaznamenávanej systémom Aramis

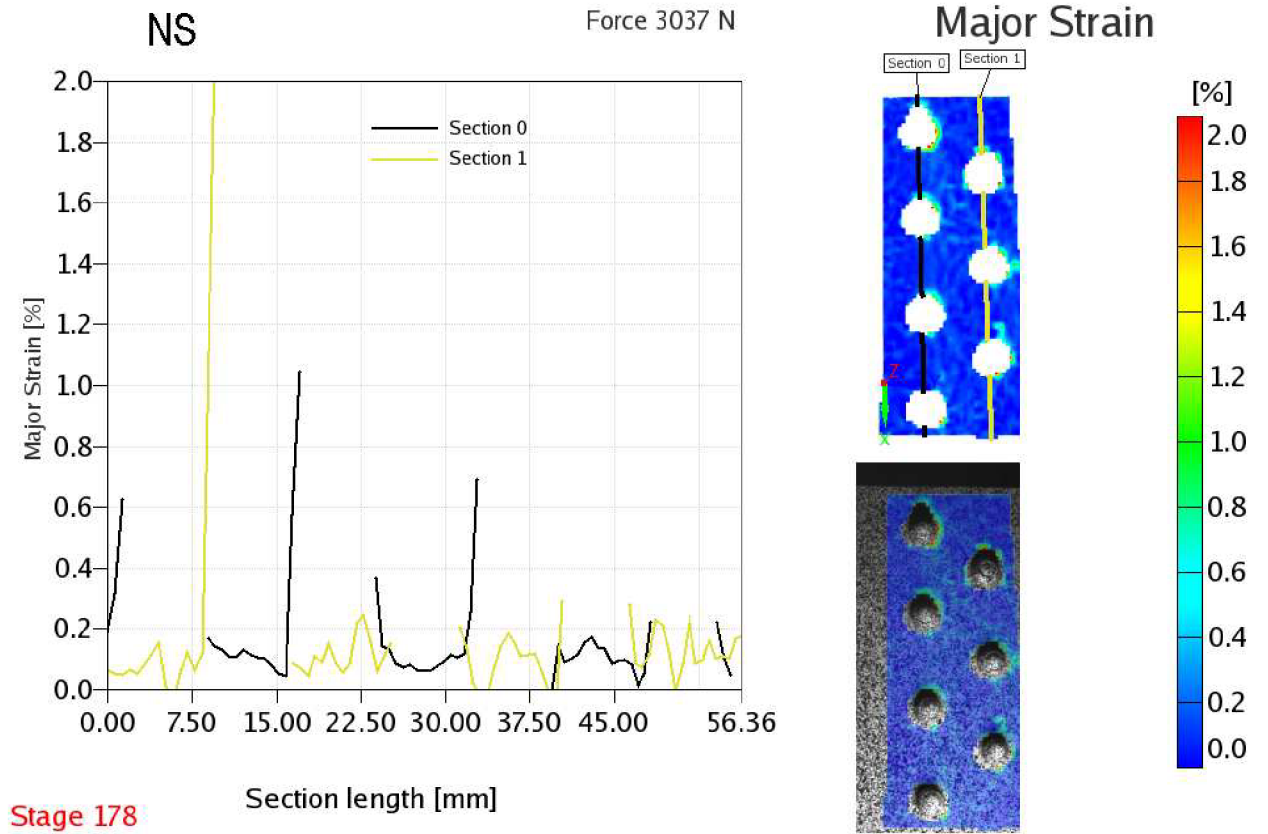


Obr. 4.14 Záznam z ťahovej skúšky pri optickom meraní deformačného poľa

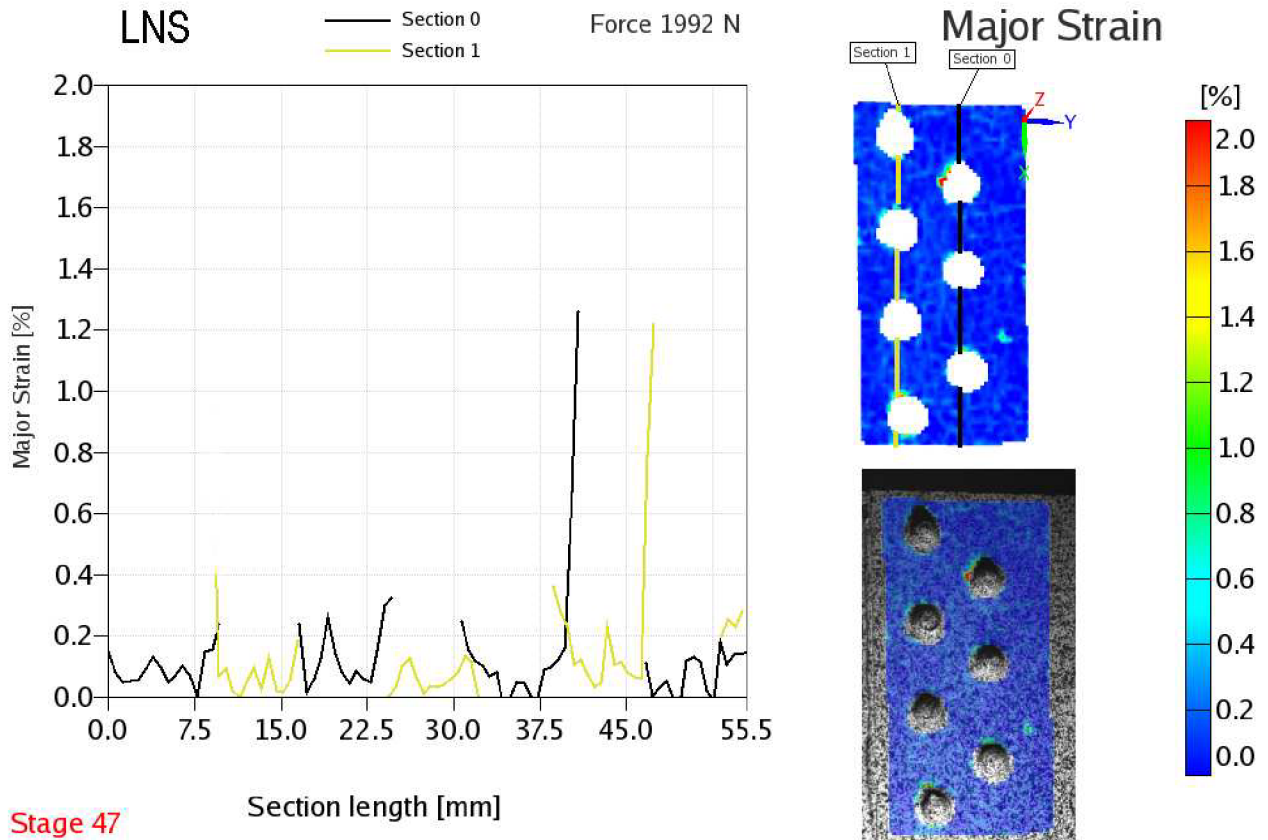
Zo spracovaného digitálneho záznamu bolo vyhodnotené rozloženie deformácie pre dve hladiny zaťaženia 2000 N a 3000 N, ako pre nitovanú tak aj pre lepeno – nitovanú vzorku. Gradient napätia bol meraný v dvoch priečných rezoch kolmých na zaťaženie. Rezy boli vedené stredom nitových rád. Na nasledujúcich obrázkoch sú zaznamenané rozloženia deformácií na povrchu spojov a v zodpovedajúcich priečných rezoch.



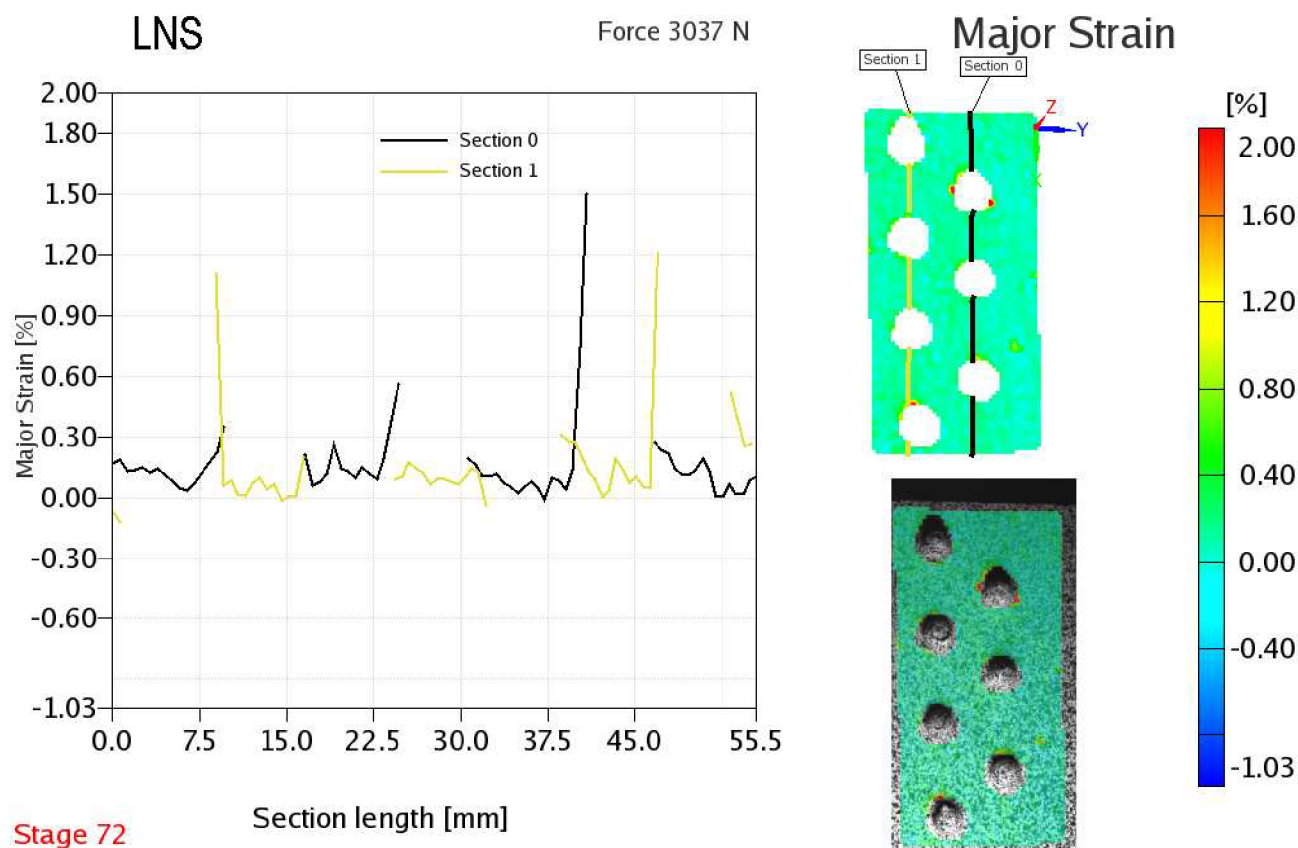
Obr. 4.15 Rozloženie deformácií na nitovom spoji pri zaťažení 2002 N



Obr. 4.16 Rozloženie deformácií na nitovom spoji pri zaťažení 3037 N



Obr. 4.17 Rozloženie deformácií na lepeno – nitovom spoji pri zaťažení 1992 N



Stage 72

Obr. 4.18 Rozloženie deformácií na lepeno – nitovom spoji pri zaťažení 3037 N

V tabuľke 4.3 sú uvedené maximálne hodnoty pomerných deformácií, ktoré boli zaznamenané v blízkosti hrán otvorov pre oba typy spojov pri zaťaženiach 2000 N a 3000 N. Pri zaťažení 2000 N boli v priemere rozdiely medzi maximálnymi hodnotami pomerných deformácií u NS a LNS zanedbateľné. Avšak u nitovaného spoja bola zaznamenaná výrazne vyššia špička pomernej deformácie na jednom nite (Obr. 4.15 – section1 prvý nit). Konkrétne bola na tomto nite nameraná pomerná deformácia o veľkosti $\varepsilon_{maxNS} = 2\%$, maximum pomernej deformácie na ekvivalentnom rade nitov u lepeno – nitovaného spoja bolo $\varepsilon_{maxLNS} = 1,261\%$. U vyššej zaťažovacej sily (3000 N) bolo pozorované obdobné správanie ($\varepsilon_{maxNS} = 2,276\%$, $\varepsilon_{maxLNS} = 1,502\%$).

Tab. 4.3 Maximálne hodnoty pomerných deformácií v príslušných rezoch

F (N)	NS				LNS			
	2000		3037		1992		3037	
Rez	3 nity	4 nity	3 nity	4 nity	3 nity	4 nity	3 nity	4 nity
ε (%)	2,007	0,196	2,276	0,623	0,239	0,428	0,349	-0,123
	0,141	0,287	0,087	0,169	0,236	0,182	0,209	1,106
	0,177	0,927	0,152	1,047	0,324	0,002	0,564	0,198
	0,160	0,480	0,203	0,365	0,244	0,363	0,194	0,092
	0,145	0,243	0,290	0,690	1,261	1,210	1,502	-0,039
	0,009	0,148	0,279	-0,007	0,109	0,201	0,275	0,313
	-	0,015	-	0,221	-	-0,013	-	1,216
	-	0,099	-	0,223	-	-0,032	-	0,516
ε_{str} (%)	0,440	0,299	0,548	0,416	0,402	0,292	0,515	0,410
ε_{max} (%)	2,007	0,927	2,276	1,047	1,261	1,210	1,502	1,216

Môžeme konštatovať, že v rezoch spojov s tromi nitmi boli dosahované u kombinovaného spoja o 33% nižšie hodnoty maximálnych pomerných deformácií v porovnaní s nitovaným spojom. V rezoch so štyrmi nitmi boli naopak zaznamenané o 20% vyššie hodnoty pomerných deformácií u lepeno – nitovaných spojov. Z analýzy je však zrejmé, že vrstva lepidla spôsobuje rovnomernejšie rozloženie zaťaženia po spoji a znižuje tak maximálne napät'ové špičky v blízkosti otvorov pre nity.

4.4 Súhrn a hlavné závery z analýzy

Pri napät'ovo deformačnej analýze bolo popísané napät'ové pole pomocou MKP analýzy na jedno strižnom preplátovanom nitovanom a kombinovanom spoji s jedným nitom. V prípade kombinovaného spoja bola simulovaná i vrstva lepidla pomocou hyperelastického materiálu. Zhoda tuhostí s nameranými dátami bola u kombinovaného spoja na dobrej úrovni. Simulácia nitového spoja vykazovala vyššiu tuhosť ako u experimentálne nameranej tuhosti vzorky NS. Pravdepodobnými príčinami v rozdiel tuhostí sú geometrická a materiálová nedokonalosť testovaných vzoriek. Z hľadiska posúdenia vplyvu lepidla bol trend v rozdiel tuhostí medzi simuláciami nitovaného a kombinovaného spoja približne zhodný s experimentálne nameranými dátami. Z toho môžeme usudzovať, že i napät'ovo deformačný stav zistený pri MKP simulácii bude mať obdobný charakter v porovnaní so skutočným napät'ovým stavom na testovaných vzorkách.

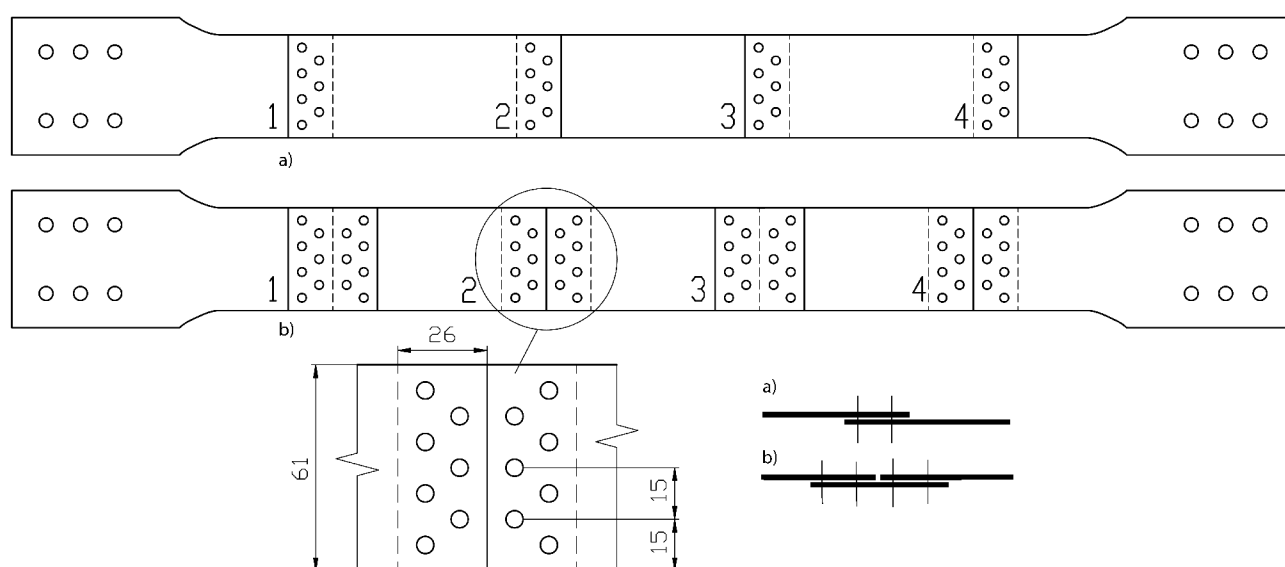
Pri simuláciách bolo zistené, že rozdiel v maximálnych napät'ových špičkách je pri nižšom zaťažení (272 N) minimálny a pohybuje sa okolo jedného percenta. Avšak v reze kolmom na zaťaženie, ktorý je kritický z hľadiska únavy, bol zaznamenaný približne 20% nárast napät'ových špičiek u nitovaného spoja (120 MPa) oproti kombinovanému spoju (99 MPa). Pri vyššom zaťažení (680 N) došlo vplyvom lepidla u LNS i k významnejšiemu 17% poklesu maximálneho zaznamenaného napätia v porovnaní s nitovým spojom. Porovnanie gradientov napätia v priečnom reze pre model NS a LNS je pre toto zaťaženie vynesené na Obr. 4.11. Na nitovom spoji sa v tomto reze dosiahlo o 12% vyššie napätie v porovnaní s kombinovaným spojom.

Vplyv lepidla na napät'ovo deformačný stav bol posudzovaný aj experimentálne pomocou systému Aramis (fotogrametria) na vzorkách so siedmimi nitmi (Obr. 4.2). Optickým meraním deformačného poľa na povrchu testovaných spojov sa zistilo, že vrstva lepidla spôsobuje rovnomernejšie rozloženie napätia na jednotlivé nity. Maximálne špičky pomerných deformácií boli u kombinovaného spoja o 33% nižšie.

MKP analýza i experimentálne meranie deformácií naznačujú, že vrstva lepidla – tmelu s veľmi vysokou ťažnosťou má priaznivý vplyv na znižovanie napät'ových špičiek v okolí otvorov pre nity.

5 ÚNAVOVÉ SKÚŠKY

Únavové skúšky boli prevedené na vzorkách – reťaziach skladajúcich sa zo štyroch testovaných spojov zaradených do série (Obr. 5.1). Tieto testy prebiehali v kooperácii s firmou EVEKTOR^[43, 44], ktorá dodala vzorky, čím sa zabezpečila ich reálna výrobná kvalita. Testované vzorky reprezentujú vybrané spoje použité na lietadle VUT 100. Ide o spoje vytvorené trňovými nitmi, respektíve plnými nitmi so zápusťou hlavou. Spoje sú jednoducho preplátované (Obr. 5.1a - typ 1) alebo jedno strižné s príložkou (Obr. 5.1b - typ 2). Vzorky – reťaze sú vyrábané v pároch, ako čisto nitované a lepeno - nitované, aby bolo možné vyhodnotiť vplyv lepidla na únavové vlastnosti. V tejto práci sú publikované výsledky skúšok vzoriek NS a LNS vytvorených trňovými nitmi AVEX 1691-0410 (viď. kap. 4.1.2), plnými nitmi so zápusťou hlavou NAS 1097AD-4 (priemer 1/8“ palca, dĺžka nitu 1/4“ palca, materiál 2117-T4) a tmelom PU – 50 (viď. kap. 4.1.3). Spájané plechy (vrátane príložky) boli vyrobené zo zliatiny D16 ČATV (tab. 4.1) o hrúbke 0,8 mm.



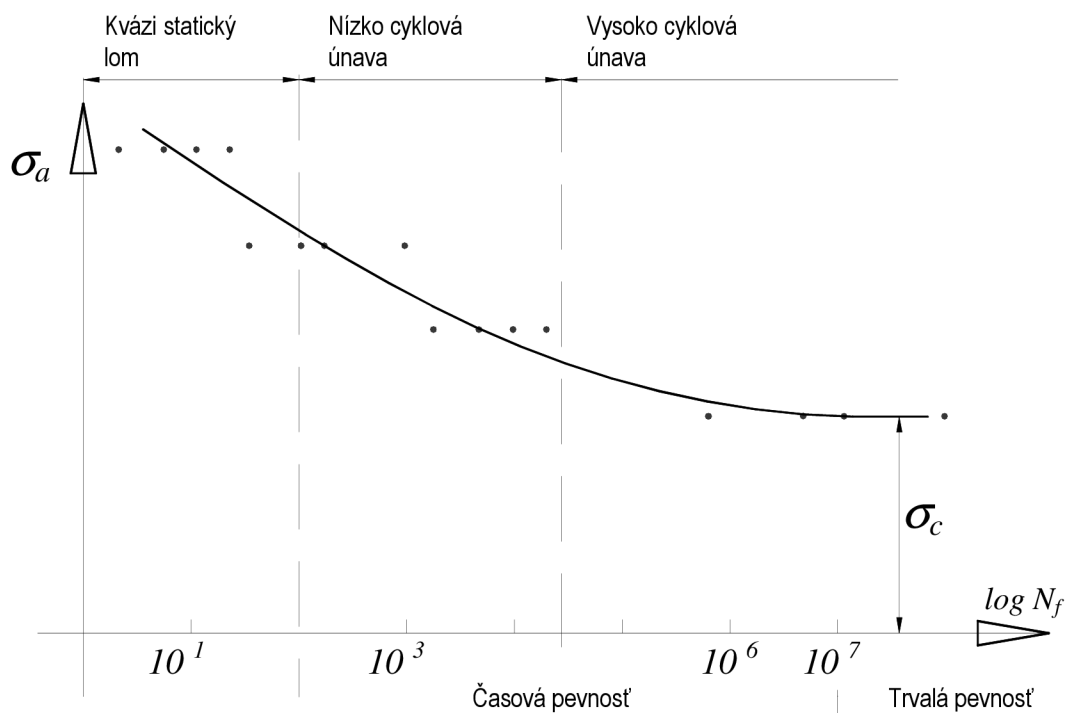
Obr. 5.1 Geometria vzoriek – reťazí so štyrmi testovacími spojami: a) Typ 1, b) Typ 2

Označenie a popis testovaných vzoriek je uvedený v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 5.1 Popis testovaných vzoriek

Označenie vzorky	Schéma vzorky	Popis
AAPB		Spoj typu 1, nity AVEX 1691-0410, bez tmelu
AAPL		Spoj typu 1, nity AVEX 1691-0410, tmel PU -50
AAJB		Spoj typu 2, nity AVEX 1691-0410, bez tmelu
AAJL		Spoj typu 2, nity AVEX 1691-0410, tmel PU -50
NNPB		Spoj typu 1, nity NAS 1097AD-4, bez tmelu
NNPL		Spoj typu 1, nity NAS 1097AD-4, tmel PU -50
NNJB		Spoj typu 2, nity NAS 1097AD-4, bez tmelu
NNJL		Spoj typu 2, nity NAS 1097AD-4, tmel PU -50

Výsledkom týchto skúšok má byť experimentálne určenie S/N kriviek (Obr. 5.2), na základe ktorých by bolo možné vyhodnotiť vplyv tmelu na únavové vlastnosti nitových spojov.



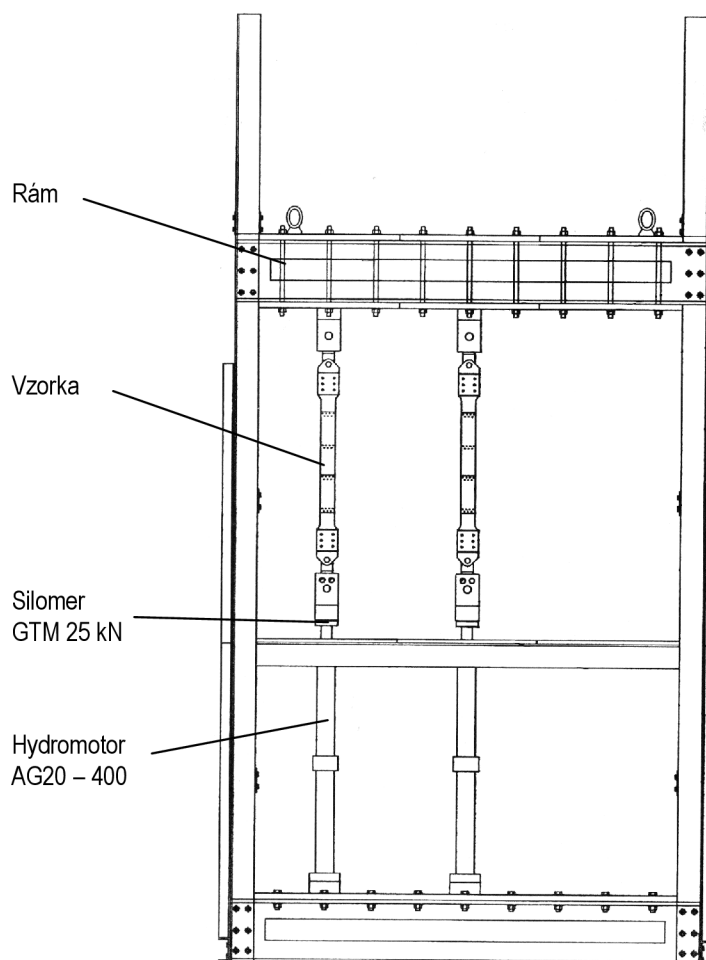
Obr. 5.2 Schéma S/N krivky

5.1 Metodika skúšky

Jedna vzorka – reťaz, sa testovala na jednej hladine zaťaženia $\sigma_a = konst$, ako náhle došlo k poruche niektorého zo spojov, tento sa opravil nitovaním (plný pologuľatý nit $d = 3,5 \text{ mm}$), a skúška pokračovala dokým sa neporušili všetky štyri spoje, z ktorých bola reťaz zložená. Pre každý spoj v reťazi sa určoval počet cyklov do poruchy N_f . Na zostrojenie celej S/N krivky sa jeden typ spojov testoval minimálne na štyroch hladinách zaťaženia (4 reťaze). Parametre všetkých skúšok spĺňali tieto podmienky: amplitúda napätia $\sigma_a = konst$, koeficient asymetrie cyklu $R = 0,1$, frekvencia zaťažovania $f = 5 \text{ Hz}$.

Z dôvodu urýchlenia skúšok bolo testovacie zariadenie navrhnuté tak, aby umožňovalo skúšanie až troch reťazí naraz (Obr. 5.3). Skúšobné zariadenie sa skladá z rámu a hydromotorov INOVA AG25 – 400, ktoré disponujú max. silovou kapacitou 25 kN , modernou konštrukciou a servoventilom MOOG, čo umožnilo dostatočne presnú reguláciu síl i pri spodnej hranici zaťažovania. Hydromotory sú riadené regulátorom INOVA RED 03. Na meranie sily je použitý silomer GTM 25 kN . Reguláciu, priebežný záznam a digitalizáciu meraných veličín zabezpečuje riadiaca jednotka INOVA CU2, ktorá je zložená s osobného počítača a analogovo – digitálneho adaptéra ADAS 16. K riadeniu skúšky bol použitý program LabExpert – SAF 406. Z Obr. 5.3 je zrejmé i celkové usporiadanie skúšky. V priebehu skúšky bola zaznamenávaná zaťažovacia sila generovaná hydromotorom.

Pred zahájením skúšky bola každá vzorka označená zodpovedajúcou hladinou zaťaženia, ďalej prebehlo meranie rozmerov vo dvoch rezoch pred a za nitovými radami testovaných spojov vo vzdialenosti 15 a 25 mm (Príloha I). Počas skúšky bol vedený denník, do ktorého boli zapisované aktuálne informácie o priebehu únavovej skúšky až do jej ukončenia. V priebehu skúšky boli v stanovených intervaloch prevádzané vizuálne prehliadky vzoriek. Prípadné nálezy únavových porúch boli zaznamenávané do denníka skúšky.



Obr. 5.3 Schéma skúšobného zariadenia

5.1.1 Spôsob vyhodnocovania

Vzorky sú na príslušných napätových hladinách vystavené pôsobeniu miznúceho cyklického zaťaženia (Obr. 5.4b). Hladinu určuje nominálne horné napätie $\sigma_{h,nom} = \frac{F_h}{S_0}$, kde F_h je max. zaťažujúca sila nastavovaná pri skúške spoločne s min. zaťažujúcou silou F_d a $S_0 = 48,8 \text{ mm}^2$ nominálny prierez vypočítaný z návrhových rozmerov vzorky ($b = 61 \text{ mm}$, $t = 0,8 \text{ mm}$). Z týchto základných údajov sú pomocou vzťahov uvedených nižšie dopočítané hodnoty horného, dolného a stredného napätia a amplitúdy napätia vzťahované ku skutočnému prierezu daného spoja (Príloha 2).

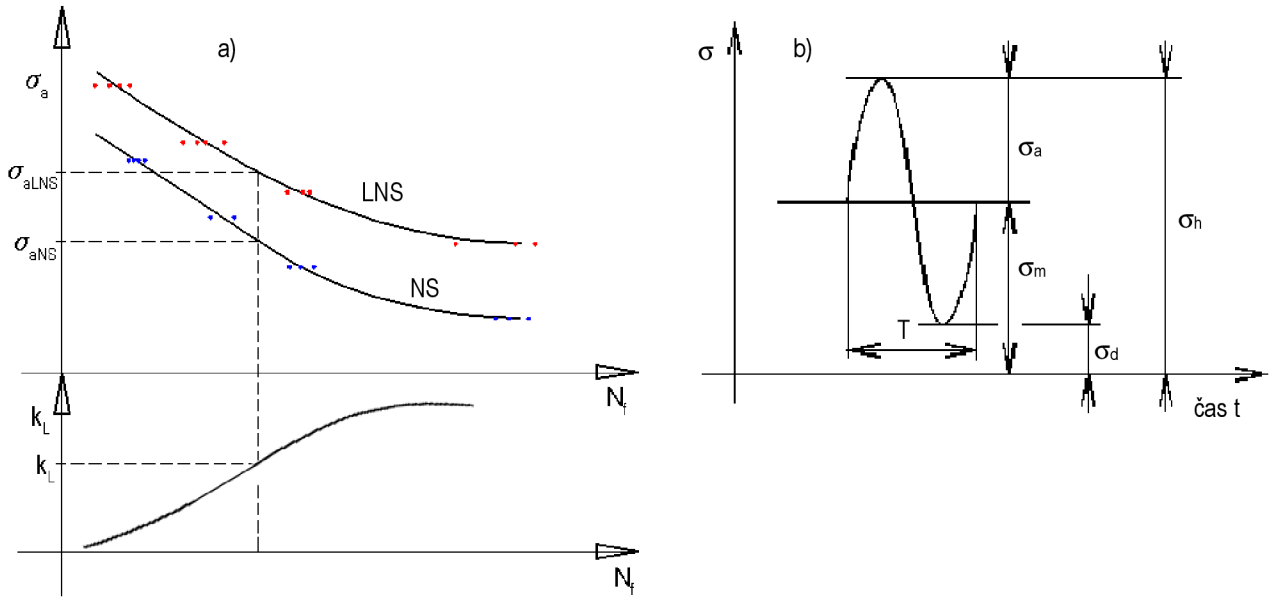
$$\sigma_h = \frac{F_h}{bt}, \sigma_d = \frac{F_d}{bt}, \sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2}, \sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2}, R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} \quad (5.0)$$

Počas skúšky boli regulované horná a dolná zaťažujúca sila a pri porušení jednotlivých spojov sa zaznamenal počet cyklov do poruchy N_f , čo umožnilo zostrojenie S/N kriviek pre každý typ spoja. Po ich zostrojení bolo možné vyhodnotiť vplyv lepidla na únavové vlastnosti NS. Predpokladom bolo, že lepidlo bude znižovať koncentráciu napätia v okolí otvorov pre nity a spolu s vyššou tuhosťou spoja tak prispeje k zvýšeniu životnosti lepeno – nitovaných spojov (Obr. 5.4a). Vplyv lepidla na únavové vlastnosti nitovaných spojov je vyjadrený pomocou súčiniteľa $k_L(N_f)$:

$$k_L(N_f) = \frac{\sigma_{aLNS}(N_f)}{\sigma_{aNS}(N_f)} \quad (5.1)$$

Každá zo zostrojených S/N kriviek je popísaná vzťahom:

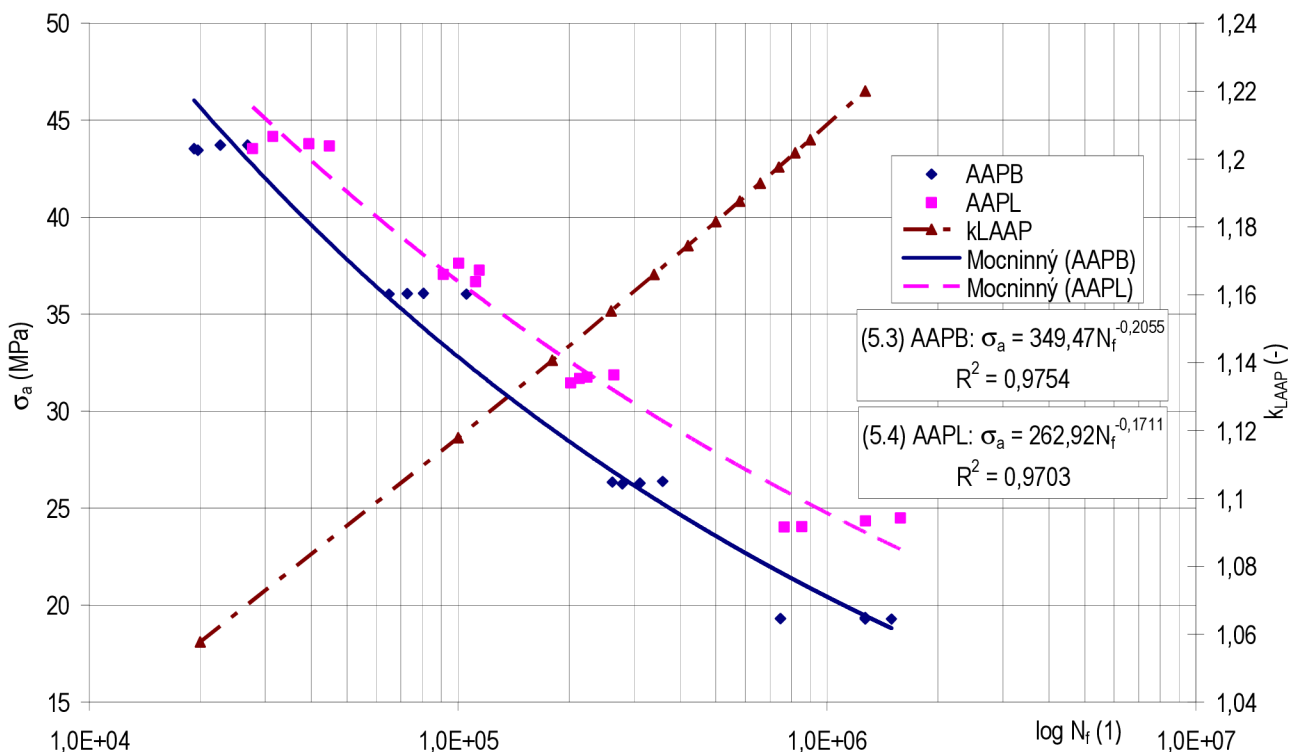
$$\sigma_a = AN_f^m \quad (5.2)$$



Obr. 5.4 a) Predpokladaný vplyv lepidla na únavovú životnosť NS, b) Miznúci cyklus

5.2 Namerané hodnoty a vyhodnotenie

Na grafoch, uvedených v tejto kapitole, sú vynesené S/N krivky v kombinácii nitovaný spoj s príslušným lepeno – nitovaným spojom, aby bolo možné priame posúdenie vplyvu lepidla na únavové vlastnosti. V každom grafe je z tohto dôvodu zobrazená i závislosť súčiniteľa vplyvu lepidla na počte cyklov do poruchy $k_L(N_f)$.

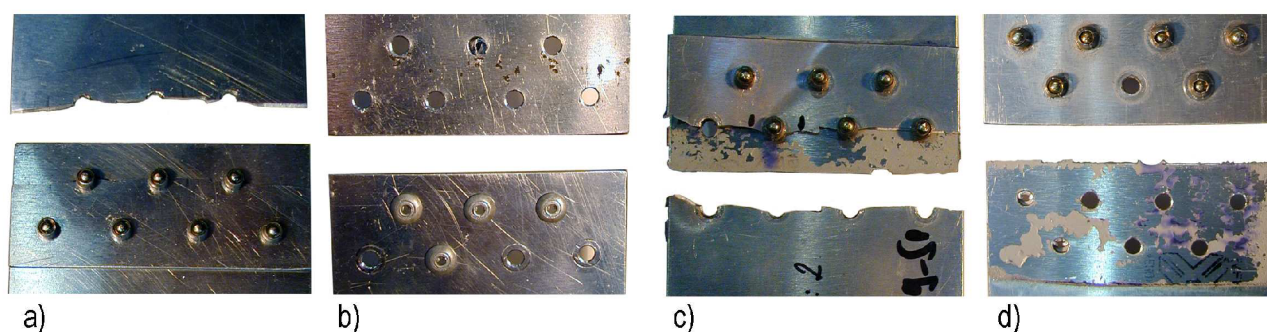


Obr. 5.5 S/N krivky vzoriek AAPB a AAPL a závislosť súčiniteľa vplyvu lepidla na počte cyklov do poruchy $k_{LAAP}(N_f)$

$$poruchy \ k_{LAAP}(N_f) = \frac{\sigma_{aAAPL}(N_f)}{\sigma_{aAAPB}(N_f)}$$

U vzoriek typu AAP (jednoducho preplátované jedno strižné spoje, *Tab. 5.1*) mala aplikácia tmelu PU – 50 pozitívny vplyv na zvýšenie únavovej životnosti v celom rozsahu testovania od nízko cyklovej únavy až po vysoko cyklové zaťažovanie. Pričom z charakteru súčiniteľa k_{LAAP} (*Obr. 5.5*) je zrejmé, že vplyv tmelu bol pri týchto vzorkách významný hlavne pri dosiahnutí vyšších cyklov do poruchy (cca 10^6). Môžeme konštatovať, že LNS vzorky AAPL prekračovali 10^6 cyklov do poruchy pri v priemere o 21 percent vyšších hodnotách zaťaženia ako v prípade čisto nitovaných vzoriek AAPB. Namerané hodnoty závislostí $\sigma_a(N_f)$ sú pre spoje AAPB a AAPL popísané vzťahmi (5.3) resp. (5.4) (*Obr. 5.5*).

Spôsoby typických únavových poškodení spojov AAPB a AAPL sú zachytené na *Obr. 5.6*. Charakter únavového poškodenia bol viac menej rovnaký pre oba druhy spojov. Hlavné rozdiely boli spôsobené veľkosťou hladiny zaťaženia. Pri nízko cyklovej únave (vyšších hladinách zaťaženia) boli únavové poruchy u oboch typov spoja spôsobené prestrihnutím nitov (*Obr. 5.6b, d*). Naproti tomu u vysoko cyklovej únavy dochádzalo k iniciácii a šíreniu trhlín v spájaných plechoch až kým nenastala celková porucha spoja (*Obr. 5.6a, c*). Na základe charakteru S/N kriviek spojov AAP (*Obr. 5.5*) a spôsobu ich únavového poškodenia môžeme usudzovať, že pri nízko cyklovej únave mala vrstva tmelu zásadný vplyv najmä z hľadiska celkovo vyššej tuhosti spojov AAPL. Pri vysoko cyklovej únave došlo pravdepodobne u spojov AAPL vplyvom vrstvy lepidla k poklesu napät'ových špičiek v okolí otvorov, čím sa oddialila iniciácia únavovej trhliny v spájaných plechoch a bolo tak možné dosiahnuť 10^6 cyklov do poruchy pri vyššej hodnote amplitúdy napätia (*Obr. 5.5*).

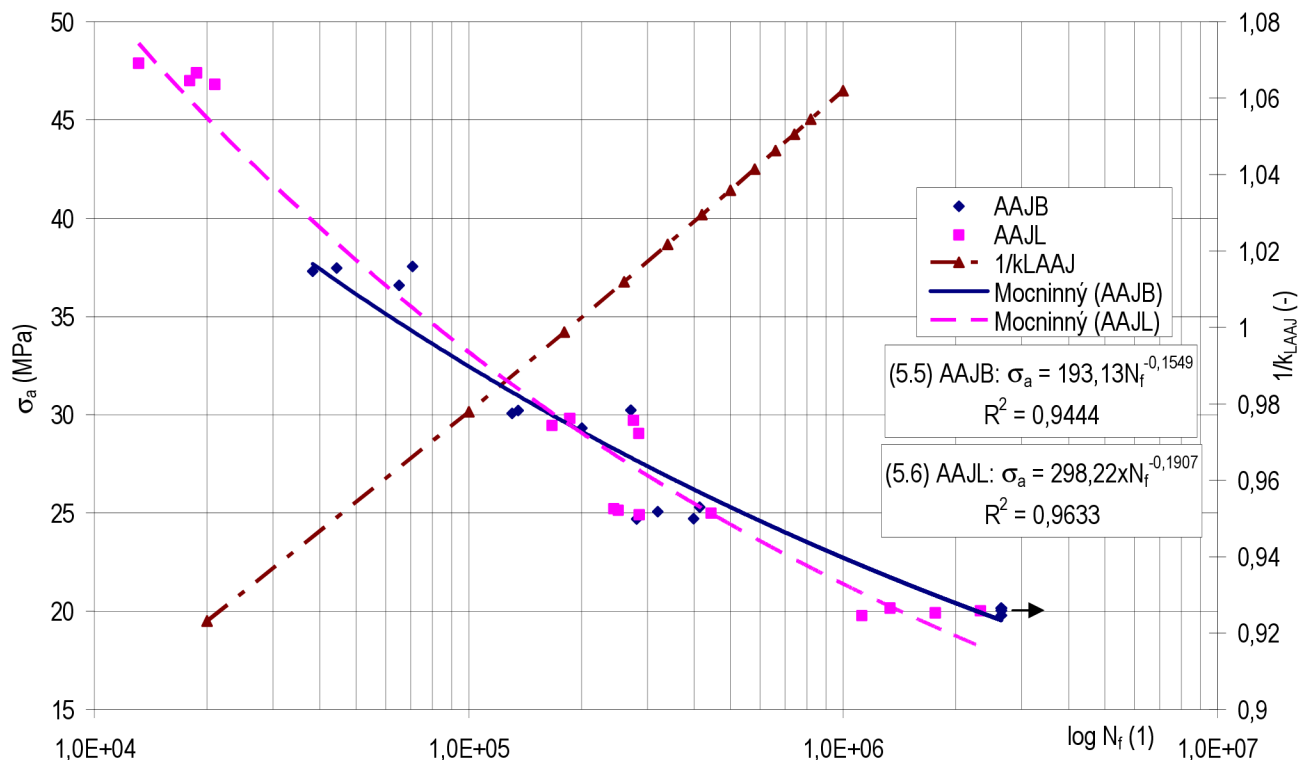


Obr. 5.6 Typické únavové poruchy spojov AAP: a) AAPB vysoko cyklová únava; b) AAPB nízko cyklová únava; c) AAPL vysoko cyklová únava; d) AAPL nízko cyklová únava

Vplyv tmelu u spojov AAJ (spoje s príložkou, *Tab. 5.1b*) nie je jednoznačný (*Obr. 5.7*). Pri nízko cyklovej únave v intervale od cca 10^4 do 10^5 cyklov do poruchy vykazujú kombinované AAJL spoje mierne zlepšenie únavových vlastností. Na začiatku tohto intervalu ($10^4 N_f$) ide približne o päť percentný rozdiel medzi dosahovanými napätiami pri poruche. Avšak s pribúdajúcim počtom cyklov sa tento trend mení pričom na rozhraní nízko cyklovej a vysoko cyklovej únavy dosahujú oba typy spojov AAJB a AAJL porovnateľné hodnoty. Na najnižšej hladine zaťaženie ($\sigma_a \cong 20 \text{ MPa}$) nedošlo u vzoriek AAJB k poruche a skúška bola zastavená pri dosiahnutí 2 644 308 cyklov. Po prekročení 10^6 cyklov sú dosahované napätia pri poruche približne o osem percent nižšie u spojov AAJL v porovnaní so spojmi AAJB. Namerané hodnoty závislostí $\sigma_a(N_f)$ sú pre spoje AAJB a AAJL popísané vzťahmi (5.5) resp. (5.6) (*Obr. 5.7*).

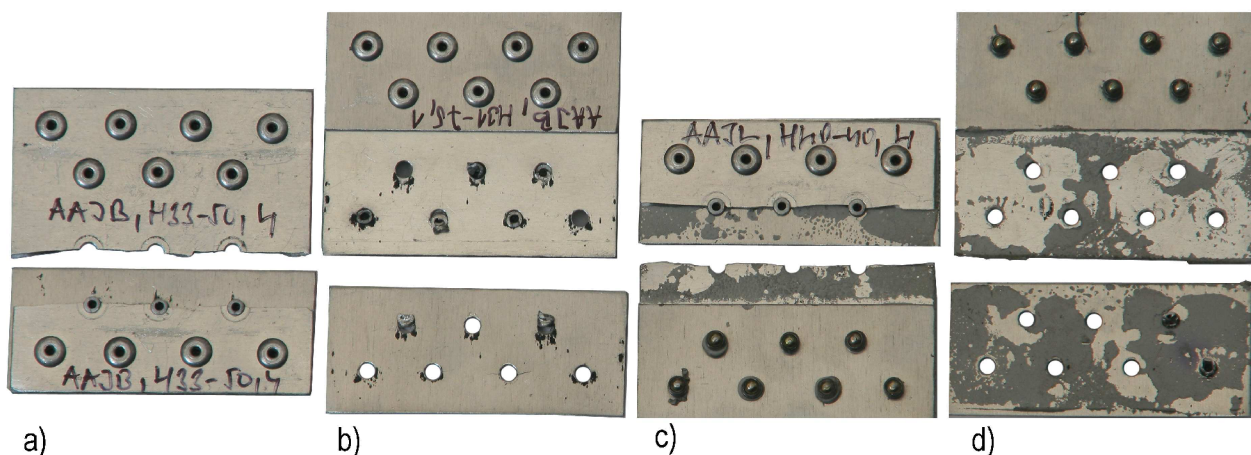
Typy únavových porúch, ktoré sa vyskytli u spojov AAJ sú obdobné ako v prípade spojov AAP (*Obr. 5.8*). Opäť v prípade nízko cyklovej únavy dochádzalo pri oboch typoch spojov (AAJB, AAJL) k porušeniu nitov a pri vysoko cyklovej únave k postupnému šíreniu únavovej trhliny až do

deštrukcie spoja. Jediným významným rozdielom medzi vzorkami bez lepidla AAJB a s lepidlom AAJL bolo, že na hladine H35-40 nedošlo u spojov AAJB k únavovej poruche.



Obr. 5.7 S/N krivky vzoriek AAJB a AAJL a závislosť súčiniteľa vplyvu lepidla na počte cyklov do

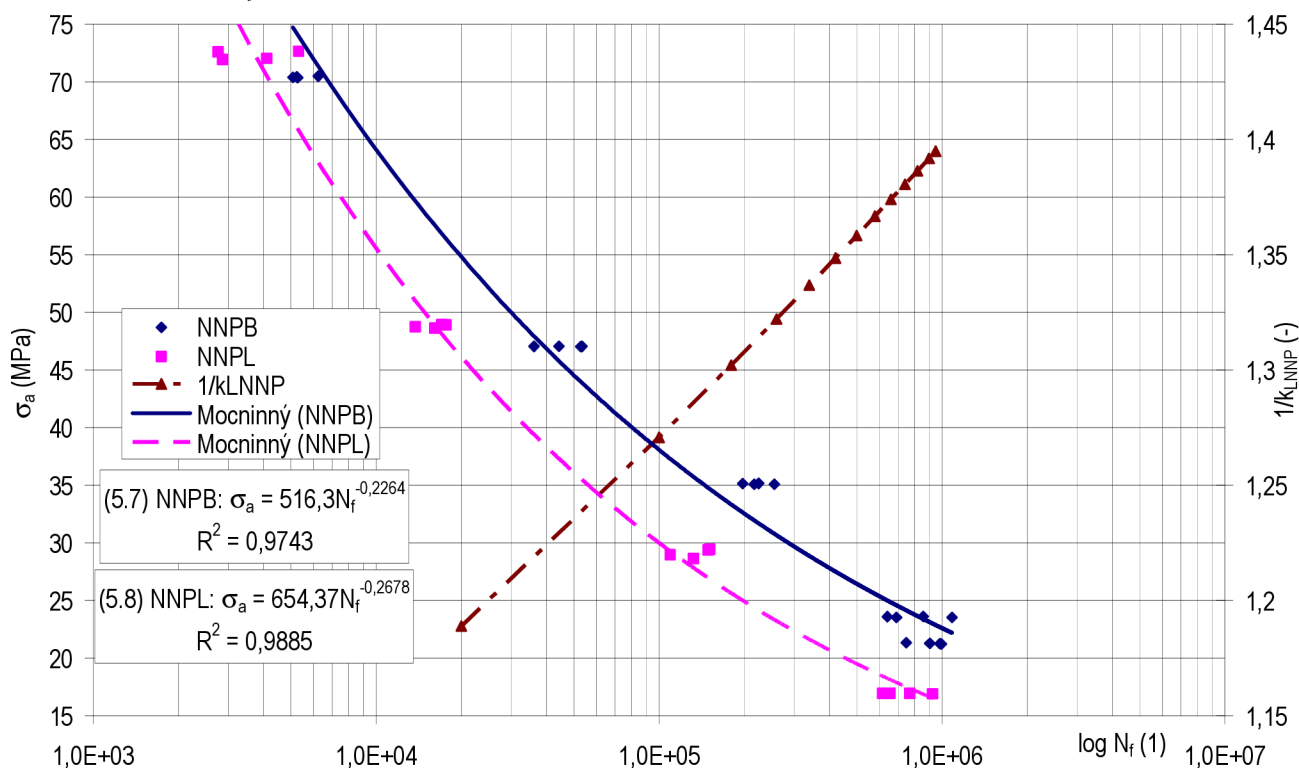
$$\text{poruchy } 1/k_{LAAJ}(N_f) = \frac{\sigma_{aAAJL}(N_f)}{\sigma_{aAAJB}(N_f)}$$



Obr. 5.8 Typické únavové poruchy spojov AAJ: a) AAJB vysoko cyklová únava; b) AAJB nízko cyklová únava; c) AAJL vysoko cyklová únava; d) AAJL nízko cyklová únava

Na únavové vlastnosti spojov typu NNP (Tab. 5.1) s plnými nitmi so zápustnou hlavou malo najväčší vplyv zahĺbenie otvoru pre zápustnú hlavu nitu, ktoré bolo vytvorené cez celú hrúbku plechu. Na spodnej strane spájaného plechu so zapustenými otvormi tak vznikla ostrá hrana. Takýto typ zapustenia nitov nie je podľa viacerých štandardov vrátane ONL noriem doporučený práve z hľadiska únavového namáhania. Jedno strižné sady vzoriek NNP s plnými zapustenými nitmi sa tak vyznačovali horšími únavovými vlastnosťami ako spoje AAP vytvorené pomocou menej pevných trňových nitov. Vplyv tmelu u spojov NNPL pritom ešte zhoršil únavové charakteristiky (Obr.

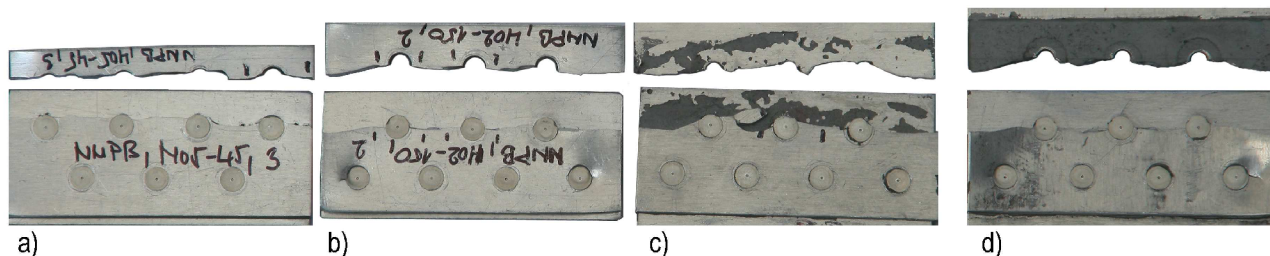
5.9). Hlavnou príčinou je pravdepodobne kombinácia ostrej hrany zapustenia a zvýšenie namáhania nitu v tomto mieste v dôsledku zvýšeného zaťaženia spôsobeného od prídavného ohybového momentu, ktorý vznikal medzi adherendami v dôsledku hrúbky lepidla cca. 0,1 mm. Namerané hodnoty závislostí $\sigma_a(N_f)$ sú pre spoje NNP popísané vzťahmi (5.7) resp. (5.8) (Obr. 5.9).



Obr. 5.9 S/N krivky vzoriek NNPB a NNPL a závislosť súčiniteľa vplyvu lepidla na počte cyklov do

$$\text{poruchy } 1/k_{LNNP}(N_f) = \frac{\sigma_{aNNPL}(N_f)}{\sigma_{aNNPB}(N_f)}$$

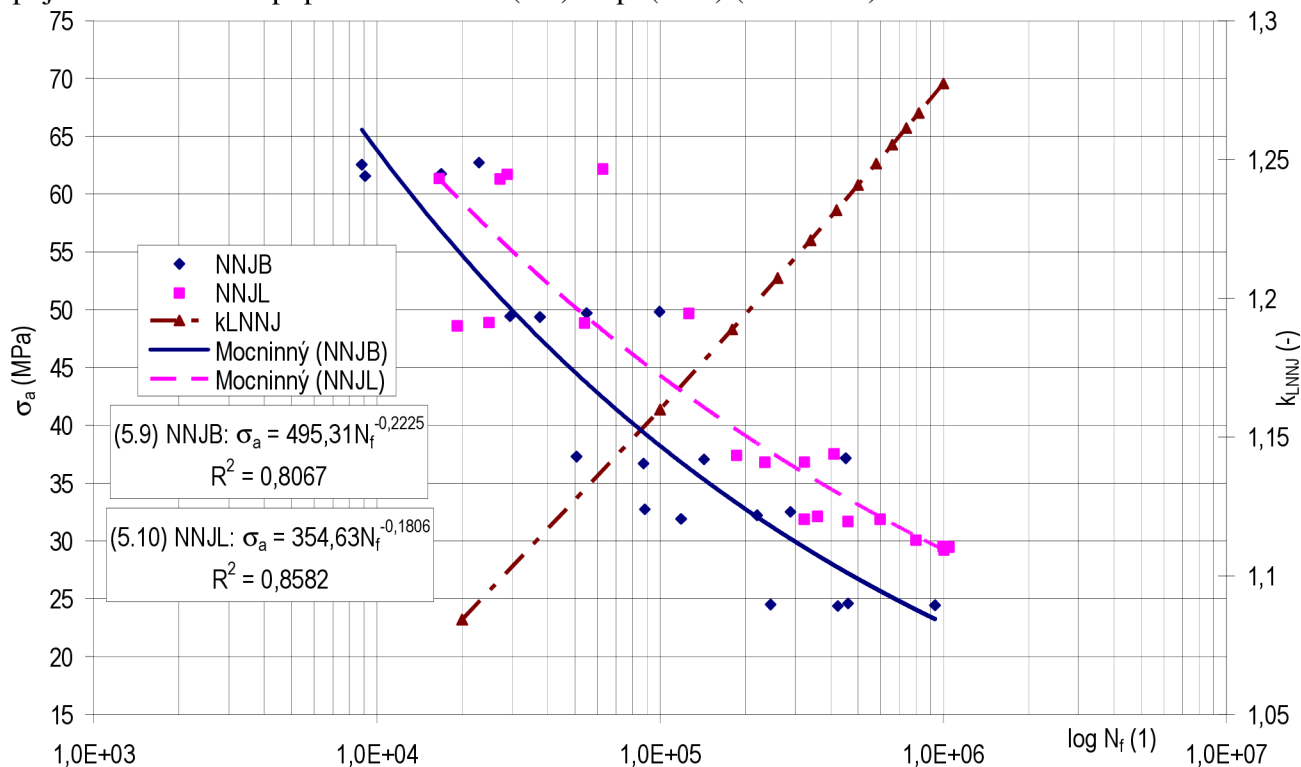
U spojov s pevnejšími plnými nitmi nedochádzalo pri vysokých hladinách zaťaženia k ich ustrihnutiu. Únavové poruchy sa postupne šírili v základnom materiáli až do poruchy spoja, naprieč celým únavovým spektrom od nízko cyklového až po vysoko cyklové zaťaženie. S vyššie uvedeníých dôvodov sa únavová porucha šírila rýchlejšie v spojoch bez lepidla NNPB. Typické poruchy spojov NNP sú na Obr. 5.10.



Obr. 5.10 Typické únavové poruchy spojov NNP: a) NNPB vysoko cyklová únava; b) NNPB nízko cyklová únava; c) NNPL vysoko cyklová únava; d) NNPL nízko cyklová únava

Spoje so zápusťnými nitmi a príložkou NNJ (Tab. 5.1) boli vyrobené s rovnakým problematickým zahĺbením ako v prípade vzoriek NNP. Takže negatívny vplyv na výsledné únavové vlastnosti je podobný. Z hľadiska celkového symmetrickejšieho zaťaženie spojov s príložkou mala v tomto prípade vrstva tmelu stabilizujúci vplyv. LNS vzorky NNJL tak dosahovali lepších únavových vlast-

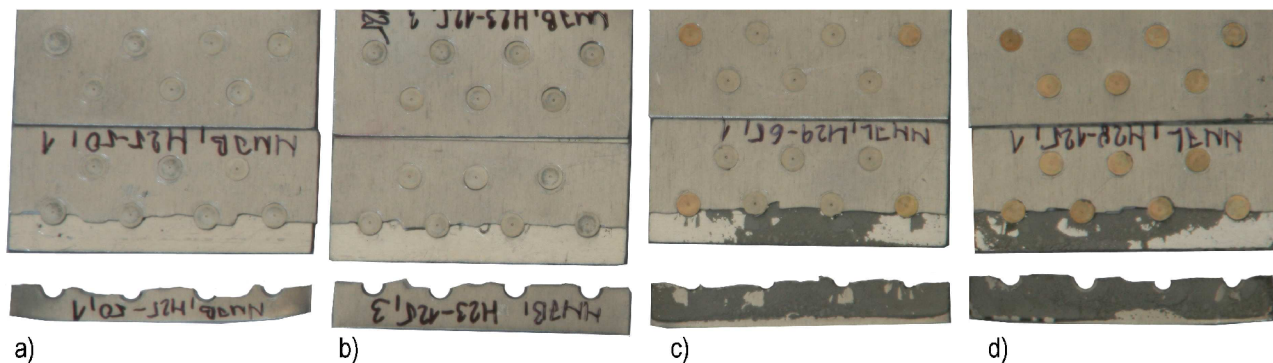
ností ako čisto nitované vzorky NNJP (Obr. 5.11). Namerané hodnoty závislostí $\sigma_a(N_f)$ sú pre spoje NNJB a NNJL popísané vzťahmi (5.9) resp. (5.10) (Obr. 5.11).



Obr. 5.11 S/N krivky vzoriek NNJB a NNJL a závislosť súčiniteľa vplyvu lepidla na počte cyklov do

$$\text{poruchy } k_{LNNJ}(N_f) = \frac{\sigma_{aNNJL}(N_f)}{\sigma_{aNNJB}(N_f)}$$

Podobne ako u spojov NNP bol charakter únavových porúch NNJ spojov rovnaký pri nízko i vysoko cyklovej únave (Obr. 5.12). Príložka na spoji zapríčinila, že zaťažujúca sila nespôsobovala až tak veľký prídavný ohyb spojov ako u vzoriek typu NNP. Odlupovanie lepidla na okrajoch preplátovaného spoja nebolo tak výrazné, takže si tmel v spojoch NNJL udržal svoju stabilizujúcu funkciu v celom rozsahu zaťažovacích hladín.

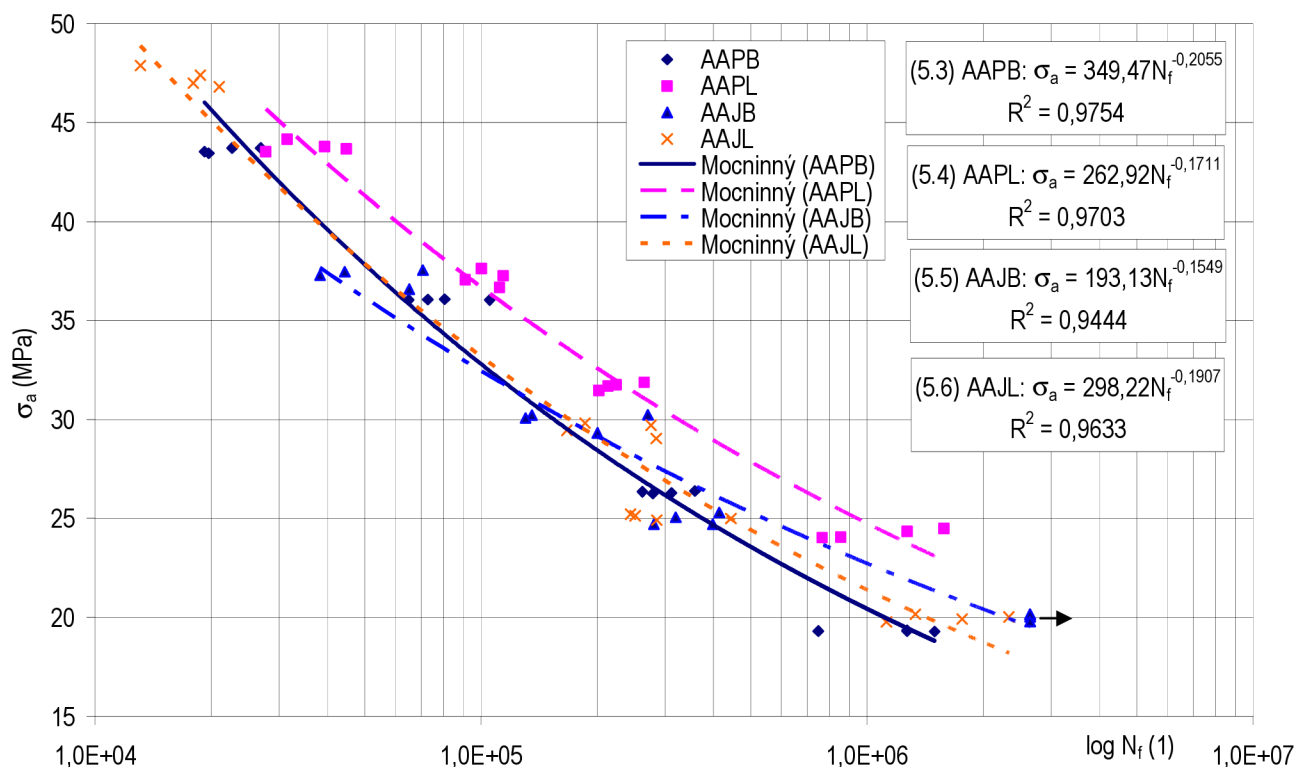


Obr. 5.12 Typické únavové poruchy spojov NNJ: a) NNJB vysoko cyklová únava; b) NNJB nízko cyklová únava; c) NNJL vysoko cyklová únava; d) NNJL nízko cyklová únava

5.3 Súhrn a hlavné závery únavových skúšok

Preukázateľne pozitívny vplyv lepidla PU – 50 na únavové vlastnosti bol potvrdený v prípade spojov AAPL. Pri vysoko cyklovej únave ($10^6 N_f$) dosahoval súčiniteľ vplyvu lepidla k_{LAAP} hodnotu 1,21. U tohto typu spojov bol vplyv lepidla posudzovaný i pri napäťovo deformačnej analýze, z ktorej vyplynulo, že vrstva lepidla znižuje napäťové špičky na otvoroch pre nity. Dosiahnuté únavové vlastnosti spojov AAPL tieto predpoklady potvrdzujú.

Trochu odlišná je situácia u spojov s príložkou AAJ. Vrstva tmelu v tomto prípade mierne vylepšila len charakteristiky pri nízko cyklovej únave. Pri vysoko cyklovej únave je aproximovaný súčiniteľ vplyvu lepidla $k_{LAAP} = 0,94$, čo znamená približne šesť percentný pokles napätia pre danú hladinu zaťaženia a počet cyklov do poruchy. Napriek tomu môžeme konštatovať, že celkovo bol vplyv lepidla na únavové vlastnosti spojov s trňovými nitmi mierne pozitívny. Zaujímavým zistením je, že príložka mala u spojov s lepidlom (AAPL vs. AAJL) vcelku významný negatívny vplyv na únavové vlastnosti v celom rozsahu testovaných hladín zaťaženia (Obr. 5.13). Naproti tomu u spojov bez lepidla (AAPB vs. AAJB) došlo pri vysoko cyklovej únave k významnému predĺženiu životnosti, pričom u spojov s príložkou AAJB nedošlo na hladine H35-40 k žiadnej únavovej poruche a skúška tejto vzorky bola prerušená pri dovŕšení 2 644 308 cykloch. Z celkového porovnania všetkých zostrojených S/N kriviek spojov s trňovými nitmi (Obr. 5.13) môžeme po aproximácii nameraných hodnôt odhadovať, že najlepšimi únavovými vlastnosti disponujú kombinované lepeno – nitované spoje typu AAPL.

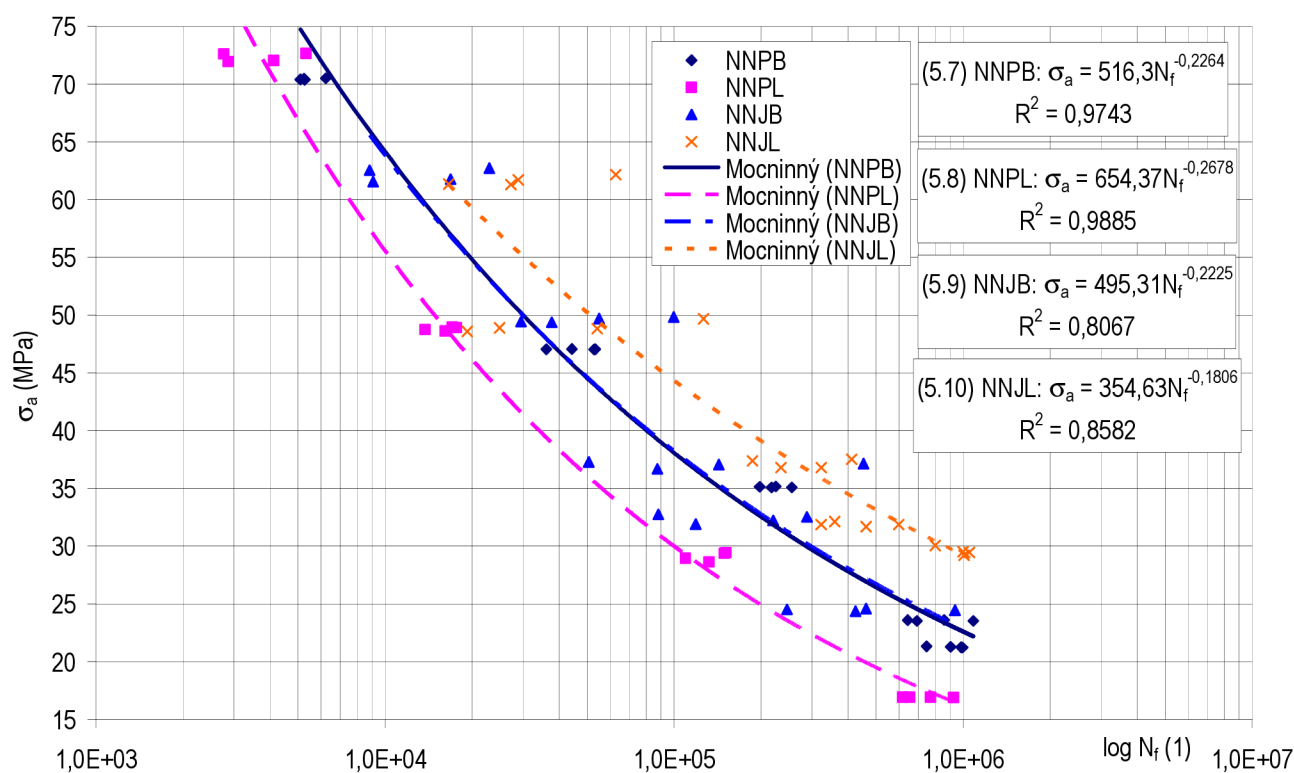


Obr. 5.13 Porovnanie S/N kriviek spojov s trňovými nitmi AAPB, AAPL, AAJB, AAJL

Únavové skúšky vzoriek s plnými zapustenými nitmi boli ovplyvnené významným koncentrátorom napätia v podobe ostrej hrany zahĺbenia otvorov. Pri porovnaní nameraných S/N kriviek (Obr. 5.14) zistujeme, že tri zo štyroch typov spojov (NNPB, NNJB, NNPL) dosiahli maximálne rovnaké hodnoty životnosti ako spoj AAPL vyrobený pomocou trňových nitov, ktoré majú o 40 % nižšiu

únosnosť než použité zápusťné nity NAS. Primárnym záverom je odporúčanie dodržiavať základné platné normy pri výrobe nitovaných spojov so zahĺbenými otvormi.

Vplyv tmelu PU – 50 môže byť u týchto vzoriek z vyššie uvedených dôvodov skreslený. Navzdory tomu sa objavilo niekoľko zaujímavých skutočností (Obr. 5.14). V prvom rade aj napriek značnému rozptylu hodnôt u spojov NNJB je zrejmé, že vplyv príložky bol u čisto nitovaných spojov zanedbateľný. Toto je v ostrom protiklade pri porovnaní vzoriek s aplikovanou vrstvou tmelu NNPL a NNJL. LNS vzorky s príložkou NNJL sa vyznačujú najlepšimi únavovými vlastnosťami zo všetkých štyroch testovaných typov spojov s plnými nitmi. Môžeme teda konštatovať, že vrstva lepidla zohrala pozitívnu úlohu pri zlepšení únavových vlastností. Avšak, keď vezmeme do úvahy, že samotná príložka nehrá veľkú rolu z hľadiska únavy (viď. NNPB a NNJB) potom musíme konštatovať, že najvýznamnejšiu úlohu pri zhoršení únavových vlastností spojov NNPL zohrala najmä vrstva tmelu. Vrstva tmelu, zvýšila významne koncentráciu napätia v oblasti ostrej hrany zahĺbenia v dôsledku zvýšenie sekundárneho ohybového namáhania na nity spôsobeného práve väčšou vzdialenosťou medzi adherendmi (cca 0,1 mm oproti 0,001 mm pri čisto nitovaných spojoch – Príloha 3). Vyplýva z toho, že pri nekvalitne prevedených spojoch, či už z hľadiska nitovania alebo lepenia, môže mať vrstva tmelu negatívny vplyv na zaťaženie nitov a následne i na celkové únavové vlastnosti kombinovaného spoja.



Obr. 5.14 Porovnanie S/N kriviek spojov s plnými nitmi NNPB, NNPL, NNJB, NNJL

6 ZÁVER

6.1 Vplyv lepidla na koncentrátoary napätia a únavové vlastnosti LNS

Koncentrácia napätia v okolí otvorov pre nity zásadne ovplyvňuje výsledné únavové vlastnosti celej nitovanej konštrukcie. Otvory pre nity tvoria vruby – koncentrátoary napätia v konštrukcii. Väčšina únavových trhlin práve preto vzniká v tejto ovplyvnenej oblasti. Jednou z ciest ako minimalizovať negatívny vplyv koncentrácie napätia a z nej vyplývajúcich napät'ových špičiek v oblasti otvorov pre nity je aplikácia lepidla. Predpokladom nepriamo overeným niekoľkými autormi ^[1, 2, 34] je, že vrstva lepidla zníži napät'ové špičky v okolí otvorov pre nity a tak pomôže eliminovať negatívny vrubový účinok nitových otvorov počas prevádzky lepeno – nitovanej konštrukcie. Iniciácia trhlin v oblasti otvorov pre nity sa z vyššie uvedených dôvodov spomalí, čo spôsobí zvýšenie únavovej životnosti konštrukcie.

Cieľom tejto práce bolo posúdiť vplyv lepidla – tmelu s nízkymi mechanickými charakteristikami na únavové vlastnosti kombinovaných lepeno – nitovaných spojov. Takéto typy spojov sa vo veľkej miere využívajú pri stavbe ľahkých lietadiel. Pričom doposiaľ nebola publikovaná súhrnná štúdia o únavových vlastnostiach LNS tvorených kombináciou trňových nitov a vysoko ťažného tmelu. Rovnako nebol doteraz komplexne popísaný a vyhodnotený ani vplyv tohto typu lepidla u LNS s trňovými nitmi na koncentrácie napätia a napät'ové špičky v ich okolí, čo má priamy súvis s výslednými únavovými vlastnosťami LNS a ovplyvňuje ich. A práve posúdenie vplyvu tmelu na koncentráciu napätia v okolí nitových otvorov (s priamou väzbou na ich únavové vlastnosti) bolo jedným z ďalších parciálnych cieľov tejto práce.

Napät'ovo deformačná analýza (kap. 4) preukázala priaznivý vplyv vrstvy vysoko ťažného lepidla na rozloženie napätia u kombinovaných lepeno – nitovaných spojov. Tento jav bol pozorovaný pri MKP simulácii i pri experimentálnom meraní pomerných deformácií na povrchu spojov. V rezoch lepeno – nitovaných spojov kritických z hľadiska únavy bol zaznamenaný pri MKP výpočte 20% pokles špičiek napätí v porovnaní z nitovanými spojmi. Experimentálne meranie deformácií potvrdilo predikciu výpočtových modelov, keďže bol na LNS voči NS nameraný 30% pokles maximálnych špičiek pomerných deformácií. Tieto analýzy boli vykonané na preplátovaných spojoch, ktorým zodpovedajú spoje typu AAPB a AAPL. Pri únavových skúškach vykonaných na týchto spojoch (AAPB, AAPL) sa zistilo, že vrstva lepidla v spojoch AAPL zvyšuje hodnoty napätí hladín zaťaženia pri dosiahnutí 10^6 cyklov do poruchy približne o 20%, na čom malo pravdepodobne najväčšiu zásluhu zníženie napät'ových špičiek na otvoroch pre nity.

Popis súvislostí medzi aplikáciou tmelu, distribúciou zaťaženia v lepeno – nitovaných spojoch a ich únavovými vlastnosťami je hlavným **vedeckým prínosom** tejto publikácie. Jedným z **prakticky aplikovateľných prínosov** je, že napr. namerané únavové charakteristiky vo forme štyroch sád S/N kriviek sa dajú využiť pri návrhu bezpečného únavového života ľahkých lietadiel z kategórií GA a ULL, ktoré patria k hlavnému portfóliu českého leteckého priemyslu.

Výsledky publikované v tejto dizertačnej práci boli prednesené na medzinárodnej konferencii RRDPAE ^[b], taktiež boli publikované v odbornom recenzovanom časopise Czech Aircraft Proceedings ^[45] a boli prezentované i na dvoch seminároch Centra leteckého a kozmického výskumu ^[a, e] a aj na medzinárodnej konferencii Int. PhD Conference v Plzni ^[f].

6.2 Dynamické vlastnosti LNS – nezodpovedané otázky

Kvôli časovej náročnosti únavových skúšok a veľkej vyťažnosti skúšobne Leteckého ústavu nebolo možné posúdenie vplyvu lepidla z hľadiska trvalej pevnosti – nebola meraná a porovnávaná medza únavy testovaných spojov. Ďalšími z nezodpovedaných otázok sú vplyvy prostredia (starnutie, korózia) a výrobných chýb na únavovú životnosť kombinovaných spojov. Z hľadiska prevádzky konštrukcií vyrobených pomocou kombinovaných spojov (trňové nity + tmel) by bolo teda vhodné zamerať výskum v tejto oblasti na tieto nevyriešené problémy:

- *Posúdenie vplyvu lepidla na trvalú pevnosť kombinovaných spojov (určenie medze pevnosti)*
- *Posúdenie vplyvu starnutia a degradácie lepidla na únavové vlastnosti LNS (rôzna kvalita lepenia: výrobné chyby, degradácia časom)*
- *Posúdenie a popis súčasného pôsobenia únavy, starnutia a korózie na LNS (klimatotechnologické testy + únavové skúšky)*

K určení medze pevnosti bude pravdepodobne nutné u nitovaných i kombinovaných spojov typu AAP i AAJ (Tab. 5.1) ich testovanie na minimálne dvoch ďalších hladinách zaťaženia.

Simulácia výrobných chýb a starnutia je jedným zo spôsobov komplexnejšieho testovania dynamických vlastností LNS. Tieto testy sú výhodné najmä z ekonomického hľadiska. Dané chyby a predpokladané degradačné poruchy sú vedome zakomponované do spoja už pri jeho výrobe. Vychádzať by sa malo z únavových skúšok a z dostupných hodnôt medzí únavy σ_c . Pre daný typ spoja sa vyrobí ďalšie sady vzoriek – reťazí (Obr. 5.1) s odlišnými mierami poškodenia lepidla napr.:

- *nedokonalé lepenie: simulácia výrobných chýb, cca 30% povrchu lepeného spoja bude pred lepením nerovnomerne pokrytých kúskami PVC fólie.*
- *úplná degradácia lepidla: vzorky sa zlepia, roztrhnú a následne znitujú*

Takto vyrobené spoje – reťaze by bolo vhodné testovať na hladine zaťaženia s amplitúdou zodpovedajúcou medzi únavy daných lepeno – nitovaných vzoriek aby bolo možné predbežne odhadnúť správanie spojov počas dlhodobej prevádzky v reálnych atmosférických podmienkach.

Reálnym prevádzkovým podmienkam sa najviac približuje kombinácia klimatotechnologických a únavových testov. Tak isto ako pri simulácii starnutia a výrobných chýb by sa pre konkrétny typ spoja vyrobili ďalšie kusy identických lepeno – nitovaných vzoriek, ako v prípade únavových skúšok. Predchádzajúce výskumy ^[13] ukázali, že najnepriaznivejšie na lepeno – nitované spoje pôsobia relatívna vlhkosť 95 – 100% pri teplote 70°C, slaná hmla (35°C) a teplotné cykly $\pm 20/50^\circ\text{C}$. Vzorky sa vystavia pôsobeniu týchto degradačných prostredí a procesov. Po uplynutí stanovenej doby (cyklov) by boli vzorky cyklicky zaťažované s konštantnou amplitúdou napätia na úrovni medze únavy neovplyvnených lepeno – nitovaných vzoriek.

Ak to bude možné pre každé z týchto prostredí sa zostrojí závislosť medzi medzou únavy a dobou pôsobenia daného prostredia. Na základe týchto závislostí bude možné následne korigovať veľkosť medze únavy na vplyvy konkrétnych prostredí.

LITERATÚRA

- [1] Klement, J., Kachlík, P., Michl, D.: *Lepeno – nýtované spoje s trnovými nýty*, LÚ 04/2002/CLKV, Brno, 2002
- [2] Duda, J.: *Lepené nýtované spoje*, EVEKTOR-AEROTECHNIK, LNS 001.01, Kunovice, 2001
- [3] ESDU 79031: *Endurance of Riveted Lap Joints (Aluminium Alloy Sheet and Rivets)*, 1979
- [4] ESDU 89046: *Fatigue of Aluminium Alloy Joints with Various Fastener Systems. Low Load Transfer*, 1989
- [5] Imanaka, M.; Haraga, K.; Nishikawa, T.: *Fatigue Strength of Adhesive/Rivet Combined Lap Joints*, *The Journal of Adhesion*, 1995, Vol. 49, No. 3-4, p. 197-209, ISSN 1545-5823
- [6] Boehm, L.: *New Engineering Processes in Aircraft Construction: Application of Laser Beam and Friction Stir Welding*, MAIK Nauka, 2005, Vol. 31, No. 1, p. 27-29, ISSN 1087-6596
- [7] Cryns, B.: *Laser Weld Bonding for Aircraft*, EWI Insights, 2005, Vol. 18.2.2
- [8] Lieng-Huan Lee: *Adhesive Bonding*, Plenum Press, New York, 1991, 454 p., ISBN 0-306-43471-7
- [9] Gao, D.: *A New One-Sided Joining Process for Aluminium Alloys: Friction Stir Blind Riveting*, *Journal of Manufacturing Sciences and Engineering*, 2009, Vol. 131, No 6, 12 p., DOI 10.1115/1.4000311
- [10] Flaška, M.; Růžička, A.; Štekner, B.: *Speciální letecké technologie*, ČVUT, Praha, 1984
- [11] National Transportation Safety Board: *Aircraft Accident Report – Aloha Airlines, Flight 243, Boeing 737-200*; NTSB/AAR-89/03, Washington D.C., 1989
- [12] Ford, T.: *A continuing challenge*, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2004, Vol. 76, No. 5, p. 527-532, ISSN 0002-2667
- [13] Klement, J.; Kachlík, P.: *Influence of ageing on rivet – bonded joint properties*, *Aviation*, 2005, Vol. IX, No. 2, p. 24-28, ISSN 1648-7788
- [14] Atre, A.; Johnson, W. S.: *Analysis of the Effects of Interference and Sealant on Riveted Lap-Joints*, *Journal of Aircraft*, 2007, Vol. 44, No. 2, p. 353-364, ISSN 0021-8669
- [15] Liu, J.; Sawa, T.: *Stress analysis and strength evaluation of single-lap adhesive joints combined with rivets under external bending moments*, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001, Vol. 15, No. 1, p. 43-61, ISSN 0169-4243
- [16] Fongsamootr, T.; Sutcharikul, T.; Rubin, C. A.: *Distortion analyses of combined adhesive-riveted lap joints*, *Strength, Fracture and Complexity*, 2004, Vol. 2, No. 4, p. 137-147, ISSN 1567-2069

- [17] Fitzgerald, T. J.; Cohen, J. B.: *Residual stresses in and around rivets in clad aluminium alloy plates*, Materials Science and Engineering, 1994, A188, p. 51- 58
- [18] Müller, R. P. G.: *An experimental and analytical investigation on the fatigue behaviour of fuselage riveted lap joints. The significance of the rivet squeeze force, and a comparison of 2024-T3 and Glare 3*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1995
- [19] de Rijck J.J.M.; a kol.: *The driven rivet head dimensions as an indication of the fatigue performance of aircraft lap joints*, International Journal of Fatigue, 2007, Vol. 29, No. 12, p. 2208-2218, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2006.12.010
- [20] Li., G.; Shi G.; Bellinger, N. C.: *Studies of Residual Stress in Single-Row Countersunk Riveted Lap Joints*, Journal of Aircraft, 2006, Vol. 43, No. 3, p. 592-599, ISSN 0021-8669
- [21] Markiewicz, E.; a kol.: *Analyses of Riveting Process Forming Mechanism*, Journal of Materials and Product Technology, 1998, Vol. 13, No. 3-6, p. 123-145
- [22] Langrand, B.; a kol.: *Riveted Joint Modeling for Analysis of Airframe Crashworthiness*, Finite Elements in Analysis and Design, 2001, Vol.38, p.21-44
- [23] Eastaugh, G. F.; a kol.: *An Experimental Study of Corrosion/Fatigue Interaction in the Development of Multiple Site Damage in Longitudinal Fuselage Skin Splices*, Fatigue in the presence of corrosion, 1998, RTO MP 18, p. 20.1-20.16, ISBN 92-837-1011-8
- [24] Eastaugh, G. F.; a kol.: *A Special Uniaxial Coupon Test Specimen for the Simulation of Multiple Site Fatigue Crack Growth and Link-Up in Fuselage Skin Splices*, Agard Conference Proceedings 586, 1995
- [25] Silva, L. F. M.; a kol.: *Multiple-site Damage in Riveted Lap-Joints: Experimental Simulation and Finite Element Prediction*, International Journal of Fatigue, 2000, Vol. 22, No. 4, p. 319-338, DOI: 10.1016/S0142-1123(99)00129-2
- [26] de Matos, P.F.P.; a kol.: *Residual stress effect on fatigue striation spacing in a cold-worked rivet hole*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2004, Vol. 42, No. 2 p. 139–148
- [27] de Castro, P. M. S. T.; a kol.: *An Overview on Fatigue Analysis of Aeronautical Structural Details: Open Hole, Single Rivet Lap-Joint and Lap Joint Panel*, Material Science Engineering: A, 2007, Vol. 468-470, p. 144-157, DOI: 10.1016/j.msea.2006.06.147
- [28] Kelly, B.; Costelo, C.: *FEA modelling of setting and mechanical testing of aluminium blind rivets*, Journal of Materials Processing Technology, 2004, Vol. 153-154, p. 74-79
- [29] Cebulski, L; a kol.: *Experimental and Numerical Behavior of Railway Rivets under Quasi Static Promptings*, Engineering Computations, Bradford: 2003. Vol. 20, No. 7/8; p. 795-809
- [30] Adamík, P.: *Stress – Strain Analysis of Blind Rivet Assembling Process with Consequent Shear Strenght Testing Modelled in FEA*, Letecký zpravodaj, No. 2, 2005

- [31] Li, G.; Lee-Sullivan, P.: *Finite element and experimental studies on single-lap balanced joints in tension*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 2001, Vol. 21, No. 3, p. 211-220
- [32] Oplinger, D.W.: *Effects of adherend deflections in single lap joints*, International Journal of Solids and Structures, 1994, Vol. 31, No. 18, p. 2565-2587
- [33] Hoang-Ngoc, C. T.; Paroissien, E.: *Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive*, International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009, DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2009.12.002
- [34] Dechwayukul, Ch.: *Development of a thin adhesive layer analysis for riveted and other structural joints*, Ph.D. Thesis, Vanderbilt University, 2001
- [35] Dechwayukul, Ch.; Rubin, C.; Hahn, G.: *Analysis of the Effects of Thin Sealant Layers on Aircraft Structural Joints*, AIAA Journal, 2003, Vol. 41, No. 11, p. 2216-2228
- [36] Fongsamootr, Th.: *The dilational and compressive properties of a polymer sealant and analyses of the distortion and fatigue of sealed riveted lap joints*, Ph.D. Thesis, Vanderbilt University, 2001
- [37] Atre, A.: *A finite element and experimental investigation on the fatigue of riveted lap joints in aircraft application*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2006
- [38] Imanaka, M.; Haraga, K.; Nishikawa, T.: *Strength distributions of adhesive bonded and adhesive/riveted combined joints*, Journal of Society of Material Science, 1992, Vol. 41, No. 470, p. 1662-1667
- [39] Imanaka, M.; a kol.: *Fatigue strength and stress distributions of adhesive/rivets combined joints*, The Society of Material Science, 1989
- [40] Kopřiva, T.: *Zvláštní technologie v letecké výrobě, část III., Lepení a nýtování v letecké výrobě*, Vojenská Akademie Antonína Zápotockého, 1986
- [41] ČSN EN 2243 – 5: *Konstrukční lepidla. Zkušební metody. Část 5: Zkoušení stárnutí*
- [42] Vlieger, H.; Ottens, H. H.: *Uniaxial and Biaxial Tests on Riveted Fuselages Lap Joint Specimens*, FAA final report DOT/FAA/AR-98/33, Washington, 1998
- [43] Bělohradský, T.: *Zadání únavové zkoušky typických nýtových spojů letounu VUT 100*, Letecký ústav, LUZA 7/2004, 2004
- [44] Augustin, P.; Zablazský, J.: *Metodika únavové zkoušky typických nýtových spojů letounu VUT 100*, Letecký ústav, LUVY 5/2004, 2004

PUBLIKÁCIE AUTORA

- [45] Urík, T.; Adamík, P.: *Relation between stress concentration around rivet hole and fatigue properties of blind rivet and rivet – bonded joints*, Czech Aircraft Proceedings, 2008, Vol. 2008, No. 2, p. 40-44, ISSN 1211-877X
- [46] Urík, T.: *Fatigue properties of rivet – bonded joints*, In Book of Abstracts – 2nd International PhD Conference on Mechanical Engineering, Plzeň, 2004, p. 133-266, ISBN 80-7043-330-2
- [47] Urík, T.; Mališ, M.: *Innovative Composite Structures for Small Aircraft*, In CD PROCEEDINGS, Anchorage, Alaska, USA: Optimage Ltd., Edinburgh, UK, 2008. s. 1-7. ISBN: 0-9533991-7- 6
- [48] Mihalides, D.; Urík, T.: *Fatigue Life Evaluation of Composite Structures*, Czech Aircraft Proceedings, 2008, Vol. 2008, No. 1, p. 6-10, ISSN: 1211- 877X
- [49] Píštěk, A.; Hlinka, J.; Urík, T.; Šplíchal, M.: *VUT 001 MARABU: Design philosophy and realization of an experimental aircraft supporting UAV applications in civil sector*. In Unmanned Air Vehicle Systems. Bristol, UK: University of Bristol, 2009, p. 37.1 (11 s.) ISBN: 978-0-9552644-5-0
- [50] Urík, T.: *Statická zkouška únosnosti nýtových spojů letounu VUT-100*, Letecký ústav, LÚ P18-2006, 2006
- [51] Kachlík, P., Urík, T.: *Zkoušky lepeno – nýtovaných spojů*, Letecký ústav, LÚ 63/2005, 2005
- [52] Urík, T.: *Stanovenie parametrov pre použitie kompozitovej konštrukcie*, EVEKTOR, Kunovice, 2004
- [53] Urík, T.: *Recyklácia kompozitných konštrukcií – súčasný stav*, CLKV, LÚ 17/2006, 2006

Konferencie

- [a] Urík, T.: *Vztah mezi koncentrací napětí v okolí otvoru pro nýt a únavovými vlastnostmi nýtovaných a lepeno – nýtovaných spojů*, příspěvek na semináři CLKV, Praha, 2009
- [b] Urík, T.; Adamík, P.: *Relation between stress concentration around rivet hole and fatigue properties of blind rivet and rivet – bonded joints*, International Conference RRDPAE, Brno, 2008
- [c] Urík, T.: *Innovative Composite Structures for Small Aircraft*, International Conference ICAS 20008, Alaska, USA, 2008
- [d] Doupník, P.; Urík, T.: *Návrh, aerodynamická optimalizace a výroba křídla pro malý bezpilotní prostředek*, FSI Junior konference 2007 - konference vědecko-výzkumných prací doktorandů: nejlepší práce – sekce konstrukce, Brno, 2007
- [e] Urík, T.: *Unavové vlastnosti lepeno nitovaných spojov*, příspěvek na semináři CLKV, Praha, 2005
- [f] Urík, T.: *Fatigue properties of rivet – bonded joints*, 2nd International PhD Conference on Mechanical Engineering, Plzeň, 2004

Vedecko - výskumná činnosť

- [g] Popela, R.; Zikmund, P.; Urík, T.; Mihalides, D.; Doupník, P.: VUT 700 SPECTO; VUT 700 SPECTO. Letecký ústav FSI, VUT v Brně. (funkční vzorek)
- [h] Píštěk, A.; Juračka, J.; Urík, T.: OK- VUT; Letoun VUT 001 Marabu. LKJI. (prototyp)
- [i] Urík, T.: MWCS: Mnohostojinová kompozitní konstrukce. LU. (funkční vzorek)
- [j] Urík, T.; Mališ, M.; Šplíchal, J.; Juračka, J.: Technologie výroby kompozitní sendvičové konstrukce s využitím počítačové podpory konstruování, PLASTSERVIS-L, s.r.o.. (ověřená technologie)
- [k] Urík, T.: GEOCS: Geodetická kompozitní konstrukce. LU. (funkční vzorek)

Pedagogická činnosť

Technologie letecké výroby I, II, cvičenia (2003 – 2010)

Počítačová podpora konstruování a výroby, prednášky, cvičenia, (2006 – 2010)

Computer Aided Design and Manufacturing, prednášky, cvičenia, (2006 – 2010)



Príloha 1 – Rozmery únavových vzoriek



Ozn. sk. vzorky	Hladina zataženia	Číslo nit. Spoja	Rez'								t (mm)	b (mm)
			Hrúbka t_i (mm)				Šírka b_i (mm)					
			I	II	III	IV	I	II	III	IV		
NNPB	H01 – 75	1	0,78	0,79	0,80	0,79	61,37	61,37	61,41	61,42	0,765	61,393
		2	0,8	0,79	0,78	0,79	61,36	61,39	61,45	61,47	0,764	61,418
		3	0,79	0,79	0,79	0,79	61,53	61,53	61,24	61,25	0,764	61,388
		4	0,79	0,79	0,78	0,78	61,41	61,42	61,39	61,36	0,763	61,395
	H02 – 150	1	0,78	0,78	0,79	0,79	61,32	61,34	61,37	61,33	0,763	61,340
		2	0,79	0,78	0,78	0,78	61,52	61,51	61,29	61,28	0,762	61,400
		3	0,79	0,79	0,78	0,78	61,2	61,18	61,5	61,52	0,762	61,350
		4	0,78	0,78	0,78	0,78	61,46	61,48	61,37	61,35	0,761	61,415
	H03 – 100	1	0,79	0,79	0,79	0,79	61,35	61,37	61,32	61,26	0,761	61,325
		2	0,79	0,79	0,78	0,78	61,44	61,34	61,37	61,38	0,761	61,383
		3	0,78	0,78	0,79	0,79	61,29	61,32	61,44	61,46	0,760	61,378
		4	0,78	0,78	0,78	0,78	61,51	61,49	61,33	61,32	0,760	61,413
	H04 – 50	1	0,78	0,79	0,78	0,78	61,33	61,35	61,48	61,47	0,760	61,408
		2	0,78	0,78	0,79	0,78	61,51	61,52	61,4	61,38	0,759	61,453
		3	0,78	0,79	0,78	0,78	61,34	61,35	61,33	61,31	0,759	61,333
		4	0,78	0,78	0,78	0,78	61,29	61,27	61,33	61,35	0,759	61,310
	H05 – 45	1	0,78	0,78	0,78	0,78	61,35	61,34	61,45	61,54	0,758	61,420
		2	0,78	0,78	0,78	0,78	61,36	61,4	61,45	61,43	0,757	61,410
		3	0,78	0,78	0,78	0,78	61,41	61,42	61,27	61,28	0,756	61,345
		4	0,78	0,79	0,78	0,78	61,28	61,26	61,31	61,32	0,756	61,293
H00 – ST	1	0,77	0,77	0,77	0,77	61,11	61,12	61,21	61,2	0,755	61,160	
	2	0,77	0,77	0,77	0,77	61,16	61,13	61,1	61,11	0,754	61,125	
	3	0,77	0,77	0,77	0,77	61,15	61,12	61,18	61,19	0,754	61,160	
	4	0,77	0,77	0,77	0,77	61,21	61,17	60,95	60,97	0,753	61,075	
AAPB	H06 – ST	1	0,8	0,79	0,79	0,78	61,33	61,34	61,5	61,51	0,752	61,420
		2	0,79	0,79	0,79	0,79	61,54	61,55	61,34	61,34	0,751	61,443
		3	0,79	0,79	0,79	0,79	61,31	61,27	61,47	61,47	0,750	61,380
		4	0,79	0,79	0,79	0,78	61,49	61,51	61,35	61,34	0,750	61,423
	H07 – 55	1	0,79	0,78	0,79	0,79	61,35	61,38	61,56	61,57	0,749	61,465
		2	0,79	0,79	0,79	0,79	61,56	61,55	61,36	61,38	0,748	61,463
		3	0,79	0,78	0,79	0,78	61,31	61,29	61,51	61,49	0,747	61,400
		4	0,79	0,78	0,79	0,78	61,47	61,48	61,35	61,33	0,746	61,408
	H08 – 75	1	0,78	0,78	0,79	0,78	61,34	61,36	61,32	61,31	0,745	61,333
		2	0,79	0,79	0,78	0,78	61,27	61,26	61,46	61,44	0,744	61,358
		3	0,78	0,78	0,78	0,78	61,41	61,42	61,49	61,5	0,744	61,455
		4	0,79	0,78	0,78	0,78	61,55	61,54	61,35	61,33	0,743	61,443
	H09 – 40	1	0,78	0,78	0,78	0,78	61,37	61,35	61,35	61,32	0,742	61,348
		2	0,78	0,78	0,78	0,78	61,26	61,22	61,49	61,47	0,742	61,360
		3	0,78	0,78	0,78	0,78	61,44	61,47	61,28	61,29	0,741	61,370
		4	0,78	0,79	0,79	0,78	61,24	61,22	61,35	61,37	0,741	61,295
	H10 – 90	1	0,78	0,78	0,78	0,78	61,43	61,41	61,58	61,53	0,740	61,488
		2	0,78	0,78	0,78	0,78	61,56	61,51	61,38	61,35	0,739	61,450
		3	0,78	0,78	0,78	0,78	61,35	61,31	61,22	61,11	0,738	61,248
		4	0,78	0,78	0,78	0,78	61,21	61,15	61,44	61,42	0,737	61,305

Ozn. sk. vzorky	Hladina zafaženia	Číslo nit. Spoja	Rez'								t (mm)	b (mm)
			Hrúbka t _i (mm)				Šírka b _i (mm)					
			I	II	III	IV	I	II	III	IV		
NNPL	H11 – 150	1	0,75	0,75	0,74	0,74	61,45	61,51	61,26	61,25	0,745	61,368
		2	0,74	0,74	0,74	0,74	61,36	61,34	61,25	61,26	0,740	61,303
		3	0,74	0,74	0,74	0,74	61,24	61,22	61,29	61,33	0,740	61,270
		4	0,74	0,74	0,75	0,75	61,29	61,31	61,59	61,64	0,745	61,458
	H12 – 100	1	0,74	0,74	0,74	0,73	61,23	61,27	61,19	61,2	0,738	61,223
		2	0,73	0,74	0,73	0,73	61,25	61,29	61,29	61,31	0,733	61,285
		3	0,73	0,74	0,74	0,73	61,36	61,34	61,22	61,2	0,735	61,280
		4	0,73	0,73	0,73	0,74	61,23	61,27	61,23	61,27	0,733	61,250
	H13 – 60	1	0,74	0,75	0,75	0,75	61,76	61,78	61,29	61,31	0,748	61,535
		2	0,75	0,7	0,74	0,74	61,3	61,29	61,2	61,18	0,733	61,243
		3	0,74	0,74	0,73	0,73	61,2	61,21	60,53	60,56	0,735	60,875
		4	0,73	0,73	0,76	0,76	60,64	60,66	61,51	61,53	0,745	61,085
	H14 – 35	1	0,74	0,74	0,75	0,75	61,25	61,31	60,61	60,6	0,745	60,943
		2	0,75	0,75	0,74	0,74	60,62	60,6	61,23	61,26	0,745	60,928
		3	0,74	0,75	0,75	0,75	61,25	61,22	60,25	60,22	0,748	60,735
		4	0,75	0,76	0,75	0,75	59,94	59,91	61,11	61,07	0,753	60,508
	H15 – ST	1										
		2	0,73	0,73	0,73	0,73	61,27	61,25	61,14	61,12	0,730	61,195
		3	0,73	0,73	0,73	0,73	61,07	61,03	61,33	61,31	0,730	61,185
		4										
AAPL	H16 – 90	1	0,74	0,74	0,75	0,75	61,32	61,23	60,59	60,61	0,745	60,938
		2	0,76	0,75	0,74	0,73	60,56	60,51	60,65	60,61	0,745	60,583
		3	0,73	0,73	0,75	0,75	60,68	60,62	60,32	60,28	0,740	60,475
		4	0,75	0,75	0,74	0,74	60,28	60,29	61,23	61,22	0,745	60,755
	H17 – 75	1	0,74	0,74	0,74	0,73	61,25	61,23	60,59	60,57	0,738	60,910
		2	0,72	0,73	0,72	0,72	60,64	60,61	60,54	60,52	0,723	60,578
		3	0,73	0,73	0,73	0,73	60,52	60,49	60,59	60,6	0,730	60,550
		4	0,73	0,73	0,73	0,73	60,57	60,54	61,24	61,22	0,730	60,893
	H18 – 65	1	0,75	0,75	0,74	0,74	61,24	61,22	60,59	60,56	0,745	60,903
		2	0,74	0,74	0,75	0,74	60,59	60,55	60,51	60,52	0,743	60,543
		3	0,74	0,74	0,74	0,74	60,53	60,5	60,55	60,58	0,740	60,540
		4	0,74	0,74	0,74	0,74	60,54	60,56	61,23	61,24	0,740	60,893
	H19 – 50	1	0,75	0,75	0,75	0,75	61,21	61,22	60,65	60,64	0,750	60,930
		2	0,75	0,75	0,73	0,73	60,61	60,59	60,58	60,57	0,740	60,588
		3	0,74	0,74	0,75	0,75	60,58	60,56	60,54	60,55	0,745	60,558
		4	0,75	0,75	0,75	0,75	60,54	60,53	61,19	61,22	0,750	60,870
	H20 – ST	1										
		2	0,74	0,74	0,74	0,75	60,45	60,5	60,52	60,5	0,743	60,493
		3	0,75	0,75	0,72	0,72	60,53	60,55	60,51	60,54	0,735	60,533
		4										

Ozn. sk. vzorky	Hladina zafaženia	Číslo nit. Spoja	Rez'								t (mm)	b (mm)
			Hrúbka t _i (mm)				Šírka b _i (mm)					
			I	II	III	IV	I	II	III	IV		
NNJB	H21 – 100	1	0,73	0,73	0,73	0,73	61,19	61,21	60,44	60,57	0,730	60,853
		2	0,72	0,72	0,74	0,74	60,51	60,54	60,52	60,5	0,730	60,518
		3	0,74	0,74	0,73	0,73	60,5	60,48	60,53	60,55	0,735	60,515
		4	0,73	0,73	0,73	0,73	60,54	60,53	60,2	60,21	0,730	60,370
	H22 – 75	1	0,73	0,73	0,75	0,74	61,25	61,22	60,49	60,52	0,738	60,870
		2	0,74	0,73	0,73	0,73	60,55	60,53	60,52	60,5	0,733	60,525
		3	0,74	0,74	0,72	0,72	60,5	60,46	60,49	60,51	0,730	60,490
		4	0,73	0,73	0,73	0,73	60,53	60,54	61,22	61,21	0,730	60,875
	H23 – 125	1	0,74	0,73	0,73	0,73	61,21	61,24	60,53	60,51	0,733	60,873
		2	0,73	0,72	0,72	0,72	60,58	60,54	60,58	60,59	0,723	60,573
		3	0,72	0,72	0,73	0,73	60,54	60,53	60,53	60,5	0,725	60,525
		4	0,73	0,73	0,73	0,73	60,51	60,53	61,24	61,25	0,730	60,883
	H24 – 65	1	0,73	0,73	0,74	0,74	61,18	61,22	60,51	60,53	0,735	60,860
		2	0,73	0,73	0,72	0,72	60,52	60,53	60,57	60,56	0,725	60,545
		3	0,72	0,72	0,72	0,72	60,54	60,53	60,55	60,52	0,720	60,535
		4	0,72	0,73	0,73	0,73	60,55	60,57	61,21	61,23	0,728	60,890
H25 – 50	1	0,73	0,73	0,75	0,75	61,18	61,19	60,59	60,49	0,740	60,863	
	2	0,74	0,74	0,73	0,74	60,51	60,5	60,54	60,52	0,738	60,518	
	3	0,74	0,74	0,74	0,74	60,54	60,5	60,57	60,56	0,740	60,543	
	4	0,73	0,73	0,74	0,75	60,55	60,54	61,26	61,23	0,738	60,895	
NNJL	H26 – 100	1	0,74	0,74	0,75	0,75	60,83	60,69	60,52	60,58	0,745	60,655
		2	0,75	0,74	0,74	0,74	60,58	60,57	60,51	60,54	0,743	60,550
		3	0,75	0,75	0,74	0,73	60,52	60,51	60,5	60,47	0,743	60,500
		4	0,73	0,73	0,73	0,73	60,42	60,47	60,59	60,73	0,730	60,553
	H27 – 75	1	0,74	0,74	0,73	0,73	61,22	61,2	60,55	60,54	0,735	60,878
		2	0,72	0,73	0,72	0,73	60,53	60,55	60,54	60,53	0,725	60,538
		3	0,73	0,73	0,72	0,73	60,53	60,53	60,54	60,55	0,728	60,538
		4	0,72	0,72	0,75	0,75	60,56	60,55	61,21	61,2	0,735	60,880
	H28 – 125	1	0,74	0,73	0,73	0,74	61,22	61,21	60,53	60,54	0,735	60,875
		2	0,74	0,74	0,74	0,74	60,59	60,56	60,43	60,47	0,740	60,513
		3	0,75	0,75	0,72	0,72	60,53	60,5	60,55	60,54	0,735	60,530
		4	0,72	0,72	0,73	0,73	60,59	60,6	61,24	61,21	0,725	60,910
	H29 – 65	1	0,74	0,74	0,74	0,74	61,19	61,19	60,56	60,55	0,740	60,873
		2	0,74	0,74	0,74	0,74	60,54	60,53	60,53	60,51	0,740	60,528
		3	0,74	0,74	0,74	0,74	60,54	60,54	60,57	60,52	0,740	60,543
		4	0,73	0,73	0,73	0,73	60,51	60,5	61,22	61,2	0,730	60,858
H30 – 60	1	0,72	0,72	0,72	0,72	61,25	61,21	60,55	60,51	0,720	60,880	
	2	0,72	0,73	0,75	0,75	60,5	60,53	60,54	60,53	0,738	60,525	
	3	0,74	0,74	0,75	0,75	60,52	60,55	60,53	60,54	0,745	60,535	
	4	0,74	0,74	0,73	0,73	60,52	60,53	61,2	61,21	0,735	60,865	

Ozn. sk. vzorky	Hladina zafaženia	Číslo nit. Spoja	Rez'								t (mm)	b (mm)
			Hrúbka t _i (mm)				Šírka b _i (mm)					
			I	II	III	IV	I	II	III	IV		
AAJB	H31 – 75	1	0,75	0,75	0,73	0,73	61,19	61,17	60,51	60,49	0,740	60,840
		2	0,73	0,73	0,73	0,73	60,47	60,49	60,49	60,5	0,730	60,488
		3	0,73	0,73	0,72	0,72	60,52	60,51	60,49	60,5	0,725	60,505
		4	0,72	0,71	0,73	0,73	60,51	60,51	61,15	61,14	0,723	60,828
	H32 – 60	1	0,75	0,75	0,73	0,72	61,32	61,31	60,53	60,54	0,738	60,925
		2	0,72	0,72	0,72	0,72	60,55	60,53	60,55	60,52	0,720	60,538
		3	0,72	0,72	0,72	0,72	60,54	60,56	60,48	60,47	0,720	60,513
		4	0,71	0,71	0,73	0,73	60,48	60,48	61,22	61,25	0,720	60,858
	H33 – 50	1	0,73	0,73	0,73	0,73	61,23	61,22	60,47	60,48	0,730	60,850
		2	0,74	0,74	0,73	0,73	60,49	60,48	60,47	60,47	0,735	60,478
		3	0,72	0,72	0,72	0,71	60,48	60,48	60,51	60,49	0,718	60,490
		4	0,71	0,71	0,73	0,73	60,53	60,51	61,18	61,18	0,720	60,850
	H34 – 95	1	0,74	0,73	0,73	0,73	61,2	61,19	60,49	60,48	0,733	60,840
		2	0,72	0,72	0,73	0,73	60,51	60,48	60,48	60,47	0,725	60,485
		3	0,73	0,73	0,72	0,72	60,47	60,47	60,43	60,38	0,725	60,438
		4	0,72	0,72	0,75	0,74	60,35	60,34	61,18	61,19	0,733	60,765
	H35 – 40	1	0,72	0,72	0,72	0,72	61,32	61,21	60,59	60,55	0,720	60,918
		2	0,72	0,72	0,72	0,72	60,54	60,52	60,54	60,58	0,720	60,545
		3	0,72	0,72	0,72	0,72	60,51	60,59	60,48	60,46	0,720	60,510
		4	0,72	0,72	0,74	0,74	60,46	60,45	61,23	61,2	0,730	60,835
AAJL	H36 – 75	1	0,73	0,73	0,73	0,72	61,15	61,14	60,46	60,46	0,728	60,803
		2	0,72	0,72	0,72	0,72	60,45	60,47	60,49	60,49	0,720	60,475
		3	0,72	0,72	0,72	0,72	60,48	60,47	60,45	60,44	0,720	60,460
		4	0,72	0,72	0,73	0,73	60,48	60,46	61,19	61,16	0,725	60,823
	H37 – 60	1	0,75	0,75	0,74	0,74	61,23	61,22	60,58	60,57	0,745	60,900
		2	0,73	0,73	0,73	0,73	60,54	60,56	60,51	60,5	0,730	60,528
		3	0,73	0,73	0,73	0,74	60,54	60,54	60,58	60,5	0,733	60,540
		4	0,73	0,73	0,74	0,74	60,52	60,48	61,23	61,22	0,735	60,863
	H38 – 50	1	0,72	0,73	0,72	0,72	61,11	61,11	60,48	60,49	0,723	60,798
		2	0,72	0,72	0,72	0,72	60,48	60,48	60,49	60,48	0,720	60,483
		3	0,72	0,73	0,72	0,72	60,48	60,46	60,49	60,49	0,723	60,480
		4	0,72	0,72	0,73	0,73	60,5	60,49	61,11	61,07	0,725	60,793
	H39 – 95	1	0,74	0,74	0,73	0,72	61,16	61,17	60,5	60,49	0,733	60,830
		2	0,72	0,72	0,72	0,72	60,5	60,51	60,5	60,52	0,720	60,508
		3	0,71	0,72	0,74	0,74	60,51	60,51	60,5	60,48	0,728	60,500
		4	0,73	0,73	0,73	0,73	60,46	60,45	61,13	61,18	0,730	60,805
	H40 – 40	1	0,73	0,73	0,72	0,72	61,13	61,14	60,54	60,53	0,725	60,835
		2	0,72	0,72	0,72	0,72	60,58	60,54	60,5	60,51	0,720	60,533
		3	0,73	0,73	0,72	0,72	60,48	60,49	60,56	60,56	0,725	60,523
		4	0,72	0,72	0,74	0,74	60,58	60,55	61,21	61,12	0,730	60,865



Príloha 2 – Únavová skúška – namerané hodnoty

Ozn. sk. vzorky	Hladina zaťaženia	Číslo nit. Spoja	$\sigma_{h,nom}$ (Mpa)	F_h (N)	F_d (N)	σ_h (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_a (Mpa)	σ_m (Mpa)	R (-)	N_r (1)
NNPB	H01 – 75	1	75	3660	366	77,94	7,79	35,07	42,87	0,10	255702
		2		3660	366	77,98	7,80	35,09	42,89	0,10	217075
		3		3660	366	78,08	7,81	35,13	42,94	0,10	197632
		4		3660	366	78,12	7,81	35,15	42,97	0,10	224980
	H02 – 150	1	150	7320	732	156,44	15,64	70,40	86,04	0,10	5088
		2		7320	732	156,41	15,64	70,38	86,02	0,10	5276
		3		7320	732	156,67	15,67	70,50	86,17	0,10	6243
		4		7320	732	156,57	15,66	70,46	86,11	0,10	5240
	H03 – 100	1	100	4880	488	104,57	10,46	47,06	57,51	0,10	36152
		2		4880	488	104,52	10,45	47,04	57,49	0,10	52857
		3		4880	488	104,58	10,46	47,06	57,52	0,10	44261
		4		4880	488	104,57	10,46	47,06	57,51	0,10	53388
	H04 – 50	1	50	2440	244	52,31	5,23	23,54	28,77	0,10	691164
		2		2440	244	52,30	5,23	23,53	28,76	0,10	1084651
		3		2440	244	52,42	5,24	23,59	28,83	0,10	642546
		4		2440	244	52,47	5,25	23,61	28,86	0,10	860177
	H05 – 45	1	45	2196	220	47,18	4,73	21,23	25,95	0,10	994741
		2		2196	220	47,24	4,73	21,25	25,99	0,10	983907
		3		2196	220	47,33	4,74	21,30	26,04	0,10	905210
		4		2196	220	47,42	4,75	21,34	26,09	0,10	747824
H00 – ST	1										
	2										
	3										
	4										
AAPB	H06 – ST	1									
		2									
		3									
		4									
	H07 – 55	1		2684	268	58,32	5,82	26,25	32,07	0,10	278838
		2		2684	268	58,40	5,83	26,29	32,12	0,10	311575
		3		2684	268	58,55	5,85	26,35	32,20	0,10	261969
		4		2684	268	58,61	5,85	26,38	32,23	0,10	358485
	H08 – 75	1		3660	366	80,09	8,01	36,04	44,05	0,10	64984
		2		3660	366	80,13	8,01	36,06	44,07	0,10	72796
		3		3660	366	80,08	8,01	36,04	44,04	0,10	105326
		4		3660	366	80,17	8,02	36,08	44,09	0,10	80560
	H09 – 40	1		1952	195	42,86	4,28	19,29	23,57	0,10	1495695
		2		1952	195	42,88	4,28	19,30	23,58	0,10	1269928
		3		1952	195	42,91	4,29	19,31	23,60	0,10	748184
		4		1952	195	43,00	4,30	19,35	23,65	0,10	1270407
	H10 – 90	1		4392	439	96,56	9,65	43,45	53,10	0,10	19707
		2		4392	439	96,73	9,67	43,53	53,20	0,10	19240
		3		4392	439	97,15	9,71	43,72	53,43	0,10	22681
		4		4392	439	97,15	9,71	43,72	53,43	0,10	26880

Ozn. sk. vzorky	Hladina zafaženia	Číslo nit. Spoja	$\sigma_{h,nom}$ (Mpa)	F_h (N)	F_d (N)	σ_h (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_a (Mpa)	σ_m (Mpa)	R (-)	N_f (1)	
NNPL	H11 – 150	1	150	7320	732	160,11	16,01	72,05	88,06	0,10	4113	
		2		7320	732	161,36	16,14	72,61	88,75	0,10	2766	
		3		7320	732	161,45	16,14	72,65	88,80	0,10	5328	
		4		7320	732	159,87	15,99	71,94	87,93	0,10	2868	
	H12 – 100	1	100	4880	488	108,08	10,81	48,64	59,44	0,10	16149	
		2		4880	488	108,71	10,87	48,92	59,79	0,10	17672	
		3		4880	488	108,35	10,83	48,76	59,59	0,10	13763	
		4		4880	488	108,77	10,88	48,95	59,82	0,10	17078	
	H13 – 60	1	60	2928	293	63,66	6,37	28,64	35,01	0,10	132265	
		2		2928	293	65,27	6,53	29,37	35,90	0,10	149181	
		3		2928	293	65,44	6,55	29,45	35,99	0,10	151164	
		4		2928	293	64,34	6,44	28,95	35,39	0,10	109565	
	H14 – 35	1	35	1708	171	37,62	3,77	16,93	20,69	0,10	771108	
		2		1708	171	37,63	3,77	16,93	20,70	0,10	655064	
		3		1708	171	37,62	3,77	16,93	20,69	0,10	616893	
		4		1708	171	37,51	3,76	16,88	20,63	0,10	926490	
	H15 – ST	1										
		2										
		3										
		4										
AAPL	H16 – 90	1	90	4392	439	96,74	9,67	43,54	53,21	0,10	27715	
		2		4392	439	97,31	9,73	43,79	53,52	0,10	39349	
		3		4392	439	98,14	9,81	44,17	53,98	0,10	31470	
		4		4392	439	97,03	9,70	43,67	53,37	0,10	44821	
	H17 – 75	1	75	3660	366	81,48	8,15	36,66	44,81	0,10	111707	
		2		3660	366	83,62	8,36	37,63	45,99	0,10	100312	
		3		3660	366	82,80	8,28	37,26	45,54	0,10	114177	
		4		3660	366	82,34	8,23	37,05	45,29	0,10	91106	
	H18 – 65	1	65	3172	317	69,91	6,99	31,46	38,45	0,10	202126	
		2		3172	317	70,56	7,05	31,76	38,81	0,10	223912	
		3		3172	317	70,80	7,08	31,86	38,94	0,10	264855	
		4		3172	317	70,39	7,03	31,68	38,71	0,10	213549	
	H19 – 50	1	50	2440	244	53,39	5,34	24,03	29,37	0,10	765939	
		2		2440	244	54,42	5,44	24,49	29,93	0,10	1581366	
		3		2440	244	54,08	5,41	24,34	29,75	0,10	1271712	
		4		2440	244	53,45	5,34	24,05	29,40	0,10	855382	
	H20 – ST	1										
		2										
		3										
		4										

Ozn. sk. vzorky	Hladina zaťaženia	Číslo nit. Spoja	$\sigma_{h,nom}$ (Mpa)	F_h (N)	F_d (N)	σ_h (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_a (Mpa)	σ_m (Mpa)	R (-)	N_f (1)
NNJB	H21 – 100	1	100	4880	488	109,85	10,99	49,43	60,42	0,10	29533
		2		4880	488	110,46	11,05	49,71	60,75	0,10	55049
		3		4880	488	109,72	10,97	49,37	60,34	0,10	37673
		4		4880	488	110,73	11,07	49,83	60,90	0,10	99579
	H22 – 75	1	75	3660	366	81,53	8,15	36,69	44,84	0,10	87537
		2		3660	366	82,55	8,26	37,15	45,40	0,10	452248
		3		3660	366	82,88	8,29	37,30	45,59	0,10	50690
		4		3660	366	82,36	8,24	37,06	45,30	0,10	142892
	H23 – 125	1	125	6100	610	136,80	13,68	61,56	75,24	0,10	9097
		2		6100	610	139,39	13,94	62,72	76,66	0,10	22932
		3		6100	610	139,01	13,90	62,56	76,46	0,10	8848
		4		6100	610	137,25	13,73	61,76	75,49	0,10	16854
	H24 – 65	1	65	3172	317	70,91	7,09	31,91	39,00	0,10	118757
		2		3172	317	72,26	7,22	32,52	39,74	0,10	288380
		3		3172	317	72,78	7,27	32,75	40,03	0,10	88250
		4		3172	317	71,61	7,16	32,23	39,38	0,10	220133
	H25 – 50	1	50	2440	244	54,18	5,42	24,38	29,80	0,10	424087
		2		2440	244	54,67	5,47	24,60	30,07	0,10	461295
		3		2440	244	54,46	5,45	24,51	29,95	0,10	245744
		4		2440	244	54,33	5,43	24,45	29,88	0,10	935937
NNJL	H26 – 100	1	100	4880	488	107,99	10,80	48,60	59,40	0,10	19235
		2		4880	488	108,54	10,85	48,85	59,70	0,10	54133
		3		4880	488	108,63	10,86	48,89	59,75	0,10	24902
		4		4880	488	110,40	11,04	49,68	60,72	0,10	126552
	H27 – 75	1	75	3660	366	81,80	8,18	36,81	44,99	0,10	323362
		2		3660	366	83,39	8,34	37,53	45,86	0,10	411971
		3		3660	366	83,10	8,31	37,40	45,71	0,10	186560
		4		3660	366	81,79	8,18	36,81	44,99	0,10	234459
	H28 – 125	1	125	6100	610	136,33	13,63	61,35	74,98	0,10	16599
		2		6100	610	136,22	13,62	61,30	74,92	0,10	27264
		3		6100	610	137,11	13,71	61,70	75,41	0,10	28886
		4		6100	610	138,13	13,81	62,16	75,97	0,10	62779
	H29 – 65	1	65	3172	317	70,42	7,04	31,69	38,73	0,10	461377
		2		3172	317	70,82	7,08	31,87	38,95	0,10	322790
		3		3172	317	70,80	7,08	31,86	38,94	0,10	598806
		4		3172	317	71,40	7,14	32,13	39,27	0,10	360040
	H30 – 60	1	60	2928	293	66,80	6,68	30,06	36,74	0,10	800913
		2		2928	293	65,60	6,56	29,52	36,08	0,10	999843
		3		2928	293	64,92	6,50	29,21	35,71	0,10	1007048
		4		2928	293	65,45	6,55	29,45	36,00	0,10	1049841

Ozn. sk. vzorky	Hladina zafaženia	Číslo nit. Spoja	$\sigma_{h,nom}$ (Mpa)	F_h (N)	F_d (N)	σ_h (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_a (Mpa)	σ_m (Mpa)	R (-)	N_f (1)
AAJB	H31 – 75	1	75	3660	366	81,29	8,13	36,58	44,71	0,1	65156
		2		3660	366	82,89	8,29	37,30	45,59	0,1	38298
		3		3660	366	83,44	8,34	37,55	45,89	0,1	70733
		4		3660	366	83,28	8,33	37,48	45,80	0,1	44394
	H32 – 60	1	60	2928	293	65,16	6,52	29,32	35,84	0,1	200345
		2		2928	293	67,18	6,72	30,23	36,95	0,1	135381
		3		2928	293	67,20	6,72	30,24	36,96	0,1	270779
		4		2928	293	66,82	6,69	30,07	36,75	0,1	130480
	H33 – 50	1	50	2440	244	54,93	5,49	24,72	30,21	0,1	398438
		2		2440	244	54,89	5,49	24,70	30,19	0,1	280530
		3		2440	244	56,22	5,62	25,30	30,92	0,1	414135
		4		2440	244	55,69	5,57	25,06	30,63	0,1	319436
	H34 – 95	1	95	4636	464	104,03	10,41	46,81	57,22	0,1	
		2		4636	464	105,72	10,58	47,57	58,15	0,1	
		3		4636	464	105,80	10,59	47,61	58,20	0,1	
		4		4636	464	104,16	10,42	46,87	57,29	0,1	
	H35 – 40	1	40	1952	195	44,50	4,45	20,03	24,48	0,1	2644308
		2		1952	195	44,78	4,47	20,15	24,63	0,1	2644308
		3		1952	195	44,80	4,48	20,16	24,64	0,1	2644308
		4		1952	195	43,95	4,39	19,78	24,17	0,1	2644308
AAJL	H36 – 75	1	75	3660	366	82,74	8,27	37,23	45,51	0,1	70983
		2		3660	366	84,06	8,41	37,83	46,23	0,1	41881
		3		3660	366	84,08	8,41	37,83	46,24	0,1	38930
		4		3660	366	83,00	8,30	37,35	45,65	0,1	52152
	H37 – 60	1	60	2928	293	64,54	6,46	29,04	35,50	0,1	284405
		2		2928	293	66,27	6,63	29,82	36,45	0,1	186183
		3		2928	293	66,03	6,61	29,71	36,32	0,1	275442
		4		2928	293	65,45	6,55	29,45	36,00	0,1	166918
	H38 – 50	1	50	2440	244	55,55	5,55	25,00	30,55	0,1	443802
		2		2440	244	56,03	5,60	25,21	30,82	0,1	244123
		3		2440	244	55,84	5,58	25,13	30,71	0,1	251021
		4		2440	244	55,36	5,54	24,91	30,45	0,1	285172
	H39 – 95	1	95	4636	464	104,04	10,41	46,82	57,23	0,1	20992
		2		4636	464	106,41	10,65	47,88	58,53	0,1	13117
		3		4636	464	105,33	10,54	47,39	57,94	0,1	18755
		4		4636	464	104,44	10,45	47,00	57,45	0,1	17974
	H40 – 40	1	40	1952	195	44,26	4,42	19,92	24,34	0,1	1763524
		2		1952	195	44,79	4,47	20,16	24,63	0,1	1333578
		3		1952	195	44,49	4,44	20,02	24,47	0,1	2327941
		4		1952	195	43,93	4,39	19,77	24,16	0,1	1122449

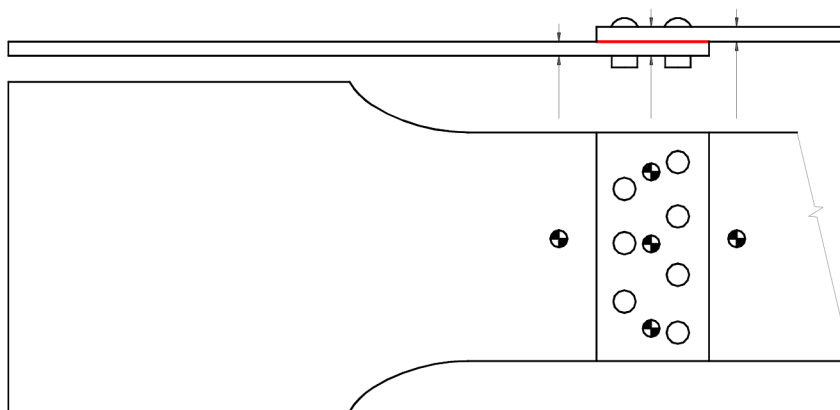


Príloha 3 – Statická únosnosť a meranie hrúbky lepidla únavových vzoriek

Meranie hrúbky lepidla bolo prevedené nepriamo. Merala sa hrúbka plechov bez lepidla (t_1 , t_2) a hrúbka v mieste preplátovania t_{12} (Obr. P3.1). Hrúbka vrstvy lepidla bola vypočítaná odčítaním hrúbok plechov od strednej hodnoty hrúbky spoja v mieste preplátovania zo vzťahu: $t_L = t_{12} - t_1 - t_2$. V tabuľke P3.1 sú uvedené namerané a vypočítané hodnoty. Priemerná hodnota hrúbky lepidla bola u spojov NNPL a AAPL $t_L = 0,098 \pm 0,008$ mm.

Tab. P3.1 Meranie hrúbky vrstvy lepidla

Vzorka	NNPL				AAPL			
Spoj	1	2	3	4	1	2	3	4
t_1	0,75	0,74	0,73	0,72	0,74	0,74	0,74	0,72
t_2	0,74	0,73	0,73	0,75	0,74	0,74	0,72	0,73
t_{12}	1,58	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,58	1,51
	1,6	1,58	1,55	1,58	1,57	1,61	1,53	1,53
	1,61	1,61	1,57	1,55	1,6	1,58	1,56	1,53
stredná hodnota t_{12}	1,597	1,583	1,560	1,563	1,577	1,583	1,557	1,523
t_L	0,107	0,113	0,100	0,093	0,097	0,103	0,097	0,073



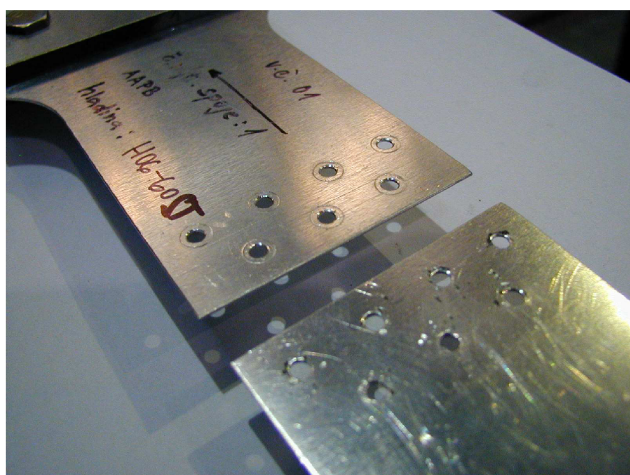
Obr. P3.1 Miesta merania hrúbky vrstvi lepidla

Skúšky statickej únosnosti boli vykonané na týchto vzorkách NNPB H00 – ST, NNPL H15 – ST, AAPB H06 – ST a AAPL H20 – ST (Tab. 5.1, Príloha 1). Skúška únosnosti bola pre každý typ vzorky opakovaná dvakrát (druhá z nich prebehla po oprave porušeného spoja). Stanovené únosnosti a zodpovedajúceho napätia vztiahnuté na zmeraný prierez vzorky sú uvedené v tabuľke P3.2.

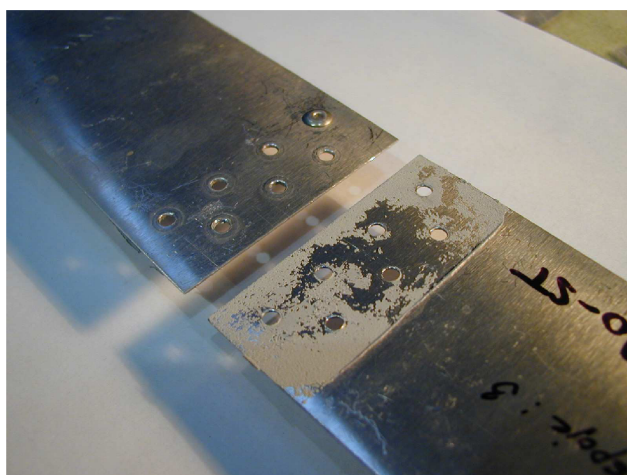
Tab. P3.2 Statická únosnosť a max. napätie AAP a NNP vzoriek

Označení vzorku	Číslo spoje	Únosnosť spoje F_S [N]	Síla na nýt F_{S1} [N]	Plocha S [mm ²]	Napětí σ [MPa]
AAPB	1	5379	768	48,52	110,9
	3	5290	756	48,49	109,1
AAPL	2	8083	1155	44,67	180,9
	3	8003	1143	44,67	179,2
NNPB	3	9250	1321	47,09	196,4
	4	9680	1383	47,03	205,8
NNPL	2	8350	1193	44,92	185,9
	3	8211	1173	44,49	184,6

V prípade vzoriek s tŕňovými nitmi AAPB a AAPL došlo ku šmykovému porušeniu nitov v spoji. Plechy neboli pri skúške poškodené. Pri vzorkách s plnými zápustnými nitmi typu NNPB a NNPL došlo k poruche spoja formou vytrhnutia nitov z otvorov v spájaných plechoch, čo malo za následok značnú deformáciu plechov, ktorá v prípade kombinovaných lepeno – nitovaných spojov NNPL spôsobovala rozlepenia spoja ešte pred jeho konečným porušením. Na nasledujúcich obrázkoch sú spoje po porušení (Obr. P5.2a, b, c, d).



a) AAPB



b) AAPL



c) NNPB



d) NNPL

Obr. P5.2 Spôsoby poškodenia spojov pri statickej skúške

ŽIVOTOPIS AUTORA

Meno

Tomáš Urík

Osobné údaje

Dátum narodenia: 22. apríl 1980

Miesto narodenia: Nitra

E-mail: chosrove@seznam.cz

Rod. Stav: slobodný

Vzdelanie

- 2003 – 2010 Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství, VUT
Technická 2, Brno, 616 69
Špecializácia: Konstruční a procesní inženýrství – postgraduálne štúdium
Téma dizertačnej práce: „Dynamické vlastnosti lepeno – nitovaných spojov“
- 2001 – 2003 Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství, VUT
Technická 2, Brno, 616 69
Špecializácia: Stavba letadel – magisterské štúdium
- 1998 – 2001 Strojnícka fakulta, STU, Nám. Slobody 17, Bratislava, 812 31
Magisterské štúdium 1. až 3. ročník
- 1994 – 1998 SOU Letecko – opravárenské, Legionárska 160, Trenčín
Špecializácia: Letecký mechanik

Jazykové znalosti

Angličtina

Zamestnanie

- 2005 – 2010 Výskumný pracovník, Centrum leteckého a kosmického výzkumu
VUT, Fakulta strojního inženýrství

Vedecko - výskumná činnosť

- [a] Popela, R.; Zikmund, P.; Urík, T.; Mihalides, D.; Doupník, P.: VUT 700 SPECTO; VUT 700 SPECTO. Letecký ústav FSI, VUT v Brně. (funkční vzorek)
- [b] Píštěk, A.; Juračka, J.; Urík, T.: OK- VUT; Letoun VUT 001 Marabu. LKJI. (prototyp)
- [c] Urík, T.: MWCS: Mnohostojinová kompozitní konstrukce. LU. (funkční vzorek)
- [d] Urík, T.; Mališ, M.; Šplíchal, J.; Juračka, J.: Technologie výroby kompozitní sendvičové konstrukce s využitím počítačové podpory konstruování, PLASTSERVIS-L, s.r.o.. (ověřená technologie)
- [e] Urík, T.: GEOCS: Geodetická kompozitní konstrukce. LU. (funkční vzorek)

Pedagogická činnosť

Technologie letecké výroby I, II, cvičenia (2003 – 2010)

Počítačová podpora konstruování a výroby, prednášky, cvičenia, (2006 – 2010)

Computer Aided Design and Manufacturing, prednášky, cvičenia, (2006 – 2010)