

# Experimentální Analýza Napětí 2005

## EXPERIMENTAL ANALYSIS OF BLIND RIVET ASSEMBLING PROCESS WITH CONSEQUENTIAL SHEAR STRENGTH TESTING

### EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA PROCESU NÝTOVÁNÍ TRNOVÉHO NÝTU S NÁSLEDNÝM SMYKOVÝM ZATÍŽENÍM

Petr Adamík<sup>1</sup>

*Trnové nýty se běžně používají pro spojování součástí, které jsou z hlediska nýtování špatně přístupné, nebo vůbec nejsou přístupné z jedné strany. Patří do technologické skupiny, která nese označení jednostranné nýtování a spektrum jejího použití je široké ve velké části různých odvětví průmyslu. Konkrétně v leteckých aplikacích tvoří převážnou část spojovacích elementů používaných pro připojení plechového potahu k draku letounu u strojů nižších hmotnostních kategorií (zejména ultralehkých letounů). Zde se využívá jak relativní jednoduchosti technologické aplikace, tak i relativně nízké ceny zhotovení takového typu spoje.*

*Příspěvek obsahuje experimentální ověření zanýtování nýtového spoje a jeho následného testování na smykovou pevnost. Jako vzorek je použit běžně dostupný standardní duralový trnový nýt ø4 mm dle ČSN 02 2391 (DIN 7337), spojující dva duralové plechy (424201.62) o tloušťkách 1.6 mm. Po zanýtování je vzorek testován na pevnost a poruchu ve smyku.*

*Reálný experiment je modelován pomocí výpočtového modelu v programu MSC.Dytran. Modelování vzorku se skládá ze dvou fází, stejně jako vlastní naměřený experiment - zanýtování a následné smykové zatížení nýtu.*

*Cílem je dosažení co nejuvěrnější simulace skutečného napětově-deformačního stavu nýtu s případným zjištěním působení neovlivnitelných skutečností (zejména velmi pravděpodobná možnost nesymetrického zanýtování trnového nýtu). Výsledky bude možno použít pro modelování rozsáhlejších konstrukcí, při jejichž spojování je užito právě nýtových spojů.*

*Blind rivets are commonly used to fasten parts, where an access to one side does not exist, or where exists only bad access to both sides of the joint. The spectrum of using of this technology is wide in different branches of the industry. Particularly in aerospace engineering these rivets are very often used to fasten aluminium sheets to airframe construction. This is commonly used in lower weight airplane categories, especially ultralight airplanes. The advantage of a simple application and relatively low fabrication price of this fastening is utilized.*

*This paper describes an experimental verification of riveting process and its consequent testing on shear strength. As a tested specimen, common aluminium ø4 mm blind rivet is used (ČSN 02 2391, DIN 7337). It joins two duraluminium sheets (424201.62) with thickness 1.6 mm. Following the riveting, the specimen was tested for shear failure and strength.*

---

<sup>1</sup> Ing. Petr Adamík: Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, tel.: +420-5-41142185, e-mail: yadami00@stud.fme.vutbr.cz

*The experiment was modelled using FEA in MSC.Dytran software. This simulation consisted of identical steps as the experiment - riveting process and application of shear load on this rivet joint.*

*Objective of this research is to simulate (as precisely as possible) real stress-deformation behavior of the rivet joint, with the analysis of non-influenceable effects (mainly highly probable problem of asymmetric riveting). Results could be used for modeling of large structural parts, where the riveting is used as a main technology of joints.*

## **Keywords**

rivets FEA modelling stress analysis

nýty MKP modelování napěťová analýza

## **1. Úvod**

Nýtování je již dlouho používaná a časem prověřená technologie sloužící ke spojování konstrukčních prvků různých strojů. Spektrum použití je velmi rozsáhlé, od spojování mostních konstrukcí ve stavebnictví, přes použití v elektrotechnice i automobilovém průmyslu až k velmi rozšířenému použití v letectví. Současně s různorodostí použití se mění i vlastní způsob využití nýtových spojů. Zatímco ve stavebnictví bude zřejmě nejpoužívanější (ne-li jediná) oblast ocelových nýtů pro spojování ocelových nosných konstrukcí, u elektrotechnických aplikací bude brán zřetel na vodivost měděných nýtů, v leteckém průmyslu mají největší uplatnění nýty z lehkých slitin (převážně slitiny na bázi hliníku). A právě aplikací v letectví se tento článek bude zabývat.

Nýtové spoje mohou přenášet dva druhy zatížení - tahové a smykové. Použití tahového zatížení nýtů v letectví není tak rozsáhlé a proto je zde hlavní zřetel brán právě na jejich zatížení smykem.

Vzhledem k rozvoji možností výpočetní techniky za poslední dvě desetiletí je možné pro stále běžnější aplikace používat počítačové modelování pomocí metody konečných prvků (MKP). S rostoucí výpočetní kapacitou počítačů je současně možné zjemňovat a zpřesňovat MKP modely a současně dostávat analyzované výpočty v relativně krátkém čase. Toto jsou důvody, proč se stále více návrhů strojních součástí přenáší do oblasti napěťových analýz. Hlavní důvod je však v získávání co nejuvěrnějších simulací zátěžových stavů malých konstrukčních prvků, které by pak bylo možné použít ve zjednodušené, ale věrné podobě pro analýzy rozsáhlejších konstrukcí.

V této práci byl jako vzorek použit standardní duralový trnový nýt  $\varnothing 4$  mm ČSN 02 2391 (DIN 7337). Matematický model byl počítán v programu MSC.Dytran a proběhlá analýza (na základě počátečních podmínek) byla porovnána se skutečností. Vlastní porovnání spočívalo ve srovnání zátěžových křivek získaných jak z reálného měření, tak z MKP výpočtu.

## **2. Cíle**

Hlavním úkolem je získání věrného podobnostního modelu chování nýtového spoje při jeho vytváření a jeho následného limitního zatížení. Jakožto modelovaný prvek je použit standardní duralový trnový nýt  $\varnothing 4$  mm ČSN 02 2391 (DIN 7337). Trnové nýty nacházejí v leteckém průmyslu široké uplatnění zejména v potahových konstrukcích letounů nižších hmotnostních kategorií. Jelikož potah letounu má současně i nosnou funkci a zároveň je v leteckém průmyslu jako nikde jinde brán zřetel na co nejnižší hmotnost celé konstrukce, jsou veškeré segmenty namáhány až ke svým hraničním únosnosti (samozřejmě, že existují rezervy v zatížení dle použitých schválených předpisů) a toto samo o sobě je největším důvodem pro pečlivou analýzu.

Model se skládá z trnového nýtu včetně trnu a dvou spojovaných plechů. První část výpočtové úlohy spočívá v silovém působení trnu na nýt, čímž dojde k zanýtování spoje a přetržení trnu. Po ustálení procesu a vytvoření předpětí je spoj zatížen smykem tak, aby došlo k porušení spoje. Cílem je získat odpovídající matematickou napěťově-deformační křivku materiálů a odpovídající geometrickou deformaci nýtového spoje.

Model bude vytvořen pomocí 3D elementů a je modelován polovičním řezem.

### 3. Geometrie zanýtování

Jedním ze stěžejních cílů je získat model, který po provedení nýtovací operace bude vykazovat obdobnou geometrii, jednodušeji řečeno: dílčím cílem je získání geometricky obdobného modelu.

Před vlastním modelováním bylo provedeno několik zkušebních vzorků právě pro získání geometrických charakteristik. Vzorky byly rozříznuty a vybroušeny v řezu vedoucím jejich osou, čímž byly stanoveny dílčí i cílové rozměry. Jelikož vlastní model byl tvořen jako poloviční 3D řez nýtovým spojem, cílem výzkumu je dosažení obdobných deformací nýtu.

Vlastní realizace nýtového spoje proběhla dle dlouhodobě zaběhnutých technologických postupů platných pro zanýtování s přihlédnutím k doporučení od výrobce.

Byly použity nýty dodané firmou FASTY [2]:

Trhačí nýt hliníkový standardní s plochou hlavou

DIN 7337

Průměr nýtu  $\varnothing$  4,0 mm (označení výrobce)

Skutečný průměr nýtu  $\varnothing$  3,8 mm

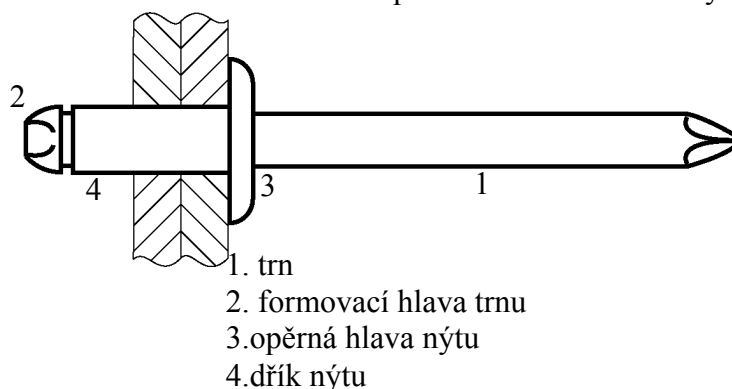
Průměr vyvrtaného otvoru pro nýt  $\varnothing$  4,0 mm

Délka nýtu 8 mm

(pro svěrnou tloušťku spojovaných materiálů 2x 1,6 mm)

Materiál nýtu AlMg3,5

Materiál trnu ocel pozinkovaná – blíže nebylo stanoveno



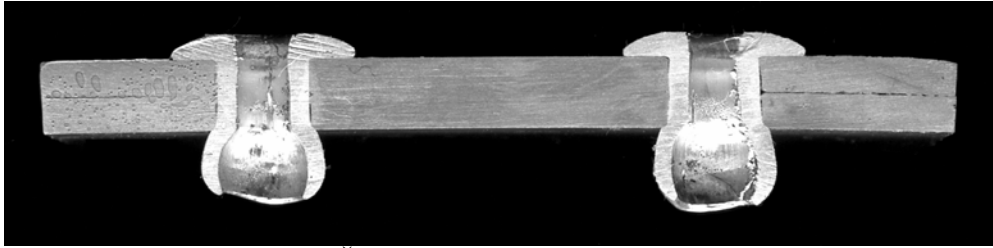
Obr.1. Schematický náčrt nýtu  $\varnothing$ 4mm

Odečet geometrických charakteristik byl proveden pro 2 stavy nýtu (viz. Obr.2 a Obr.3):

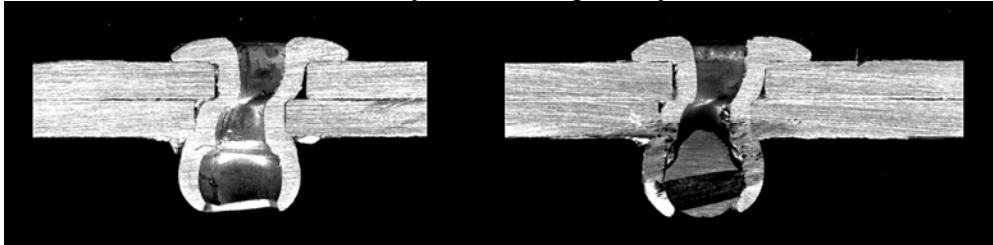
geometrie po zanýtování

geometrie po dosažení maximální zátěžné síly při silovém namáhání spoje

Vzhledem k malým rozměrům vzorků, rozdílnosti jejich jednotlivých zanýtování a z toho vyplývajících možných chyb měření byly tyto vzorky použity hlavně pro stanovení hrubé geometrické podobnosti, nikoliv pro exaktní porovnání skutečného stavu. Vzhled nýtu je znázorněn na následujících fotografiích.



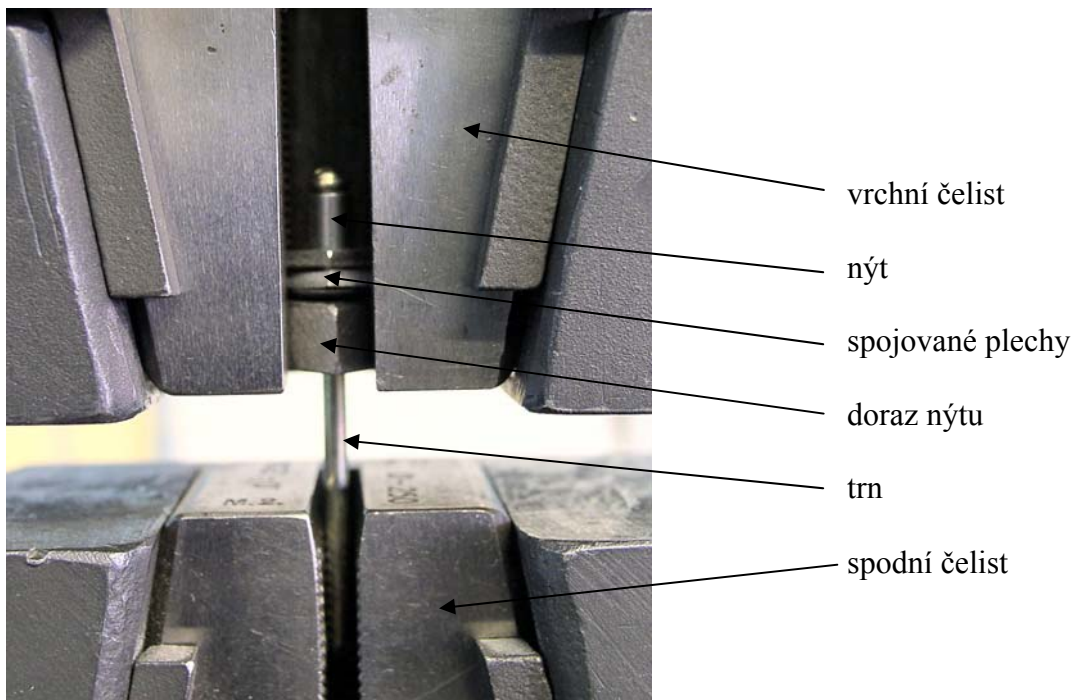
Obr.2. Řez nýtem  $\varnothing 4\text{mm}$  po zanýtování



Obr.3. Řez nýtem  $\varnothing 4\text{mm}$  po dosažení maximální zatěžovací síly

#### 4. Naměřené charakteristiky

Druhým stěžejním cílem výzkumu je dosažení obdobných nýtovacích a zatěžovacích charakteristik nýtového spoje modelovaného v MKP, jaké se nacházejí u reálného nýtového spoje.



Obr.4. Sestava pro měření formovací síly při zanýtování nýtu

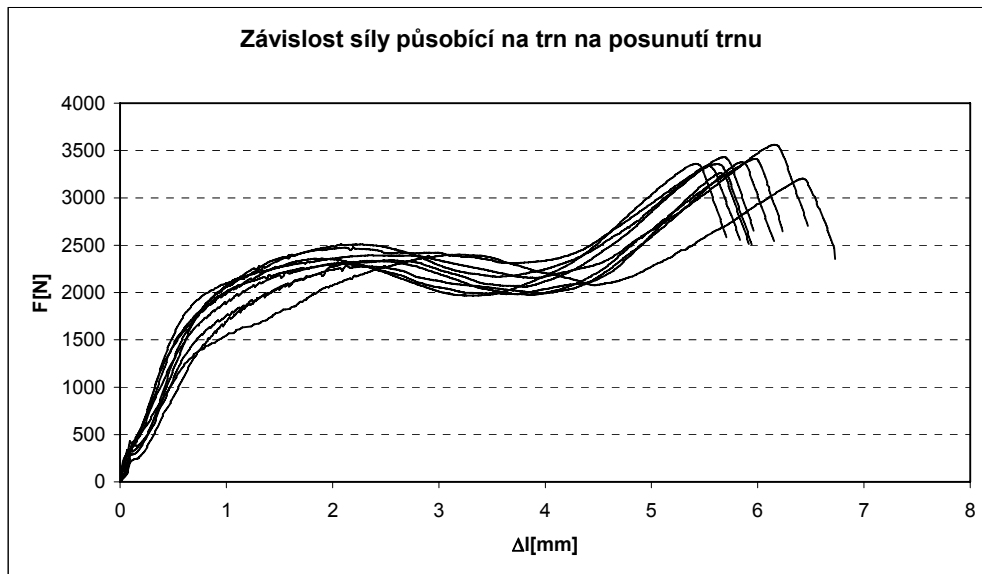
Měření bylo provedeno na zkušebním zařízení INSTRON (Obr.4) a probíhalo v následujících případech:

a) naměření sil potřebných pro zanýtování spoje (průběh sil a deformací působících na trn v průběhu nýtovací operace, viz. Obr.5)

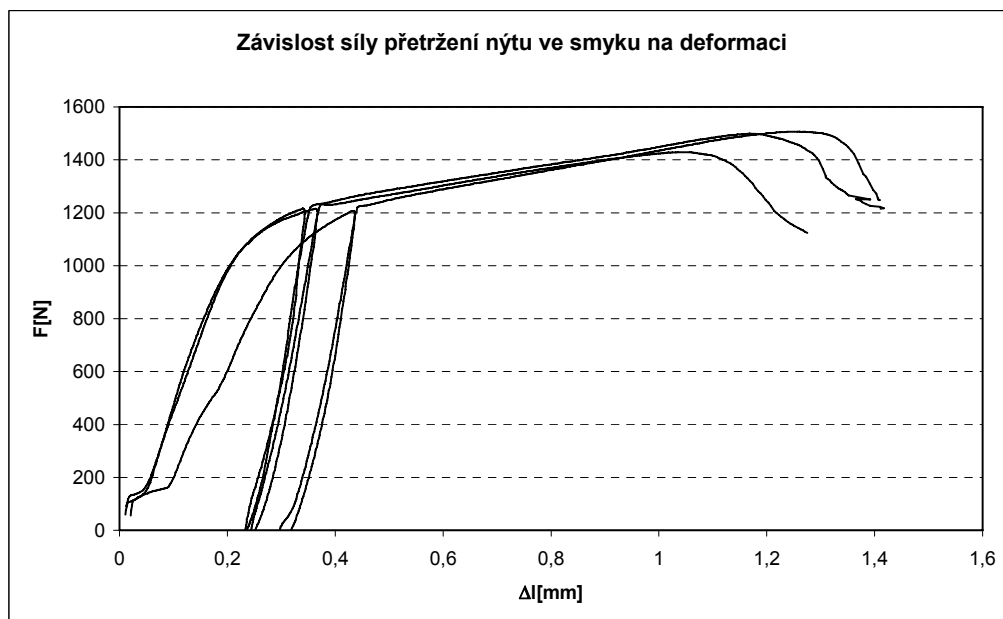
b) naměření deformačního průběhu při zatěžování nýtového spoje při zatížení smykem (průběh sil a deformací při zatěžování nýtového spoje, viz. Obr.6)

Jelikož nebyl od začátku znám materiál trnu nýtu, proběhlo i:

c) orientační zjištění pevnosti materiálu trnu



Obr.5. Naměřené síly na trnu při zanátyování vzorků



Obr.6. Naměřené síly na plechu při přetržení nýtu ve smyku

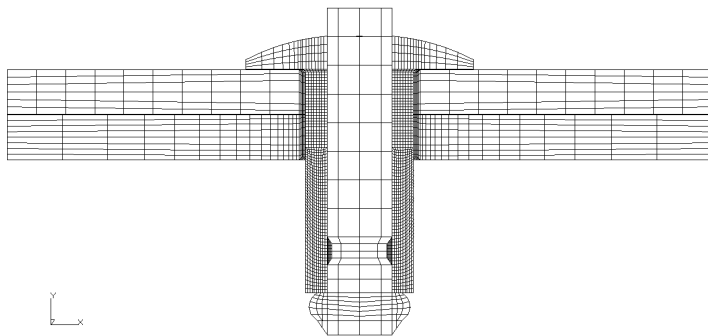
V tomto případě byl na trhacím stroji zkoušen pouze nepoškozený trn vytažený z nýtu. Vzhledem k malému rozměru vzorku a špatné geometrii (neodpovídaly normami dané rozměry vzorku pro tahovou zkoušku materiálu, navíc v místě uchycení do čelistí zákonitě vznikl vrub, který inicializoval vlastní přetržení) lze však získané hodnoty označit pouze za orientační.

## 5. Definice MKP modelu

Modelování proběhlo za pomoci programu MSC.Dytran. Je to software, který pracuje na principu šíření rozruchů v materiálu za předpokladu, že žádný děj se nešíří rychleji, než rychlost zvuku v daném materiálu. Vlastní početní princip vychází z teorie distribuce

kinetických energií, které se šíří materiálem a přeměňují se na deformační energii nebo energii napjatosti (zde označená jako vnitřní energie). Programování vstupního souboru umožňuje zahrnutí nejrůznějších jevů, jako je například zpevnění materiálů při rychlých deformacích, různé druhy materiálových definic a jiné užitečné vlastnosti.

Vlastní model byl zhotoven pomocí elementů typu CHEXA8 (šestiboké elementy s 8mi uzly v každém rohu) a CPENTA6 (pětiboké elementy se 6ti uzly). Rozložení hustoty sítě bylo voleno tak, aby v místech s největšími plastickými deformacemi byla mřížka elementů zhuštěná, zatímco v méně důležitých oblastech modelu se naopak nacházely elementy větších rozměrů. Výslednou použitou mřížku je možno vidět na Obr.7.



Obr.7. Mřížka použitá na MKP modelu

Jelikož MSC.Dytran v použité verzi neumožňuje použití adaptivní mřížky, je použito klasických neadaptivních elementů. Výhoda adaptivních elementů je zřejmá při přítomnosti velkých plastických deformací - v průběhu výpočtu je zdeformovaná mřížka lokálně nahrazena novou, geometricky méně zdeformovanou, ve které

je pak možno lépe využít výpočtových vlastností základních elementů (zde CHEXA8 a CPENTA6).

## 5.1 Definice materiálů

Stěžejní záležitostí pro alespoň přibližný výpočet je použití vhodných materiálových křivek. Pro materiál nýtu AlMg3,5 bylo možno zjistit napětově-deformační křivku v literatuře, stejně tak pro materiál použitých plechů 424201.61. Materiál použitý na trn není nikde v literatuře uveden, proběhlo tedy orientační měření s cílem získat alespoň hodnotu meze pevnosti  $R_m$  tohoto materiálu.

Oproti původnímu předpokladu jednoduché aplikace získaných křivek do použitého modelu došlo ale k velkému časovému zdržení. Problém nastal, jelikož naměřené hodnoty jsou vztaženy na zkušební vzorek určené délky a k tomuto rozměru jsou naměřené hodnoty vztaženy. Když si ovšem uvědomíme, že jednotlivé elementy modelu se musejí chovat dle charakteristik, při kterých se na miniaturní bázi chovají zřetelně jinak, zákonitě muselo dojít k úpravě těchto křivek.

Jedná se hlavně o následující faktor, vysvětlený na orientačním příkladě: pokud se jedná o materiál, který na vzorku  $\varnothing d=10\text{ mm}$  a délce  $l_0=100\text{ mm}$  vytvoří poměrné prodloužení  $\varepsilon=0,20$ , použije se jako charakteristika deformace rozměr přes celou zkušební tyč. V lokálním měřítku okolo vytvořeného krčku ale dojde k řádově vyšším plastickým deformacím, jelikož celá plastická deformace z tohoto místa je následně vztažena na celý vzorek a vytvoří oněch zmiňovaných 20%. Lokálně však dojde k plastické deformaci například 60% a tuto hodnotu je nutné zjistit pro použití v modelu.

Problém je také v tom, že každý materiál vytváří jiný krček, čili pro každý odlišně se chovající materiál musí proběhnout nový srovnávací výzkum pomocí MKP modelování. Navíc při letném výzkumu dojdeme ke zjištění, že jednoduše lze dosáhnout buď geometrické, nebo napětové shody s reálným stavem. Kombinaci obou případů však není tak jednoduché nalézt.

Tato skutečnost vyústila v dílčí úkol – zjišťování charakteristik materiálů použitelných pro modelování v MSC.Dytran. Tato část práce byla tak obsáhlá, že by vydala na samostatnou výzkumnou zprávu a řešení v tomto článku uvedeno nebude.

## 5.2 Tvorba modelu

V ideálním případě je model geometricky naprosto totožný se svou reálnou předlohou. Nastal ale následující problém:

Jelikož veškeré děje v MSC.Dytran vycházejí z rychlosti šíření zvuku, časový krok  $\Delta t$ , se kterým software počítá, je pevně dán rychlostí šíření zvuku v materiálu  $a$  a nejmenším rozměrem hrany elementu přiřazeného tomuto materiálu  $L_{MIN}$ .

$$\text{Pak platí} \quad \Delta t = \frac{L_{MIN}}{a} \quad [\text{s}] \quad (1)$$

Kde rychlost zvuku v materiálu je definována (viz. [3])

$$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

platí pro tyče, jejichž tloušťka je mnohem menší, než délka šířené zvukové vlny

$$a = \sqrt{\frac{E \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^2}}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

platí pro pevné materiály, jejichž příčný rozměr je mnohem větší, než délka šířené zvukové vlny

$E$  – Youngův modul pružnosti [MPa]

$\rho$  – hustota materiálu [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\mu$  – Poissonova konstanta

Jednoduše si můžeme vypočítat, že pro  $L_{MIN}=0,08 \text{ mm}$ ,  $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ ,  $E=210 \text{ GPa}$ ,  $\mu=0,3$  (ocel) vychází  $a = 6001 \text{ m/s}$

A časový krok  $\Delta t = 1,333 \cdot 10^{-8} \text{ s}$

Výpočet zanýtvání v reálném čase (i s přetržením cca 3s) při 20 000 elementech by na použitém výpočetním stroji (Athlon XP 2200+, 1,25 GB RAM) trval řádově 12 000 hodin, což je naprosto nerealizovatelné. Zrychlení děje bylo vyloučeno z důvodu naprosto odlišného deformačního chování materiálu. Proto byl finální a zde prezentovaný model vytvořen v 1000-násobném zvětšeném měřítku a vlastnosti materiálů byly upraveny, aby byla zachována podobnost. Při použití těchto principů bylo možno výpočetní čas zkrátit na přibližně 50 hodin za předpokladů jistých výpočetních nedokonalostí. Jejich minimalizace či odstranění je v současné době ve stadiu dalšího výzkumu.

## 5.3 Použité kontakty

Veškeré použité kontakty na modelu jsou adaptivní, dvou použitých typů. První z nich je adaptivní Master-Slave Surface (použito na všech kontaktech mezi jednotlivými konstrukčními prvky) a druhý je adaptivní Self-Surface (použito na nýtu). Adaptivní kontakt při každém kroku určuje, které z vybraných elementů jsou v kontaktu aktivní a které ne. Je

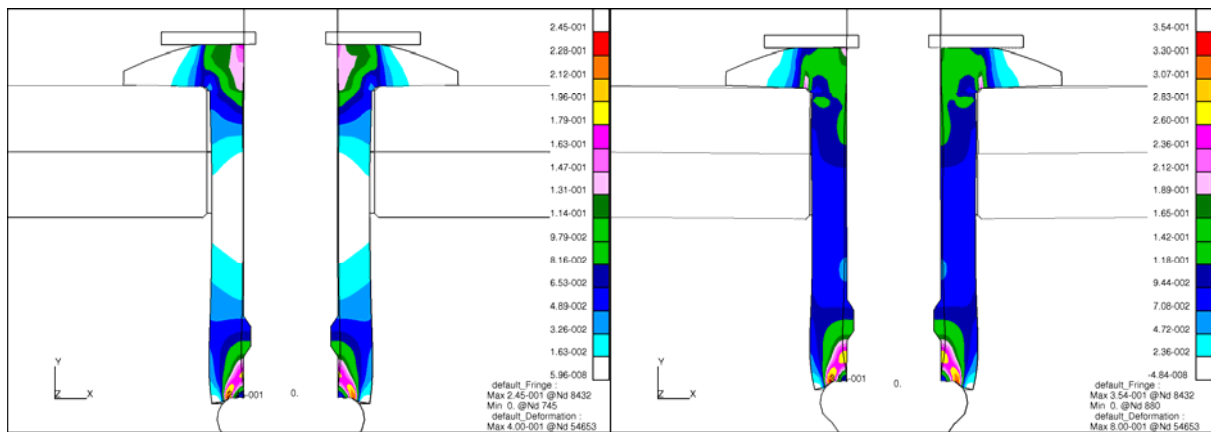
proto ideální pro použití v aplikacích, kde dochází k porušení materiálu, neboť s neaktivními už v tom daném kroku a dále nepočítá. Dochází tak k jisté časové úspoře při výpočtu.

Veškeré kontakty byly vytvořeny tak, že elementy vlastního nýtu tvoří uzly Slave. Je to z toho důvodu, že uzly Slave kloužou po Master povrchu, což v tomto případě představuje reálnější přístup, než kdyby tomu bylo naopak.

## 6. Výsledky modelování

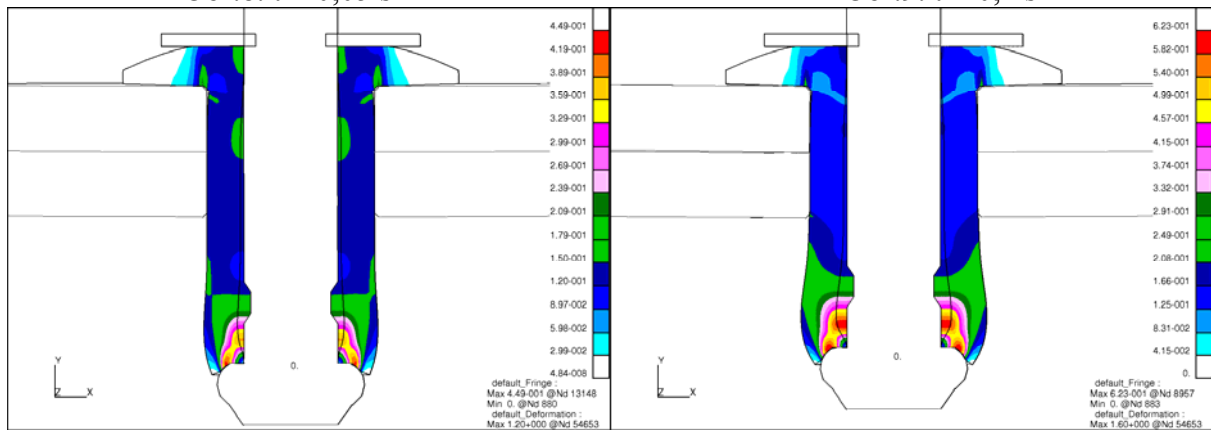
Na následujících obrázcích (Obr.8. - Obr.23.) je zachycena celá sekvence zatěžovacího postupu:

Zpočátku ( $t=0s-1s$ , Obr.8. - Obr.17.) dochází k zanýtování nýtu - doraz je zapřen o opěrnou hlavu a trn je tažen konstantní rychlostí posuvu. Poté je doraz a trn odstraněn z dosahu nýtu a nýt je namáhán na smyk (od  $t=1,2s$ , Obr. 18) do úplného přesmyknutí. Zobrazené hodnoty představují plastickou deformaci materiálu.



Obr.8.  $t = 0,05$  s

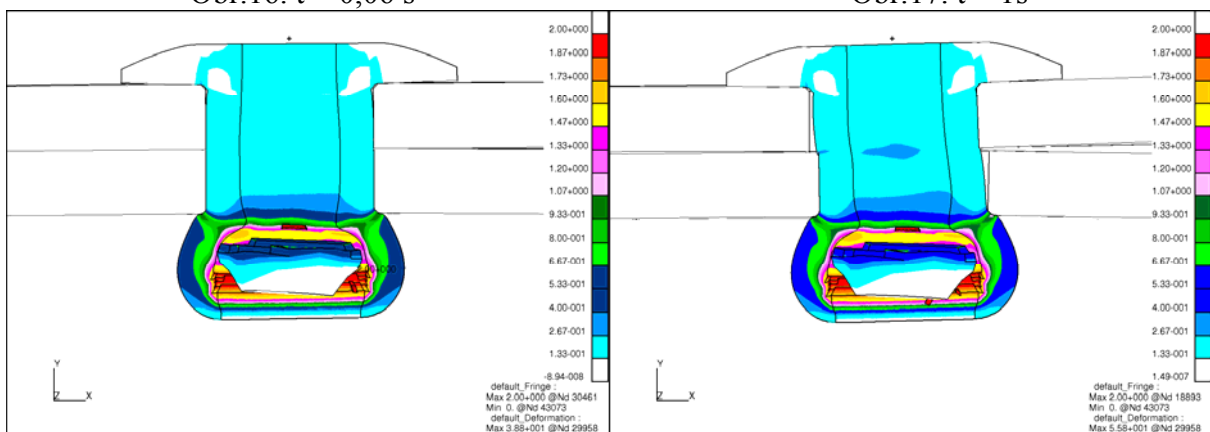
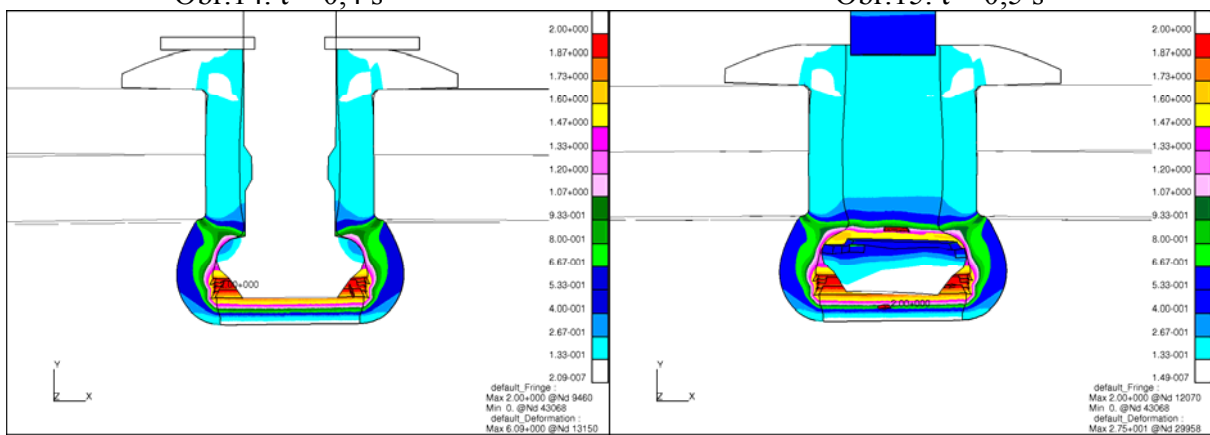
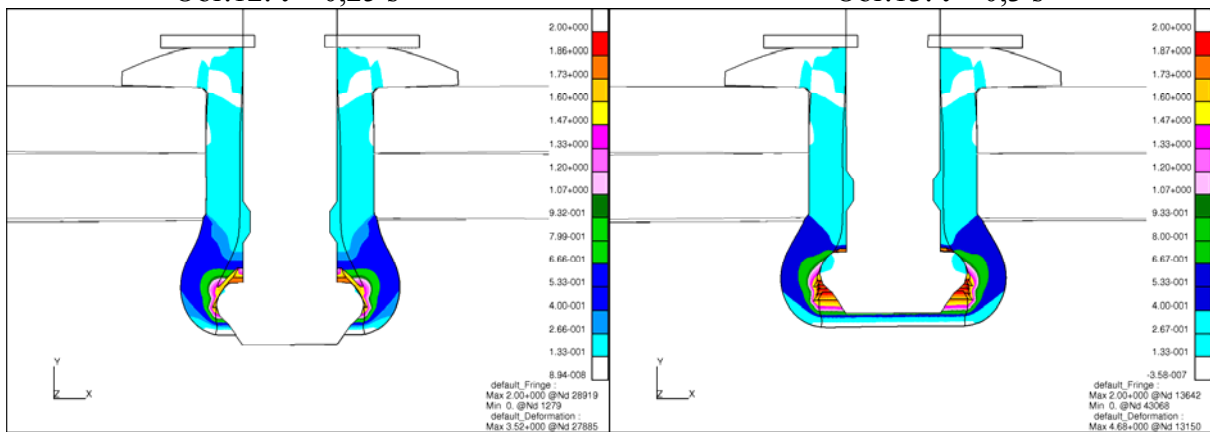
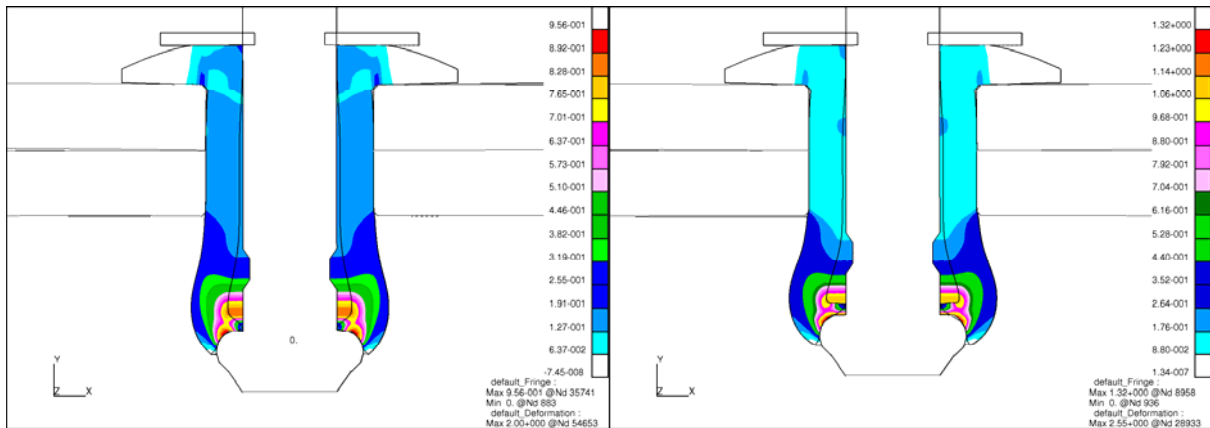
Obr.9.  $t = 0,1$  s

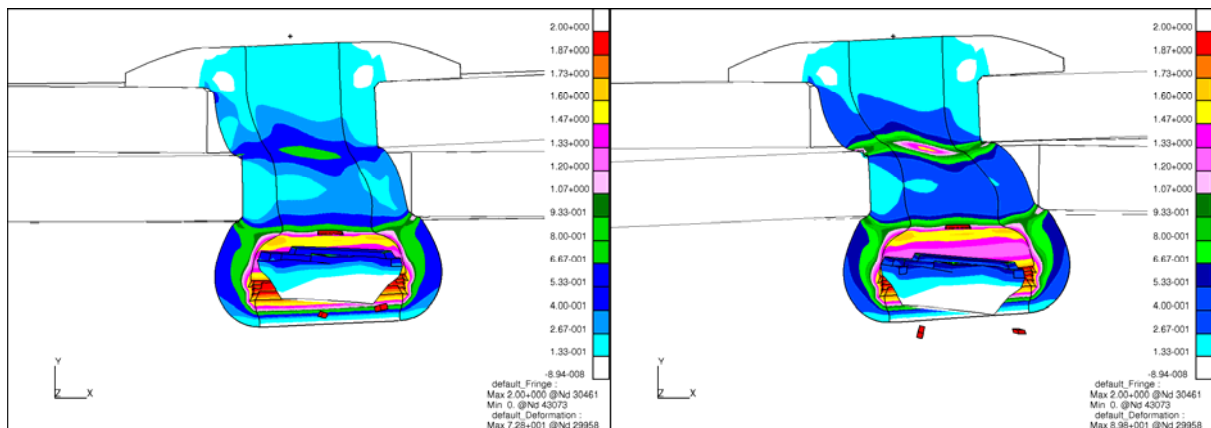


Obr.10.  $t = 0,15$  s

Obr.11.  $t = 0,2$  s

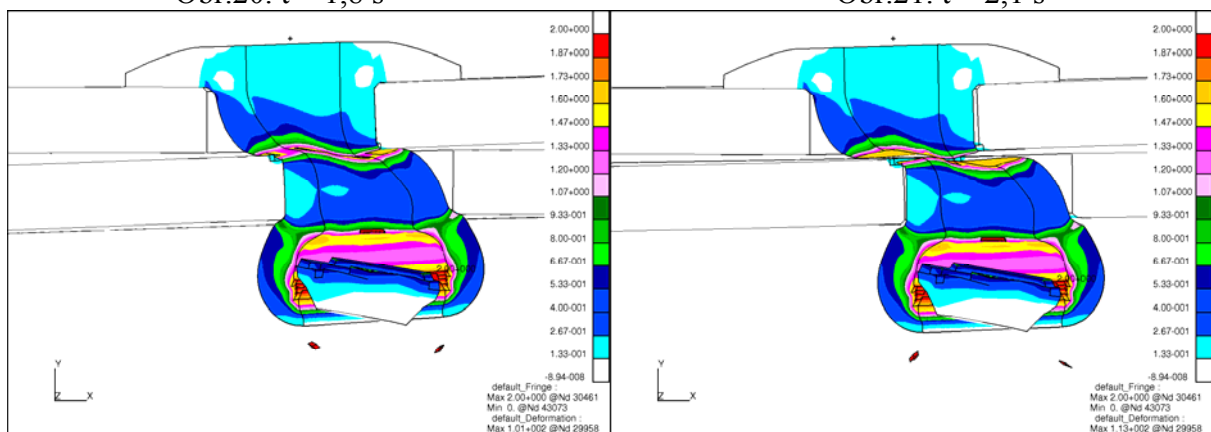






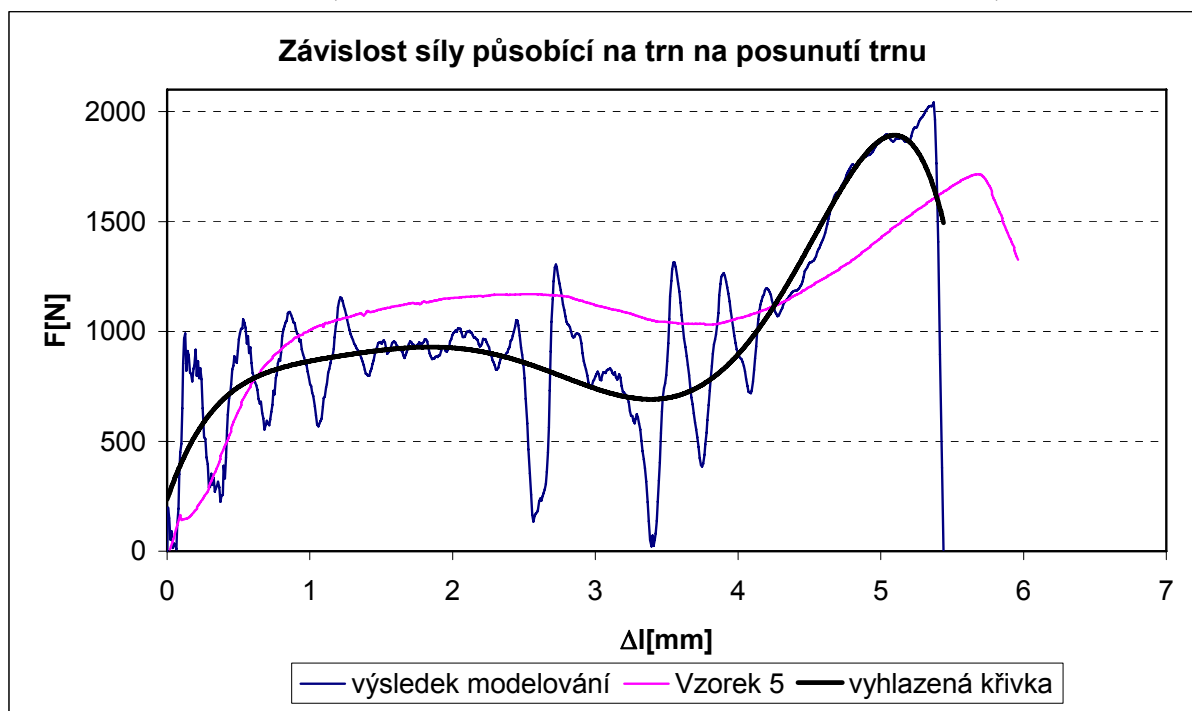
Obr.20. t = 1,8 s

Obr.21. t = 2,1 s



Obr.22. t = 2,3 s

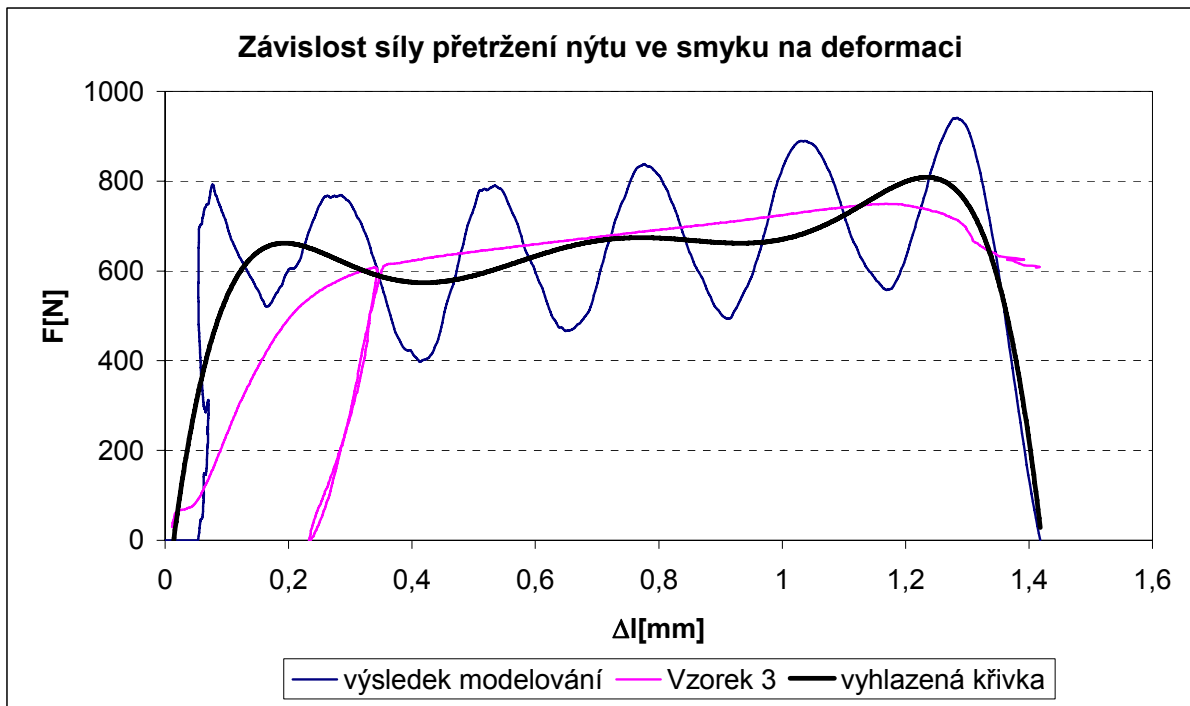
Obr.23. t = 2,5 s



Obr.24. Porovnání výsledků silových průběhů zanýtování trnového nýtu  $\varnothing 4$  mm (vztaženo na poloviční řez)

Jak je patrné z Obr.24. a Obr.25., došlo při modelování k částečné shodě s reálným případem. Křivky zatížení mají shodnou tendenci růstu i klesání, avšak dochází zde k jistému pulsování, které lze vysvětlit pomocí dvou jevů. Zaprvé toto může vznikat jako vlastní chyba

řešiče, kdy díky nelineárnímu výpočtu může docházet k náhlým skokovým změnám v zatížení a zadruhé je to způsobeno vlastním modelem, kdy se bez tlumení (jako je tomu ve skutečnosti) mohou naplno projevit setrvačné hmoty a celý vzorek se tak dostává do stavu rezonančního chvění.



Obr.25. Porovnání výsledků silových průběhů zatěžování ve smyku trnového nýtu  $\varnothing 4$  mm (vztaženo na poloviční řez)

## 7. Závěr

Experiment prokázal jistou formu konvergence k reálnému výsledku. Síly vznikající při nýtování trnového nýtu prokázaly obdobnou tendenci nárůstu a poklesu jako v naměřených případech, podařilo se dosáhnout i podobných numerických hodnot. Obdobně výsledky sil naměřených a namodelovaných v případě přetržení nýtu ve smyku prokazují jistou shodu.

Po stránce geometrické došlo v případě zanýtování k menším rozdílům. Zřejmý je hlavně tvar zformované závěrné hlavy nýtu, který až tak přesně neodpovídá skutečnosti, stejně tak stupeň napěchování nýtu v předvrtaném otvoru (a tedy i stav jeho zaplnění) nekorresponduje dokonale se skutečností a to hlavně v nejbližším okolí opěrné hlavy a taženého trnu.

S téměř stoprocentní pravděpodobností lze říci, že tyto rozdíly jsou způsobeny nedoladěnými napět'ovými průběhy jednotlivých materiálů (zejména materiál nýtu a trnu). V tomto směru proběhne další výzkum ve snaze zajistit mnohem dokonalejší shodu MKP modelu s experimentem.

## Literatura

- [1] Kelly, B., Costelo, C.: *FEA modelling of setting and mechanical testing of aluminium blind rivets* - Journal of Materials Processing Technology 2004, 153-154, str. 74-79, 2004
- [2] FASTY Professional - Nýtovací technika, 2003/2004, 56 str., 2003
- [3] *Speed of sound* - Wikipedia the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Velocity\\_of\\_sound](http://en.wikipedia.org/wiki/Velocity_of_sound) 2005-03-17

[4] *MSC.Dytran, Users Manual, Volume 2*, MSC.Software Corporation, Los Angeles, 1999,  
784 str.