



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

OPTIMALIZACE SBĚRNÉHO VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ ŠKODA 1,2 MPI

OPTIMIZATION OF EXHAUST MANIFOLD FOR ŠKODA 1,2 MPI

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MILAN KUBIŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN BERAN

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Milan Kubiš

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace sběrného výfukového potrubí Škoda 1,2 MPI

v anglickém jazyce:

Optimization of Exhaust Manifold for Škoda 1,2 MPI

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hlavním úkolem této práce je optimalizace sběrného výfukového potrubí s katalyzátorem na 3-válcovém motoru ŠKODA - 1,2 MPI

Cíle diplomové práce:

- 1)Optimalizace z hlediska naproudění katalyzátoru
- 2)optimalizace pevnosti sběrného potrubí
- 3)optimalizace těsnosti spoje (hlava válců-příruba sběrného potrubí)

Seznam odborné literatury:

- [1] Molnár, V.: Počítačová dynamika tekutin [online], 2006, poslední revize 16.10.2007. Dostupné z:
[2] Lotus Engineering Software, Group Lotus Plc, Norfolk, United Kingdom. Dostupné z: <
<http://www.lesoft.co.uk>>
[3] Pro/ENGINEER Resource Center [online], 2006, poslední revize 16.10.2007.
Dostupné z:
[4] Release 12.0 Documentation for ANSYS, ANSYS Inc., USA, 2005

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Beran

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 8.11.2013

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tématem této diplomové práce je optimalizace sběrného výfukového potrubí ŠKODA 1,2 MPI s ohledem na plastickou deformaci při tepelném namáhání. První část je zaměřena na obecný popis modulu katalyzátoru, jehož součástí je právě sběrné výfukové potrubí. V další části práce je proveden výpočet samotného tepelného zatěžování sběrného výfukového potrubí. Poslední část je věnována analýze těsnění celého modulu katalyzátoru na tříválcovém motoru ŠKODA.

Klíčová slova

sběrné výfukové potrubí, Schub-Riss test, teplotní pole, plastická deformace

Abstract

The subject of this diploma thesis is optimization of exhaust manifold of ŠKODA 1,2 MPI engine with respect for the plastic deformation at heat stress. The first part is focused on general description of converter module, whose component the exhaust manifold is. In the next part of the thesis is computation of a heat load of the exhaust manifold. The last part is devoted to the seal analysis of the whole converter module of a ŠKODA three-cylinder engine.

Key Words

exhaust manifold, Schub-Riss test, temperature field, plastic deformation

Bibliografická citace mé práce:

KUBIŠ, M. *Optimalizace sběrného výfukového potrubí Škoda 1,2 MPI*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 72 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Beran.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Berana a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně, dne 30.5.2014

Bc. Milan Kubiš

Poděkování

Děkuji Ing. Martinu Beranovi za jeho cenné rady, podněty, připomínky a za odborné vedení mé diplomové práce.

Děkuji firmě ŠKODA AUTO a.s. za podporu a možnost realizace této diplomové práce.



Obsah

1.	ÚVOD.....	10
2.	MOTOR ŠKODA 1,2 MPI.....	11
2.1.	Výfukový systém.....	13
2.1.1.	Sběrné výfukové potrubí.....	13
2.1.2.	Katalyzátor.....	15
3.	TEPELNÉ CYKLICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ.....	17
3.1.	Schub-Riss Test (SRT).....	17
4.	TEPELNÁ ANALÝZA – ROZLOŽENÍ TEPLOT V TĚLESE SBĚRNÉHO VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ	18
4.1.	Postup výpočtu pole teplot.....	22
5.	ELASTO-PLASTICKÁ ANALÝZA DEFORMACE.....	23
5.1.	FE model tělesa sběrného výfukového potrubí.....	23
5.2.	Okrajové podmínky.....	24
5.3.	Model materiálu.....	25
5.4.	Postup výpočtu plastických deformací.....	28
6.	MODEL TĚSNĚNÍ A JEHO VLIV.....	30
7.	ÚNAVOVÁ ANALÝZA – ODHAD ŽIVOTNOSTI.....	33
8.	POROVNÁNÍ SÉRIOVÝCH A VÝVOJOVÝCH VARIANT SBĚRNÉHO VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ Z HLEDISKA PLASTICKÝCH DEFORMACÍ.....	35
8.1.	Výpočetní postup.....	35
8.2.	Okrajové podmínky modelu.....	36
9.	VÝSLEDKY.....	41
9.1.	Studie chování sběrného výfukového potrubí při různých okrajových podmínkách	51
9.1.1.	Okrajové podmínky 1.....	51
9.1.2.	Okrajové podmínky 2.....	53
9.1.3.	Okrajové podmínky 3.....	54
9.1.4.	Okrajové podmínky 4.....	56
9.1.5.	Okrajové podmínky 5.....	57
9.1.6.	Okrajové podmínky 6.....	59
9.1.7.	Okrajové podmínky 7.....	60
10.	MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY TĚSNĚNÍ SBĚRNÉHO VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ.....	62
11.	ZÁVĚR.....	69



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE	70
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ.....	71



1. ÚVOD

Jedním z hlavních cílů této práce je termomechanická životnost výfukového sběrného potrubí při Schub-Riss testu. Sběrné výfukové potrubí je při zmíněném testu porušováno vznikem makroskopických trhlin iniciovaných při relativně malém počtu cyklů v místech intenzivních cyklických plastických deformací. Životnost výfukového sběrného potrubí je tedy možné posuzovat z hlediska nízko-cyklové únavy. Úloha je řešena komplexně, a to prostřednictvím následujících analýz:

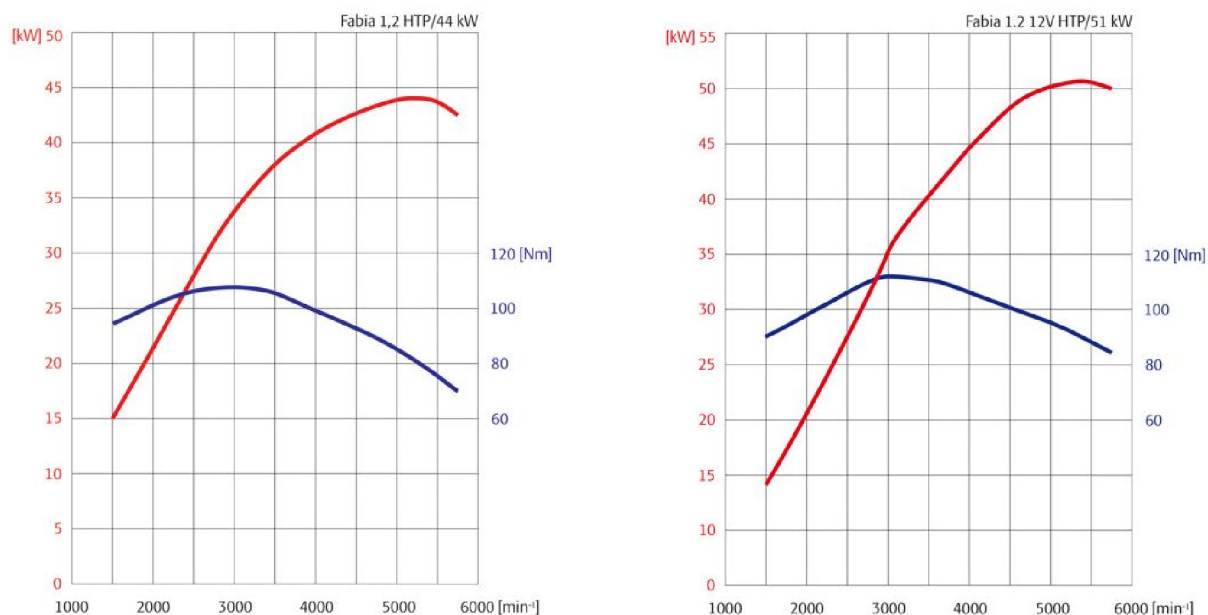
- tepelná analýza
- elastoplastická mechanická analýza
- únavová analýza

V další části diplomové práce se zaměříme na optimalizaci celého modulu z hlediska vlivu plastických deformací při tepelném zatěžování. Tato práce shrnuje hlavní výsledky, které byly dosaženy při vývoji optimalizované varianty sběrného výfukového potrubí pro motor ŠKODA 1,2 MPI. Výchozími variantami jsou jednak starší sběrné výfukové potrubí (VAR.1) a novější sběrné výfukové potrubí (VAR.4), které vyhovuje zkoušce mechanické odolnosti při teplotním cyklování. Jejich nevýhodou je lokální zatížení katalyzátoru, což vede k jeho snížené životnosti. Tyto varianty jsou referenční pro hodnocení vývojových variant.



2. MOTOR ŠKODA 1,2 MPI

Zkratku HTP (High Torque Performance) lze volně přeložit jako motor s vysokým kroutícím momentem. Označuje motory s velmi plochou křivkou kroutícího momentu. Příznivé hodnoty kroutícího momentu jsou dosahovány již při nízkých otáčkách. Škoda zkratkou HTP označuje své tříválcové motory. Oficiálně je motorizace uvedena pod obchodním označením HTP. V katalogu u nových modelů, můžeme najít v technických datech zkratku MPI, jde však o sice upravovaný, nicméně původní tříválec. Blok i hlava válců jsou stejné, MPI je vybaven protiběžným vyvažovacím hřídelem, který snižuje vibrace. Aby motor plnil emisní normu EU5 a byl kultivovanější, dostal proti 1.2 HTP jiný sací a výfukový trakt. Příjemným vedlejším efektem těchto úprav je zvýšení výkonu o 4 kW. [1]

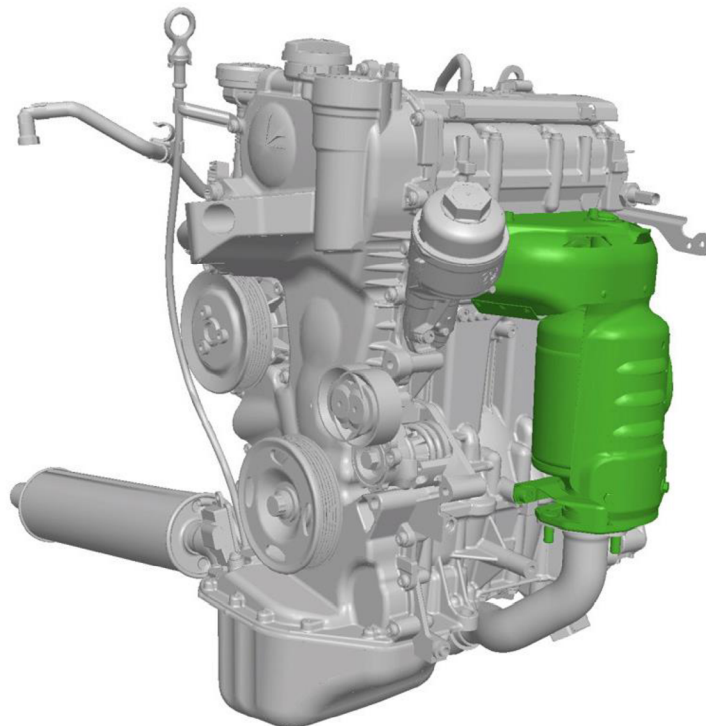


Obr. 2.1 – Parametry motoru 1,2 HTP [2]

Motor 1,2 HTP byly vyvinut firmou ŠKODA AUTO a.s. ve spolupráci s koncernem VW na konci devadesátých let. Jako šablona posloužila motorová řada EA 111. Motor vznikl odebráním jednoho válce z jednotky 1,6/77kW MPI, vrtání a zdvih pístů zůstal stejný (76,5 x 86,9 mm). Aby se tříválcový motor zbavil silných vibrací, je pod klikovou hřídelí v bloku motoru umístěn protiběžný vyvažovací hřídel. Tímto řešením se však motor nezabavil vibrací úplně. Místo rozvodového řemene nalezneme u motoru HTP řetěz s hydraulickým napínákem.



Od roku 2002 byly v nabídce motory s výkonovými variantami 40 kW a 47 kW. Také po jejich modernizaci v roce 2004, kdy byla nasazena nová hlava válců s většími roztečemi kanálů a jinak řešeným větším katalyzátorem zůstaly výkonové varianty motoru stejné. Do Škody Fabia II. a VW Polo se v roce 2007 dostaly inovované výkonové verze 44 kW a 51 kW s výkonem vyšším o 4 kW. Od roku 2009 se obě varianty motoru nabízejí standardně se dvěma vačkovými hřídelemi (HTP 12 V) a rozdílem je pouze modifikovaný SW řídicí jednotky Siemens Simos - mezi další změny provedené na motoru patří: tichý ozubený řetěz a s tím modifikace rozvodového systému a motor nově plní emisní předpis EURO 5. Nechybí ani upravené olejové čerpadlo. [1]



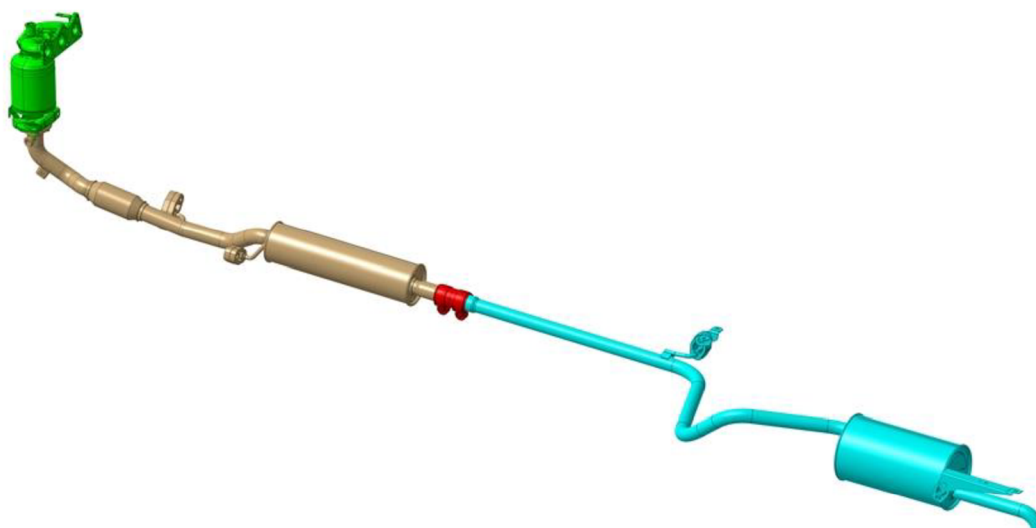
Obr. 2.2 – Motor EA111 - 1,2 HTP



2.1. Výfukový systém

Výfukový systém slouží k odvodu výfukových plynů vznikajících při práci motoru hořením paliva a rovněž k výraznému snížení hlučnosti, kterou motor při práci produkuje. Výfukové systémy vybavené katalyzátorem přispívají aktivně ke snižování hladiny škodlivých emisí uvolňovaných do ovzduší. Další důležitou funkcí je odvod spalin mimo karoserii vozidla, aby se nedostaly do kabiny vozu. [3]

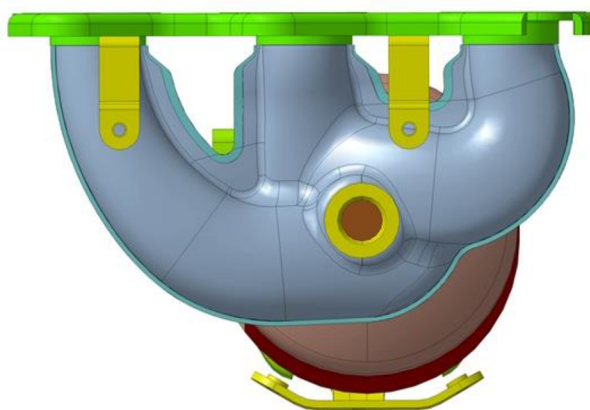
Výfuk je jedním z nejvíce namáhaných součástí automobilu. Díky výraznému střídání teplot, působením kyselé vody vzniklé kondenzací výfukových plynů, podléhá celé výfukové potrubí extrémní korozi. Z venkovní strany na výfuk působí voda a nečistoty. Dalším faktorem, který na výfuk působí, jsou vibrace, které namáhají ohyby a především spoje. [3]



Obr. 2.3 – Výfukový systém - 1,2 HTP

2.1.1. Sběrné výfukové potrubí

Sběrné výfukové potrubí je prvním dílem výfukového systému, odvádějícího výfukové plyny z hlav válců motoru do dalšího dílu výfukového potrubí. Jde o sběrné potrubí, které je pevně připojeno přímo na hlavu motoru. V ideálním případě by měly být trasování od každého válce motoru stejně dlouhé, vzhledem k omezeným možnostem v motorovém prostoru není toto vždy proveditelné. Svody vyústí v přední výfukové potrubí nebo přímo v katalyzátor. U motorizace 1,2MPI je sběrné výfukové potrubí součástí celého modulu i s třícestným katalyzátorem.



Obr. 2.4 – Sběrné výfukové potrubí - 1,2 HTP

Sběrné výfukové potrubí lze rozdělit na dvě skupiny. První skupina sběrného výfukového potrubí vyrobeného z šedé litiny se používá u starších motorů. Mezi výhody tohoto potrubí patří především odolnost vůči oxidaci, dostatečná pevnost a schopnost pohlcovat vibrace a hluk. Nevýhodou je pak vysoká hmotnost a především značný odvod tepla, který prodlužuje dobu náběhu katalyzátoru.

Druhá skupina sběrného výfukového potrubí je vyrobena ze žáruvzdorných ocelí. Hlavní výhodou je nízká hmotnost a malý odvod tepla. Potrubí je délkově laděné, lze využít tlakových pulsací ke zlepšení odvodu spalin, což vede k nepatrnému zvyšování výkonu motoru.



Obr. 2.5 – Litinové sběrné výfukové potrubí [4]



Obr. 2.6 – Ocelové sběrné výfukové potrubí [5]



2.1.2. Katalyzátor

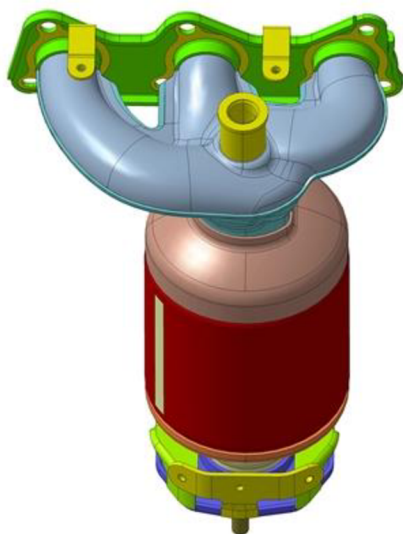
Konvenční motory spalující uhlovodíková paliva mají nedokonalé spalování, proto při jejich chodu vznikají škodlivé plyny - emise. Automobilový katalyzátor je zařízení snižující emise výfukových plynů. Katalyzátor přeměňuje za pomoci chemických reakcí škodlivé látky na vodu, oxid uhličitý a další méně nebezpečné látky. V praxi se velmi často používá rozdělení katalyzátorů na dvoucestné a třícestné. Tím je míněno, kolik základních škodlivin je schopen katalyzátor účinně likvidovat (CO, HC a NO_x). Také můžeme katalyzátory dělit na keramické a kovové.

Dvoucestný oxidační katalyzátor snižuje emise oxidu uhelnatého (CO) a nespálených uhlovodíků (HC). Podmínkou pro správnou funkci je dostatečné množství kyslíku ve spalinách.

Třícestný (trojcestný) katalyzátor na rozdíl od dvoucestného redukuje také emise oxidů dusíku NO_x. Třícestný katalyzátor může správně fungovat pouze v úzké oblasti poměru paliva a vzduchu. Aby se motor mohl pohybovat v této úzké oblasti, je nutné použít zpětnou vazbu pro řízení palivové směsi s tzv. lambda sondou. Tímto způsobem dnes pracují všechny modernější motory se vstřikováním paliva. Lambda sonda přes řídicí jednotku motoru jednoduše nastavuje poměr paliva a vzduchu tak, aby motor pracoval v optimálním režimu s tzv. stechiometrickou směsí.

Katalyzátor obsahuje vzácné kovy nanesené na reakční plochy nosiče, obvykle se používají směsi platiny (oxidační část) a rhodia (redukční část). Nosič má jemnou strukturu podobnou včelím plástvím, která i při kompaktních rozměrech katalyzátoru zaručuje velký povrch. Při teplotách 300 – 600 °C vznikají chemické reakce, které snižují obsah škodlivých složek. Nejdříve platina a rhodium štěpí oxidy dusíku na dusík (N) a kyslík (O) a pak platina a paládium spojují kyslík s oxidem uhelnatým a uhlovodíky. Výsledkem je nejedovatý oxid uhličitý (CO₂) a voda (H₂O). V současné době je katalyzátor schopen odstranit až 97 % uhlovodíků, 96 % oxidu uhelnatého a 90 % oxidů dusíku.

Při studených startech není katalyzátor účinný, začíná fungovat až od teploty cca 300 °C. Pro dosažení této teploty je zapotřebí jistý čas, aby bylo možné tento čas zkrátit, je nutné umístit katalyzátor co možná nejbližší k motoru. U kat modulu 3-válcového motoru ŠKODA je katalyzátor umístěn přímo za svody. Toto řešení umožňuje zahřátí na požadovanou teplotu v nejkratší možné době. [6]

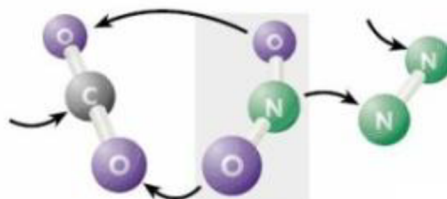


Obr. 2.7 – Katalyzátorový modul - 1,2 HTP

V katalyzátoru procházejí výfukové plyny keramickou vložkou, která je pokryta vzácnými kovy. Čištění výfukových plynů v katalyzátoru se skládá ze dvou základních procesů (chemických reakcí) redukce a oxidace.

Redukce

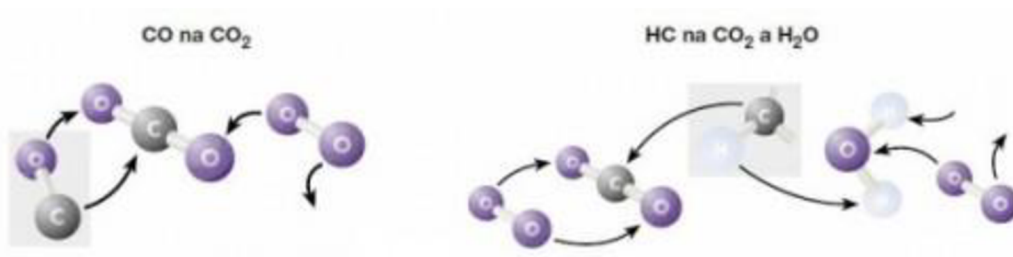
při redukci se oxidy dusíku NO_x se mění (redukuje) na dusík N_2 a na oxid uhličitý CO_2 .



Obr. 2.8 – Redukce [6]

Oxidace

při oxidaci je oxid uhelnatý CO přeměňován (oxiduje) na oxid uhličitý CO_2 , zároveň uhlovodíky HC oxidují na vodu H_2O a oxid uhličitý CO_2 . V podstatě se jedná o dodatečné spalování.



Obr. 2.9 – Oxidace [6]



3. TEPELNÉ CYKLICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ

3.1. Schub-Riss Test (SRT)

Schub-Riss test je experimentálním modelem, který slouží k ověření životnosti sběrného potrubí výfukových plynů. Jeho cílem je simulace teplotního zatížení sběrného potrubí při provozu. V laboratorních podmínkách je výfukové sběrné potrubí připojeno k motoru. Po spuštění je režim (výkon, otáčky) motoru nastaven tak, aby maximální naměřené povrchové teploty výfukového sběrného potrubí odpovídaly s určitou tolerancí maximálním naměřeným teplotám v provozních (testovacích) podmínkách.

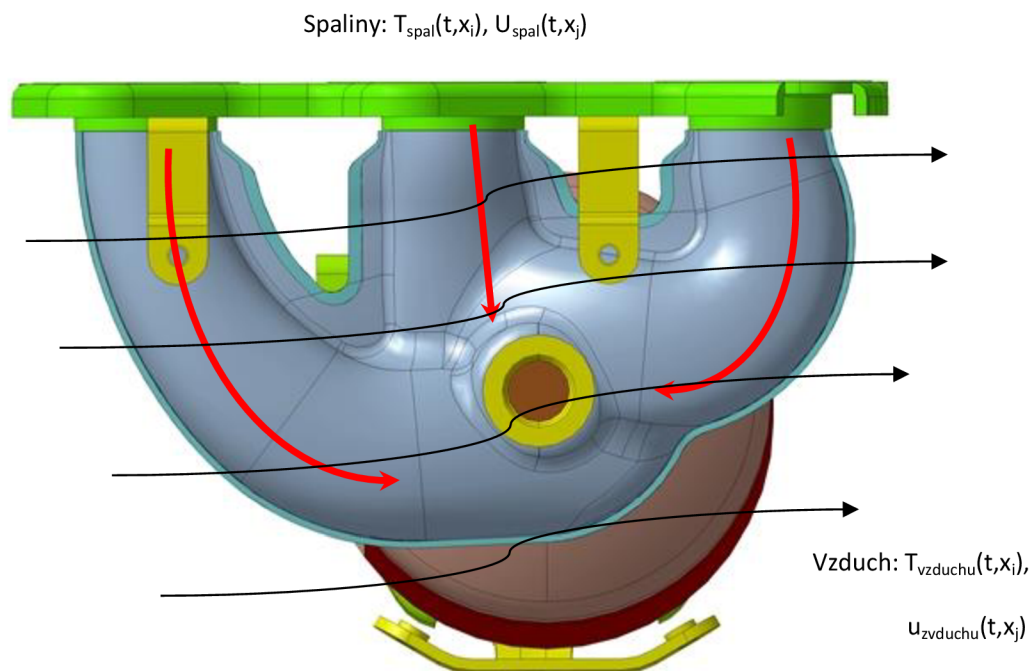
Po ustálení teplot na maximálních hodnotách je vypnuto zapalování, motorem je otáčeno rychlostí 2000 ot/min a dochází k postupnému ochlazení sběrného výfukového potrubí. Poté co teploty ve vybraných bodech sběrného potrubí poklesnou pod smluvní teplotu (200°C) je motor přepnut do provozního režimu a celý cyklus se opakuje.

Kritériem úspěšnosti testu je absolvování 2000 tepelných cyklů bez výskytu trhliny.

4. TEPELNÁ ANALÝZA – ROZLOŽENÍ TEPLOT V TĚLESE SBĚRNÉHO VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ

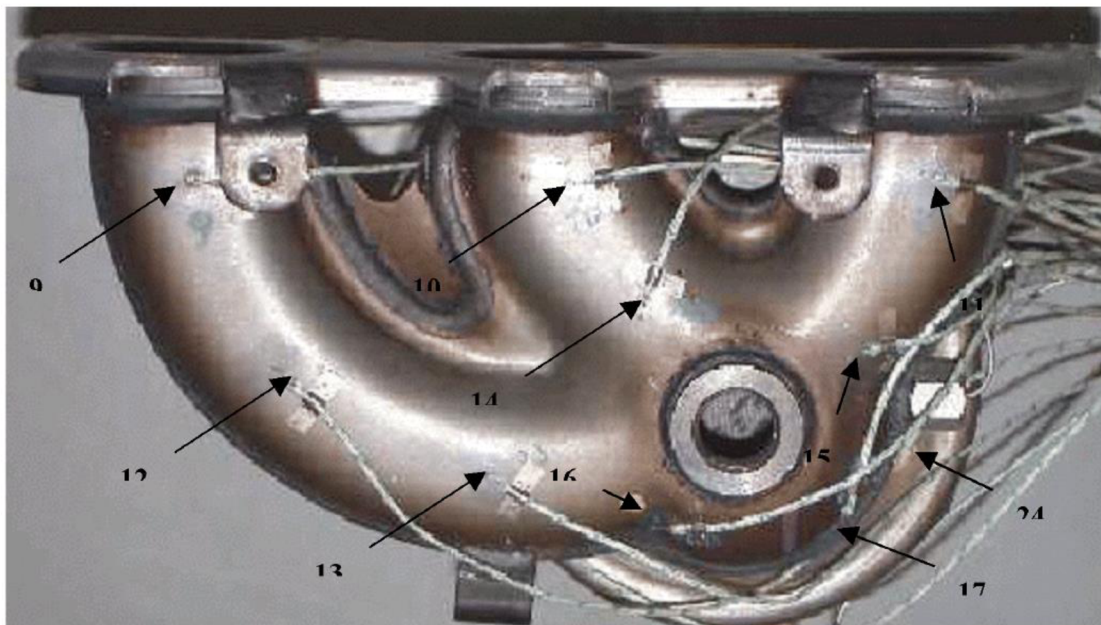
Zásadním faktorem ovlivňující přednost dosažených při numerické analýze porušení je použitý model pro určení rozložení teploty v tělese sběrného potrubí.

Sběrné výfukové potrubí je v provozu vystaveno působí časově proměnného teplotního pole. Na vnitřní straně je ohříváno spalinami, naproti tomu, na vnější straně dochází k ochlazení proudem vzduchu. Viz Obr. 4.1. Rozložení teplot ve sběrném lze stanovit dvěma metodami.



Obr. 4.1 – Proudové poměry při simulaci sběrného výfukového potrubí

První metoda je metoda, při níž teplota sběrného potrubí zadána v některých místech podle známé teploty, získané na základě experimentů. V ostatních bodech je zadána podmínka nulového tepelného toku do okolí. Při takto definovaných teplotních okrajových podmínkách je nutné předpokládat, že jsou naměřeny teploty v místech lokálních maxim teploty. Průběh teplot mezi jednotlivými zadanými teplotami je vzhledem k zadání okrajových podmínek monotónní funkce.



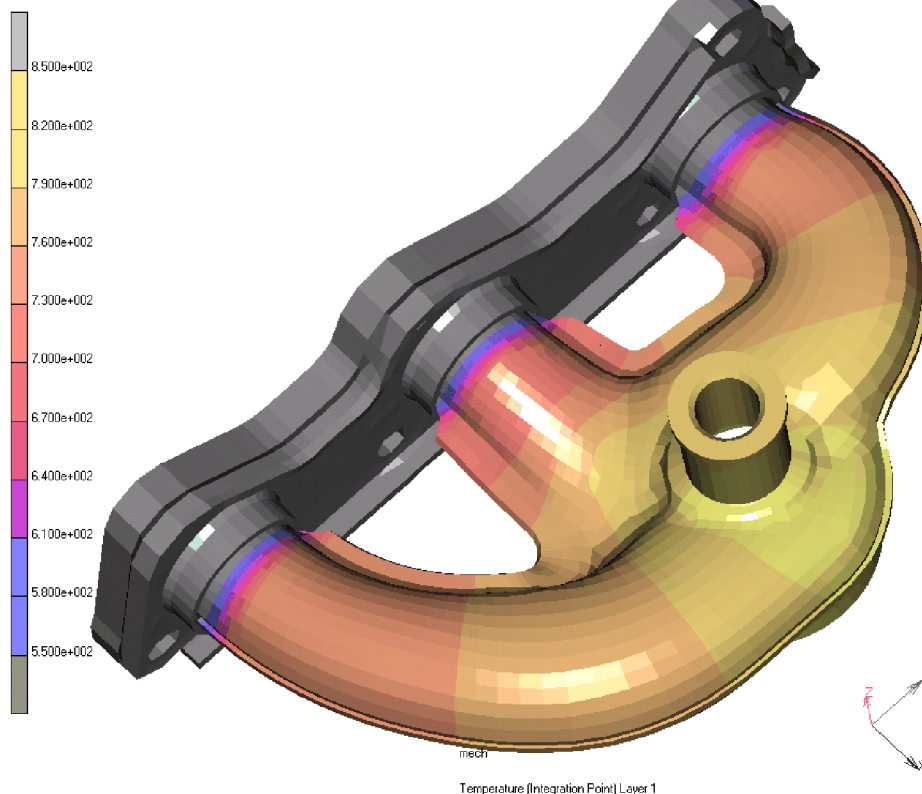
Obr. 4.2 – Povrchové měření teplot

Druhá metoda je metoda, při níž je teplotní pole ve sběrném potrubí vypočteno ze znalosti teploty a součinitele přestupu tepla spalin a okolního prostředí. Teploty spalin a okolního prostředí jsou určeny na základě experimentů, případně lze použít i odhady hodnot na základě výpočtů termodynamiky motoru. Součinitele přestupu tepla jsou stanoveny tak, aby výsledné teplotní pole na povrchu sběrného potrubí odpovídalo experimentálně určeným povrchovým teplotám. Průběh teploty spalin je simulován na základě naměřených teplot spalin na vstupu do sběrného potrubí a na vstupu do katalyzátoru. Průběh teploty spalin mezi vstupem a výstupem ze sběrného potrubí lze uvažovat jako lineární. V případě, kdy jsou k dispozici teploty spalin v dalších místech sběrného výfukového potrubí, je modelován lineární průběh teploty mezi těmito místy. Typický příklad vypočtených teplot je ukázán na Obr. 4.3. V tomto případě bylo kromě teplot spalin na vstupu a na výstupu ze sběrného potrubí použito i teploty spalin naměřené poblíž místa umístění lambda sondy. Aby byl výpočet co možná nejuniverzálnější a bylo ho možno použít již ve fázi návrhu, je součinitel přestupu tepla konstantní po celém vnitřním a po celém vnějším povrchu sběrného potrubí.



Inc: 10
Time: 1.600e+001

MSC



Obr. 4.3 – Příklad vypočtených teplot spalin

Na stěnách sběrného potrubí zadáme okrajovou podmínku pro přestup tepla. Součinitele přestupu tepla h_{spal} a h_{vzduch} určíme tak, aby výsledné rozložení povrchových teplot sběrného potrubí odpovídalo naměřeným povrchovým teplotám. Nejsou-li pro nový návrh sběrného potrubí k dispozici výsledky experimentů je vhodné zvolit hodnoty součinitele přestupu tepla podle již dříve vypočteného sběrného potrubí podobného tvaru. Tepelný tok do (ze) stěny sběrného potrubí je dán výrazy:

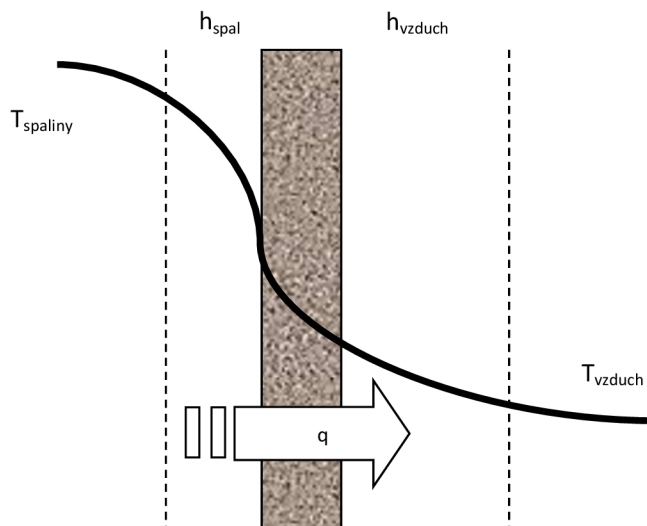
$$q_{spal} = h_{spal}(T_{spaliny} - T|_{vnitřní})$$

pro stranu spalin, kde $T_{spaliny}$ je místní teplota spalin určená v předchozím kroku a $T|_{vnitřní}$ je místní teplota vnitřního povrchu sběrného potrubí. Obdobně

$$q_{vzduch} = h_{vzduch}(T_{vzduch} - T|_{vnější})$$

pro stranu vzduchu, kde $T_{vnější}$ je místní teplota vnějšího povrchu sběrného potrubí. Teplota okolního vzduchu je pokládána za konstantní.

Tímto způsobem vypočteme nestacionární teplotní pole ve sběrném potrubí. Společně s mechanickými okrajovými podmínkami budou takto získané teplotní okrajové podmínky vstupními hodnotami pro výpočet plastických deformací v tělese sběrného potrubí.



Obr. 4.4 – Schéma prostupu tepla stěnou

Při výpočtu je možné obě metody vzájemně kombinovat a tak sledovat, do jaké míry je nárůst plastických deformací ovlivněn velikostí teploty, rozložením teploty po tloušťce stěny sběrného výfukového potrubí nebo rychlostí změny teploty v jednotlivých místech sběrného potrubí.

Nejvýznamnějším problémem, metody vycházející ze zadávání teplotního pole podle naměřených hodnot na povrchu sběrného potrubí, spočívá v neschopnosti metody postihnout teplotní gradient po tloušťce stěny potrubí. Teplota je měřena pouze v izolovaných bodech a mezi těmito body je předpokládán monotónní průběh teploty (bez maxim a minim). Pokud se lokální extrém teploty nacházející mimo měřená místa, metoda nedokáže tyto extrém postihnout, tzn. že volba měřících bodů zásadně ovlivňuje pole teplot. Navíc je třeba zdůraznit nutnost existence prototypu, na kterém měření proběhne.

Druhá metoda, pracující s teplotou plynu, se snaží uvažovat procesy přestupu tepla mezi spaliny, sběrným potrubím a vzduchem. Jistá nepřesnost může vzniknout neuvažováním dynamiky spalin a s tím spojených mechanismů vyplývajících z teorie proudění stlačitelných tekutin. Dalším problémem je volená konstantní hodnota součinitele přestupu tepla na vnější i vnitřní straně sběrného potrubí a konstantní teplota vzduchu na vnější straně. Tyto



nedostatky by bylo možné odstranit numerickým modelováním proudění spalin v kanálech potrubí a prouděním vzduchu na vnější straně s použitím kódů CFD. Další modelování by ale prodloužilo dobu potřebnou k dosažení výsledků. I přes výše uvedené problémy respektuje metoda pracující s teplotami plynů dostatečně fyzikální podstatu probíhajícího děje a umožňuje postihnout, zvláště v kombinaci s časovým průběhem teplot spalin, i děje, které ostatním metodám unikají. Jako příklad může být uveden výpočet teplotního gradientu ve stěně potrubí a průběh teplotních vln ve stěně při náhlém vzrůstu nebo poklesu teploty. Navíc lze tuto metodu použít i v případě, že fyzický prototyp sběrné výfukové potrubí není ještě k dispozici, tzn. ve fázi návrhu.

4.1. Postup výpočtu pole teplot

Při výpočtu podle první metody vycházíme ze znalosti naměřených teplot ve významných místech na vnějším povrchu sběrného potrubí. Tyto teploty jsou zadány jako okrajové podmínky pro výpočet teplotního pole. V místech, kde není známá hodnota teploty je zadána okrajová podmínka nulového tepelného toku ze stěny sběrného potrubí do okolí. Časový průběh teploty v jednotlivých bodech je zadán podle po částech lineární funkce. Teploty v maximech této funkce odpovídají maximálním teplotám naměřeným během cyklu. Provedením výpočtu získáme rozložení teplotního pole ve sběrném potrubí jako funkci času. Toto teplotní pole slouží jako teplotní okrajová podmínka pro výpočet vývoje plastických deformací.

Výpočet podle druhé metody je komplexnější a předpokládá poznání hlubší fyzikální podstaty sledovaného děje. Nejprve je vypočteno rozložení teploty spalin v potrubí na základě experimentálně naměřených teplot spalin na vstupu do sběrného potrubí a teplot spalin před katalyzátorem. Rozložení teploty spalin je vhodné zpřesnit i zadáním teploty spalin v jiných místech. Časový průběh teplot spalin může být zadán obdobně jako v předchozím případě podle po částech lineární funkce nebo je možné zadat časový průběh na základě skutečného průběhu teploty spalin. Tímto postupem získáme nestacionární rozložení teplot spalin, které bude údajem pro výpočet teplotního pole sběrného potrubí.



5. ELASTO-PLASTICKÁ ANALÝZA DEFORMACE

Cílem elasto-plastické analýzy deformace sběrného výfukového potrubí je stanovení místa a velikosti plastických deformací vzniklých na sběrném výfukovém potrubí při cyklicky se opakujícím teplotním zatížení. Naplnění tohoto cíle vyžaduje:

- vytvoření FE modelu zkoumaného tělesa
- sestavení teplotních a mechanických okrajových podmínek
- znalost materiálových vlastností a jejich teplotních závislostí

5.1. FE model tělesa sběrného výfukového potrubí

Pro realizované numerické simulace byl užit systém pro analýzu metodou konečných prvků MSC-MARC. Pre- a post-processing byl proveden prostřednictvím MSC-MENTAT.

Předpokládá se, že vždy je dostupný prostorový CAD model zkoumaného tělesa, na jehož základě se vytvoří optimálně hustá síť konečných prvků. Pro modelování desky, zastupující hlavu válců, byl použit osmiuzlový izoparametrický hexaedrový element prvního stupně pro výpočet sdílení tepla (MARC 43). Gradient teploty pro tento prvek je konstantní v celém elementu a v uzlu má pouze jeden stupeň volnosti – teplotu. Pro následný výpočet deformace a napětí byl tento element nahrazen geometricky shodným izoparametrickým elementem prvního stupně (MARC 7). Deformace je konstantní v celém objemu tohoto elementu a v každém uzlu má tři stupně volnosti (translační).

Pro popis tenkostěnných dílů sběrného výfukového potrubí byl použit bilineární, čtyřuzlový skořepinový element pro výpočet sdílení tepla (MARC 85). Integrace po šířce elementu je provedena v 11 bodech na základě Simpsonova pravidla, což umožňuje zohlednit různou teplotu napříč tloušťkou. Pro následnou analýzu napětí je tento element kompatibilní s odpovídajícím skořepinovým napěťovým elementem (MARC 75). Jedná se též o bilineární, čtyřuzlový element, ovšem se šesti stupni volnosti v každém uzlu (3 posunutí + 3 rotace), umožňující výpočet příčných smykových efektů.

Použití skořepinových prvků pro tenkostěnnou část konstrukce je vhodné především proto, že nelinearita úlohy vyžaduje iterační přístup a počet elementů a uzlů, pokud bychom chtěli použít pouze objemové elementy, by vedl ke značnému prodloužení úlohy.



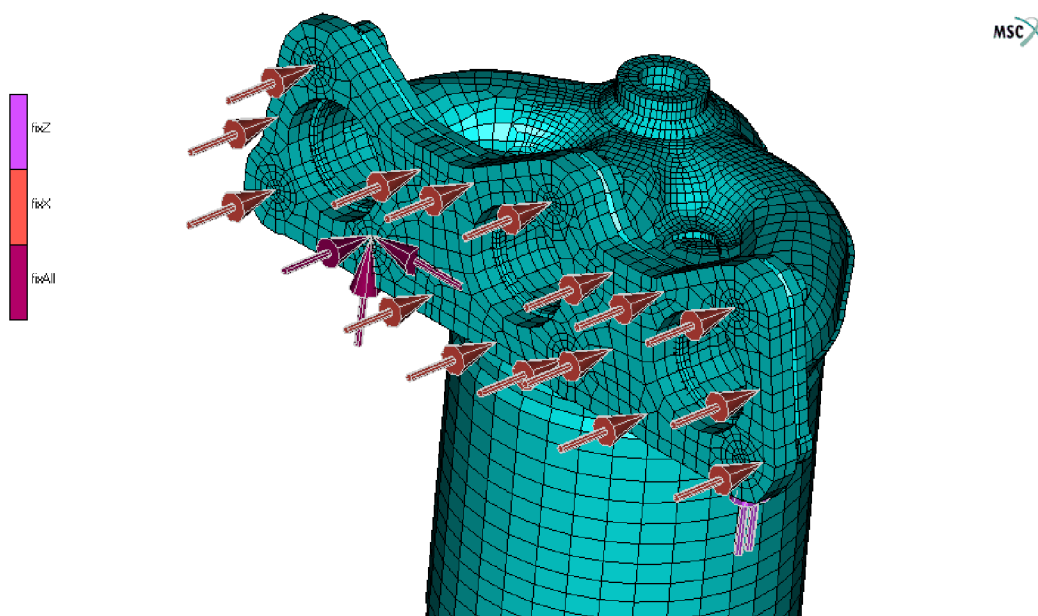
5.2. Okrajové podmínky

Teplotní okrajová podmínka

Je dána nestacionárním rozložením teplotního pole ve sběrném výfukovém potrubí. Teplotní pole je stanoveno metodami, které jsou popsány v kapitole - 4.1. Postup výpočtu pole teplot, této práce.

Mechanické okrajové podmínky

I když je analýza teplotních polí zásadní pro správnost řešení, je základem výpočtu plastické definice mechanická analýza, při které je nutné zadat odpovídající mechanické okrajové podmínky (viz Obr. 5.1.). V tomto případě byla okrajovými podmínkami simulována vazba s hlavou motoru. Aby byla postižena rozdílná teplotní roztažnost materiálu sběrného potrubí a materiálu hlavy motoru bylo vlastní sběrné potrubí pevně spojeno s hliníkovou „deskou“ dostatečné tloušťky, která zastupovala hlavu motoru. Hlava motoru představuje tuhé těleso, a proto bylo na opačné straně, než je připojeno sběrné výfukové potrubí zamezeno posuvu ve směru kolmo na desku. Další okrajové podmínky jsou zadány tak, aby nebyly omezeny teplotní dilatace a aby byla zajištěna statická určitost úlohy. Tyto zjednodušené okrajové podmínky a vazby byly použity pro první fázi výpočtů, které měly zajistit dostatečné poznatky o vlivu některých fenoménů na výpočet.



Obr. 5.1 – Mechanické okrajové podmínky



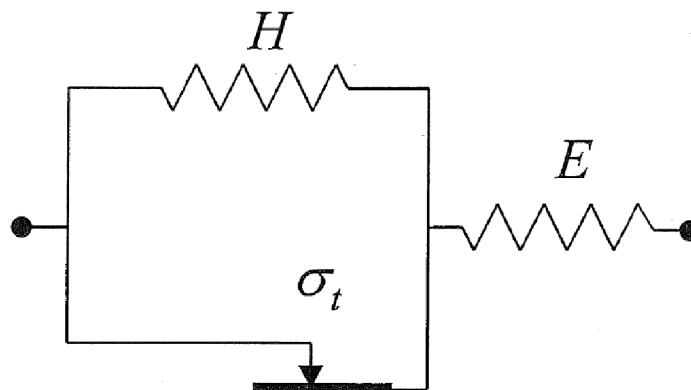
Mechanické okrajové podmínky lze dále přibližovat realitě, například zahrnutím vlivu těsnění mezi hlavou válců a sběrným výfukovým potrubím a napojení na katalyzátor, a to za cenu prodloužení výpočtu. Provedené analýzy ovšem prokázaly, že vliv napojení katalyzátoru a dalšího pokračování výfukového potrubí je díky jeho způsobu zavěšení ve vozidle zanedbatelný. Vliv těsnění se ovšem ukázal jako podstatný, a proto mu bude věnována samostatná kapitola.

5.3. Model materiálu

Výpočtový model materiálu musí zahrnovat takové vlastnosti materiálu, které významným způsobem ovlivňují základní cíl numerické simulace, t.j. lokaci a velikost plastické deformace při cyklicky se opakujícím teplotním zatížení. Jsou to teplotní závislosti následujících materiálových vlastností:

- Youngův modul pružnosti
- mez kluzu
- křivky zpevnění
- měrná tepelná kapacita
- teplotní roztažnost
- hustota

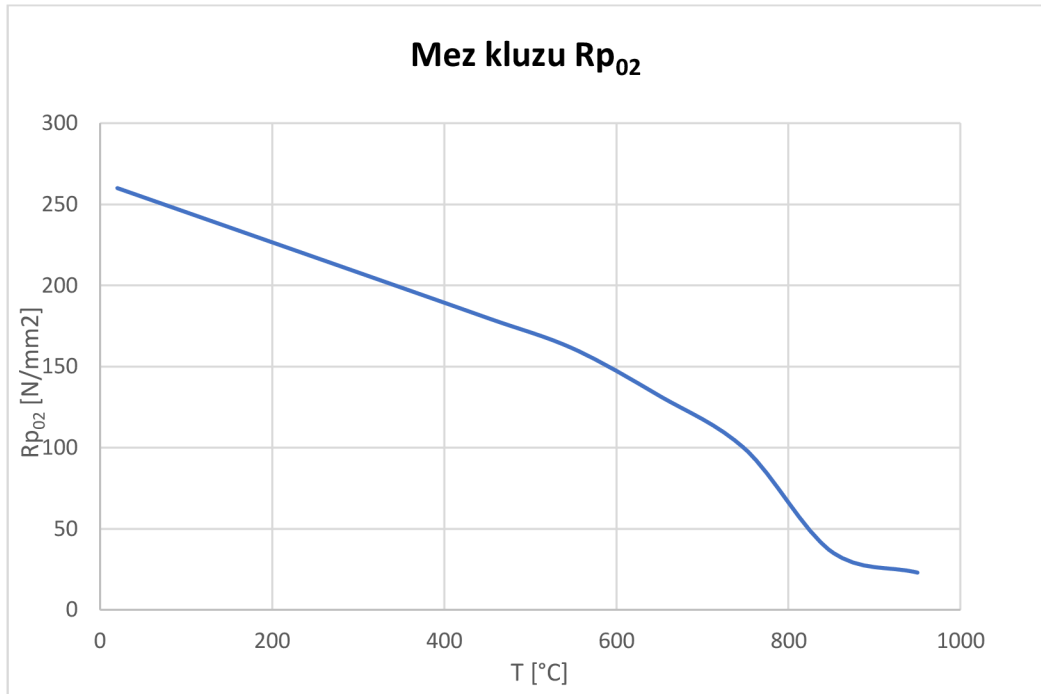
Znalost teplotních závislostí modulu pružnosti, meze kluzu a křivek zpevnění umožňuje aplikaci elasto-plastického modelu materiálu. Na Obr. 5.2 je prostřednictvím základních reologických prvků znázorněn užitý typ materiálového modelu, kde E má význam elastického a H plastického modulu materiálu.



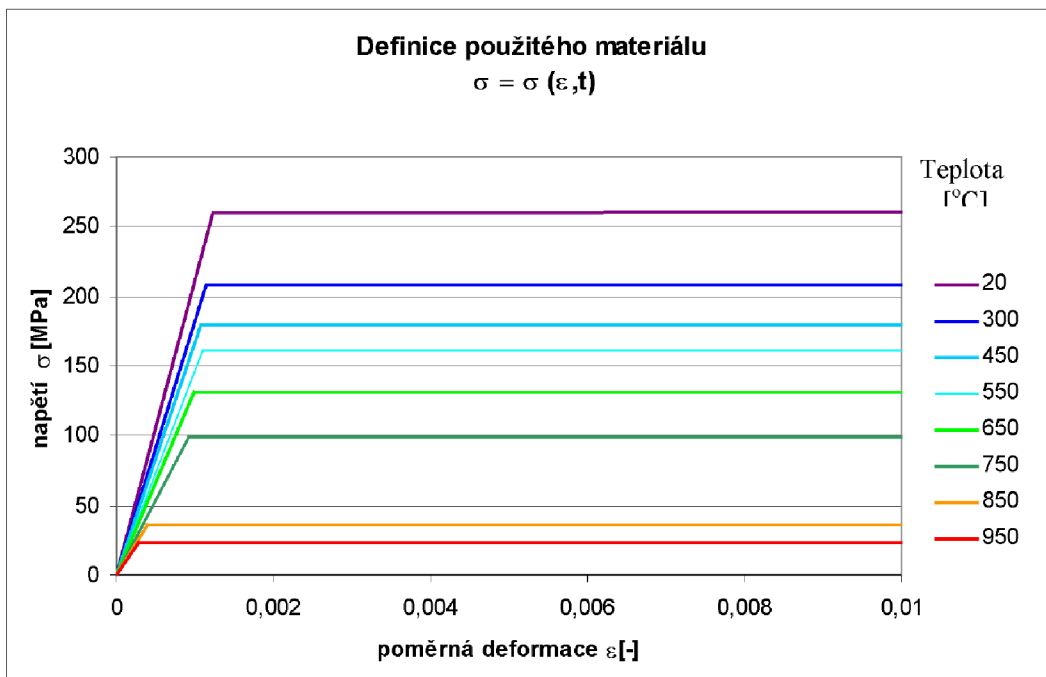
Obr. 5.2 – Materiálový model



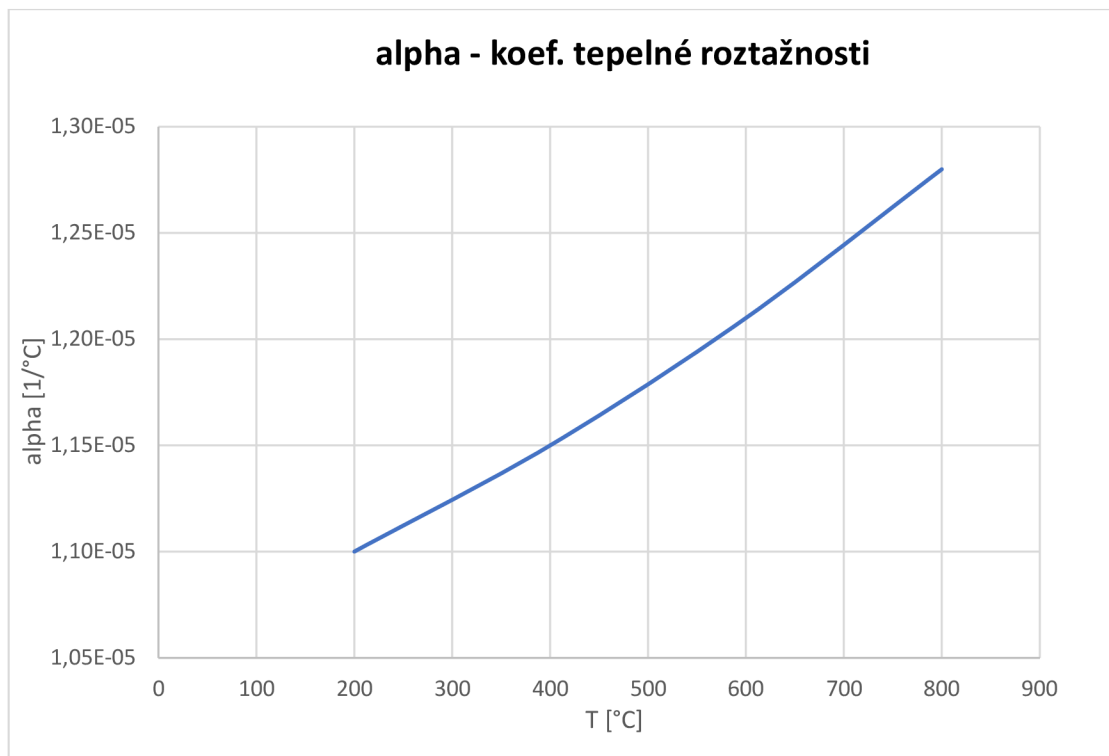
V grafech níže jsou uvedeny výše zmíněné vlastnosti pro materiál X8CrTiNb18. Z tohoto materiálu bylo zhotoveno těleso sběrného výfukového potrubí, které je blíže zkoumáno v této diplomové práci.



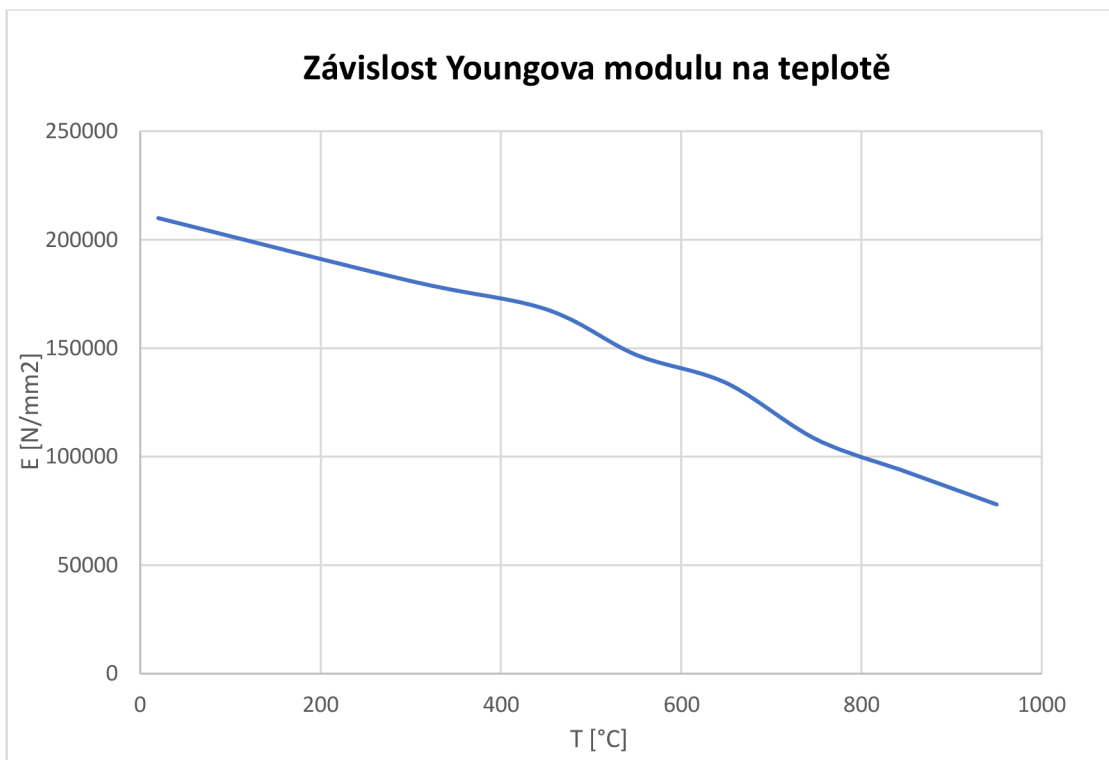
Graf 5.1 – Závislost meze kluzu na teplotě



Graf 5.2 – Vlastnosti materiálu



Graf 5.3 – Koeficient tepelné roztažnosti

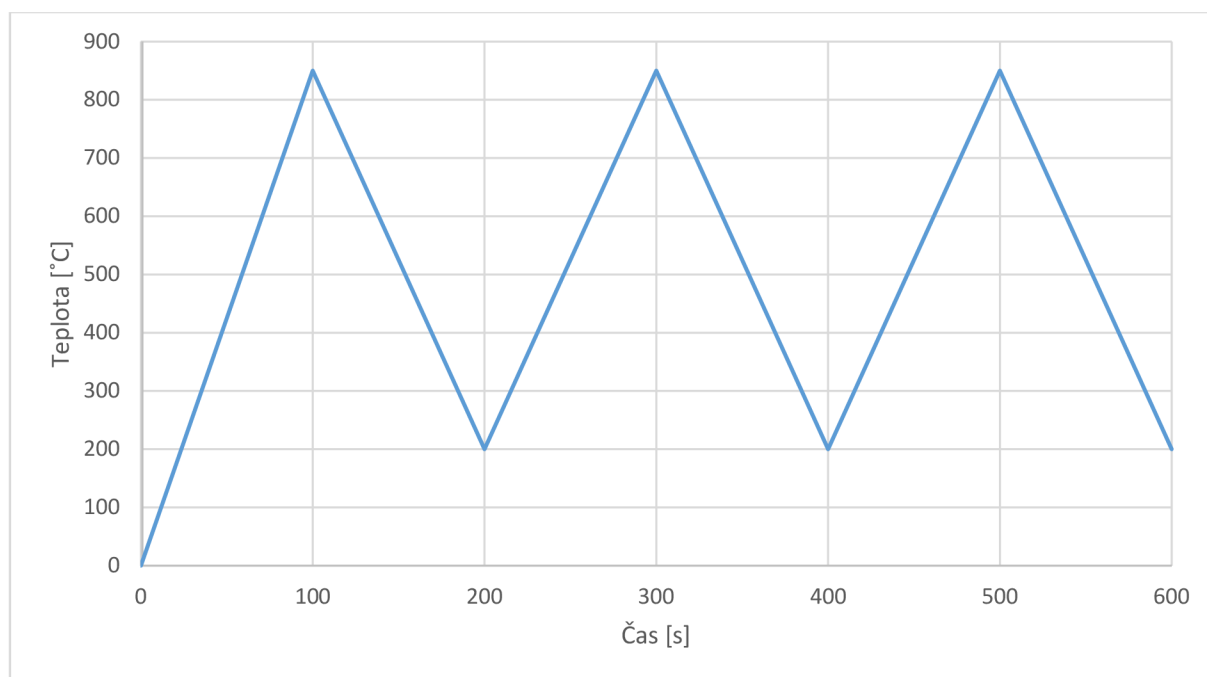


Graf 5.4 – Závislost koeficientu roztažnosti a Youngova modulu na teplotě



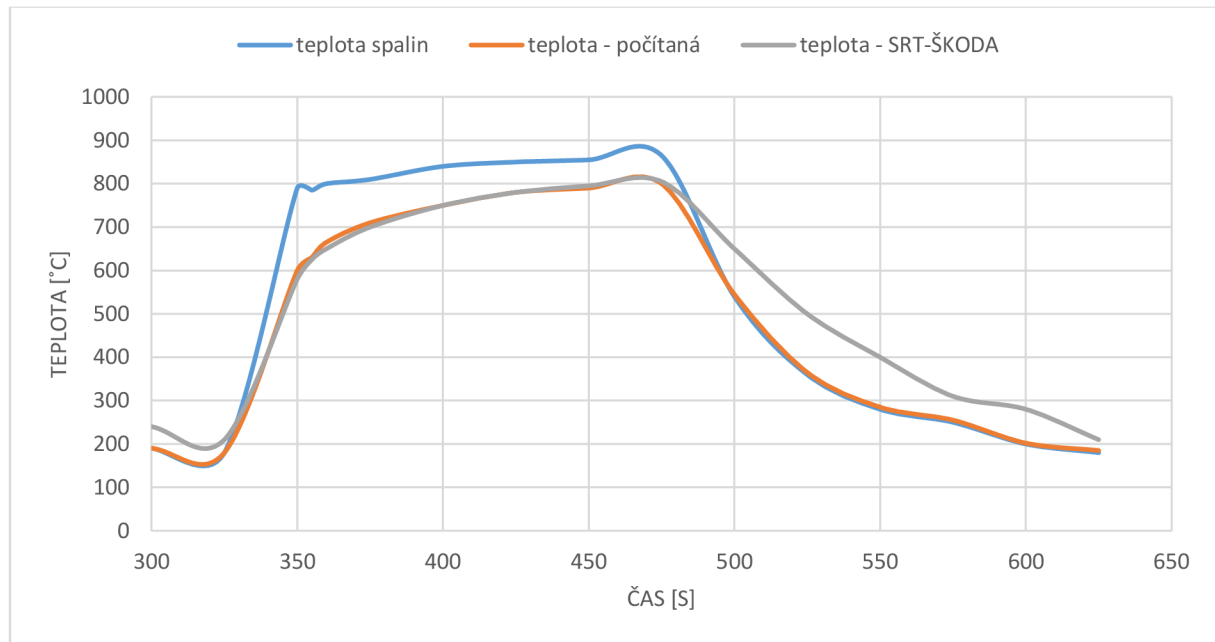
5.4. Postup výpočtu plastických deformací

Analýza má za cíl určení plastických deformací vzniklých na sběrném potrubí katalyzátoru při cyklicky se opakujícím teplotním zatížení. Cílem výpočtu není simulace provedení celého Schub-Riss testu (2000 cyklů). Protože se po prvních výpočtech ukázalo, že přírůstek plastických deformací ve významných bodech se již po proběhnutí prvních cyklů ustálí, je možné na výsledek Schub-Riss testu usuzovat už po provedení výpočtu prvních cyklů. Prakticky to znamená, že výpočet je vhodné omezit na první 3 cykly. Typický průběh teplot v exponovaném místě sběrného výfukového potrubí, použitý při výpočtu teplotního pole první metodou, lze nahlédnout na Graf 5.5. Je vhodné poznamenat, že jde o kvazistatický výpočet, který probíhá jako posloupnost rovnovážných stavů v „čase“.



Graf 5.5 – Typický průběh po částech lineární funkce teploty používaný při výpočtu

Při výpočtech druhou metodou, která vychází z teploty spalin je situace složitější. Výpočet může být kvazistatický, a teda nepřiblíží k rychlosti změn teplotních podmínek, nebo může uvažovat čas (výpočet v časové oblasti) a zohlednit tuto rychlost změn. Porovnání takto dosažených výsledků s experimentem lze nahlédnout v Graf. 5.6. Lze zde pozorovat uspokojivou shodu naměřených a vypočtených teplot v průběhu jednoho teplotního cyklu Schub-Riss testu.



Graf 5.6 – Průběhy teplot spalín

V průběhu řešení problému bylo učiněno množství výpočtů. Na základě těchto výpočtů a na základě odpovídajících experimentů lze formulovat tyto zásadní poznatky:

- první metoda výpočtu teplotního pole dává optimističtější výsledky než metoda určování teplotního pole na základě teploty spalín.
- výpočet v reálném čase neposkytujeme odlišné výsledky oproti výpočtu kvazistatickému. Lze teda soudit, že o velikosti přírůstků plastické deformace nerozhoduje rychlost změny teplotních podmínek.
- výpočty ukázaly podstatný vliv nejen maximální teploty spalín, ale také podstatný nárůst plastických deformací v případě nižší minimální teploty v průběhu cyklování. I tuto teplotu je tedy nutné testování řádně kontrolovat.



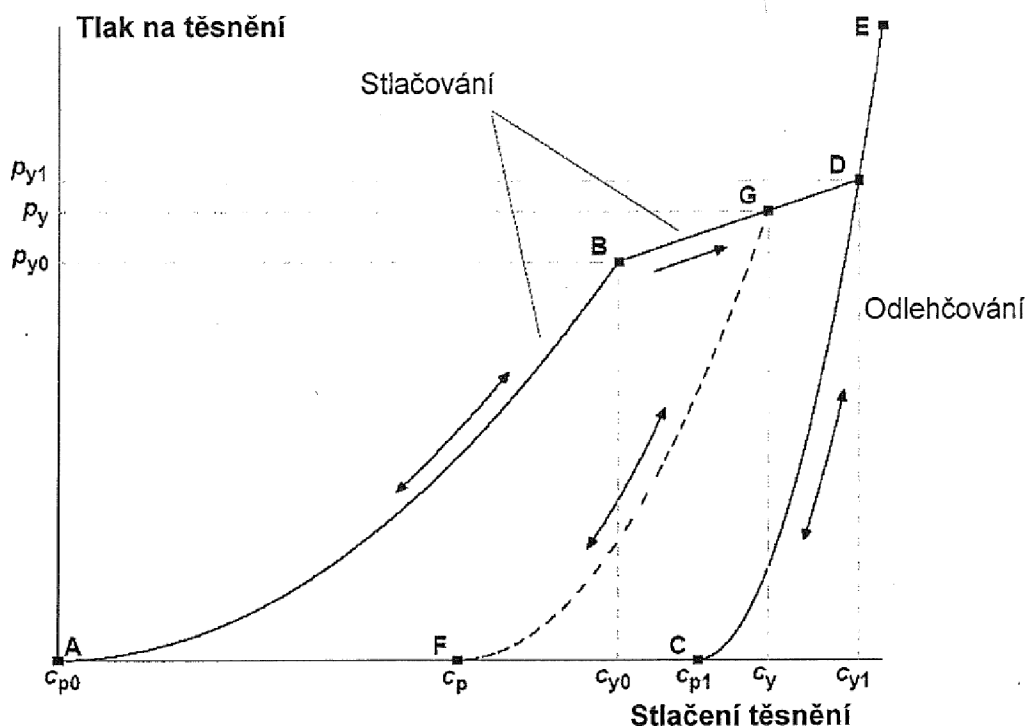
6. MODEL TĚSNĚNÍ A JEHO VLIV

V předchozí části bylo konstatováno, že numerická simulace Schub-Riss testu zpočátku neuvažovala fenomén těsnění a zjednodušovala spojení sběrného výfukového potrubí s hlavou válců jako dokonale pevné. Důvodem byla především složitost numerického modelu a také časová náročnost při výpočtu s těsněním. Pro ověření některých hypotéz se navíc zdálo dostatečné používat jednodušší modely.

Těsnění jsou většinou konstruována jako vícevrstevné, tenké díly, složené z vrstev o proměnlivé tloušťce. Těsnění jsou navrhována tak, aby měla specifické chování s ohledem na požadované těsnicí vlastnosti ve směru tloušťky. Konstrukce těsnění má zajistit těsnost jednotlivých částí zařízení i v případě proměnlivého mechanického nebo teplotního zatížení.

Vlastnosti těsnění ve směru tloušťky, které jsou obvykle vyjadřovány jako závislost tlaku těsnění (gasket pressure) na stlačení těsnění (gasket closure), jsou velmi nelineární a většinou podléhají výrazným změnám, způsobeným vznikem plastických deformací v průběhu provozu. Takové chování je velmi těžko popsitelné na základě standardních modelů materiálů. Taktéž vytvoření FEM modelu, který by obsahoval kompletní geometrii a materiálové vlastnosti jednotlivých součástí těsnění, je ve většině případů jen těžko proveditelné, a to jak vzhledem k náročnosti výpočtu, který by musel brát v úvahu kontakt a materiálové nelinearity, tak i vzhledem k neznalosti materiálových vlastností a stavu jednotlivých částí těsnění.

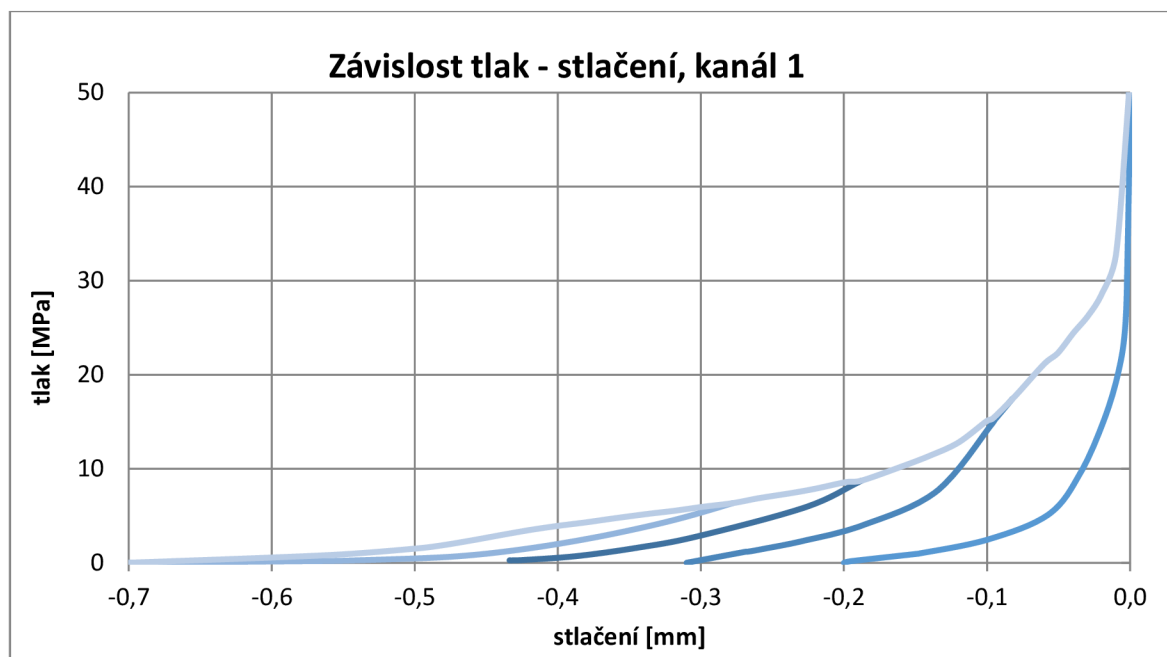
To jsou důvody pro použití speciálních prvků, „Gasket“ elementů, které umožňují modelovat těsnění pouze s použitím jednoho elementu na šířku. Tomuto elementu jsou předepsány vlastnosti (závislost tlaku na stlačení), které jsou získány buď na základě experimentu nebo analyticky. Kromě vlastností při stlačování je možné ve výpočtu zohlednit také chování materiálu v tahu, smykové a membránové vlastnosti a termomechanické vlastnosti jako jsou teplotní roztažnost nebo tepelná vodivost. Při výpočtu je rovněž možné vzít v úvahu proměnlivou počáteční tloušťku těsnění. Speciální „Gasket“ elementy mohou být použity jak v mechanických, tak i v tepelných výpočtech.



Graf 6.1 – Charakteristika těsnění

Při postupném zatěžování je možné na charakteristice těsnění rozlišovat několik úseků (viz Obr. 6.1). Úsek A-B odpovídá nelineárnímu elastickému zatěžování těsnění v počáteční fázi. Po překročení meze kluzu těsnění (bod B) dochází při dalším stlačování k nárůstu plastické deformace až po úplného stlačení těsnění (úsek B-D). Pokud dojde ve stavu ležícím na křivce B-D k odlehčování a následnému zatěžování, bude se stav těsnění nacházet na křivce odpovídající nelineární elastické závislosti (například křivka G-F). Při plném stlačení probíhá již stlačování a odlehčování po nelineární elastické křivce (C-D-E). Úsek D-E odpovídá použitému modelu materiálu těsnění. Pokud je těsnění již jednou plně stlačené, dochází při dalším zatěžování k přírůstku plastické deformace.

Zatěžovací a odlehčovací křivky pro model těsnění jsou obvykle získané na základě experimentů, při kterých se provádí několikanásobné stlačení těsnění následné odlehčením a opětovným stlačením vyšším tlakem. Příklad naměřené charakteristiky těsnění je zobrazen v Graf 6.2. Jak zatěžovací a odlehčovací charakteristiky, tak i ostatní parametry těsnění mohou být závislé na teplotě. Těsnění je věnována kapitola - 10. Měření charakteristiky těsnění sběrného výfukového potrubí.



Graf 6.2 – Experimentálně získaná charakteristika těsnění

Na základě provedených výpočtů je možné sledovat těsnicí schopnost těsnění v průběhu nestacionárního zatížení. Ve zde sledovaném případě je tímto zatížením nestacionární teplotní pole. V příloze jsou znázorněny těsnicí tlaky a stlačení těsnění pro zahřátý a chladný stav sběrného potrubí.

- Vliv charakteristiky těsnění. V kapitole 10. jsou znázorněny těsnicí tlaky a stlačení těsnění pro čtyři různé charakteristiky těsnění. Rozdíl, který je z výsledků patrný ukazuje na nutnost přesné definice vlastnosti těsnění, a to nejlépe na základě precizně provedených experimentů.
- Vliv tvaru příruby. Na těsnicí schopnost těsnění má nezanedbatelný vliv také tvar příruby sběrného potrubí. Při výrobě může dojít, a zpravidla i dochází, k deformaci příruby sběrného potrubí a k její odchylce od navrženého tvaru. Tato odchylka má značný vliv na průběh zatěžování, při kterém může docházet k netěsnostem v jednotlivých částech a naopak k vyčerpání těsnicí schopnosti vlivem maximálního stlačení jinde.



7. ÚNAVOVÁ ANALÝZA – ODHAD ŽIVOTNOSTI

Hlavním cílem únavové analýzy je spolehlivá predikace životnosti zkoumaného konstrukčního uspořádání výfukového sběrného potrubí. Jak již bylo řečeno v úvodu této práce, je materiál sběrného výfukového potrubí zatěžován tak, že v kritických místech vzniká cyklicky proměnná plastická deformace. Je jednoznačně prokázáno, že cyklicky proměnné plastické deformace vedou ke vzniku a šíření únavové trhliny a tedy k únavovému lomu. V případě Schub-Riss testu k únavovému porušení sběrného výfukového potrubí dochází po přibližně 1500 až 2000 zatěžovacích cyklech.

Za oblast nízkocyklové únavy se považuje cyklické zatěžování vedoucí k lomu při počtu cyklů menší než 10^5 . Je tedy zřejmé, že Schub-Riss test lze považovat za test nízkocyklové únavové životnosti daného sběrného výfukového potrubí. Při určení nízkocyklové únavové životnosti se uplatňuje tzv. koncepce lokálního napětí a deformace. Podle této koncepce se kriticky deformovaná oblast nahrazuje zkušebním vzorkem a zkoumá se počet cyklů potřebných ke vzniku makroskopické trhliny. Při makroskopickém elastickém zatěžování celého tělesa, v našem případě je to sběrné výfukové potrubí, se zatěžování lokálního zkušebního vzorku blíží k tzv. tvrdému zatěžování. Poznamenejme, že při tvrdém zatěžování se cyklicky zatěžování řídí amplitudou celkové deformace, resp. Plastické deformace. Za předpokladu platnosti hypotézy kumulace poškození je závislost počtu cyklů do lomu na amplitudě celkové deformace ε_{at} resp. Plastické deformace ε_{ap} dána Manson – Coffinovým zákonem. V případě, že únavová životnost je určena především amplitudou plastické deformace ε_{ap} je křivka životnosti dána vztahem:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^c$$

kde:

ε'_f je součinitel únavové tažnosti,

c je exponent tažnosti,

$2N_f$ je počet cyklů do lomu.



Materiál	ϵ_f	c
Al	0,79	-0,61
Cu	0,29	-0,51
Ocel 11423.0	1	-0,62
Ocel 12050	0,56	-0,56
Ocel 13030.1	0,84	-0,58
Ocel 14331.6	0,39	-0,56
Ocel 15128.5	0,53	-0,57
Ocel 16333	2,17	-0,78
Ocel 17021	2,54	-0,82
Ocel 13%Cr 6%Ni 0,5%Mo	0,2	-0,86
Ocel ROL-N (zušlechťená)	3,33	-0,91

Tab. 7.1 – Parametry charakterizující cyklickou plasticitu a nízkocyklickou únavovou životnost vybraných materiálů

Poznamenejme, že součinitel únavové tažnosti ϵ_f je v dobré korelaci s lomovou deformací ϵ_f , kterou lze určit z tahové zkoušky. Známe-li parametry ϵ_f a c, lze pro požadovanou životnost určit velikost saturované plastické deformace, resp. pro zadanou amplitudu saturované plastické deformace počet cyklů do lomu $2N_f$. Pro vybrané materiály jsou zmírněné parametry uvedeny v Tab. 7.1. Pokud tyto materiálové parametry nejsou dostupné pro zkoumané sběrné potrubí, je možné volit následující postup.

Předpokládejme, že konstrukční návrh výfukového sběrného potrubí navazuje na již realizované výfukové výfukového potrubí, u něhož byla stanovena životnost $[2N_f]_{exp}$

prostřednictvím Schub-Riss testu. Prostřednictvím Manson-Coffinova vztahu lze pak ocenit životnost $[2N_f]_{konstr}$ konstrukčního návrhu dle vztahu:

$$[N_f]_{konstr.} = [N_f]_{exp.} \cdot \left(\frac{[\epsilon_{ap}]_{konstr.}}{[\epsilon_{ap}]_{exp.}} \right)^{\frac{1}{c}}$$

V prvním přiblížení volíme $c = 0,6$. Hodnoty saturované plastické deformace jak pro konstrukční návrh $[2N_f]_{konstr.}$, tak i pro experimentálně zkoumané $[2N_f]_{exp.}$ výfukové sběrné potrubí oceníme výpočtem prostřednictvím FEM.



8. POROVNÁNÍ SÉRIOVÝCH A VÝVOJOVÝCH VARIANT SBĚRNÉHO VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ Z HLEDISKA PLASTICKÝCH DEFORMACÍ

Vývojové varianty mají v místě spojení jednotlivých kanálů komoru, která podporuje tangenciální proudění. Práce na nich je zaměřena na minimalizaci mechanického zatížení materiálu tak, aby byla zajištěna požadovaná životnost dílu.

Simulace zahrnují první tři teplotní cykly (tři náběhy na maximální teplotu a po nich následující tři ochlazení). Sledovaným kritériem pro posouzení životnosti sběrného potrubí je přírůstek plastické deformace v jednotlivých půlcyklech. Při sledování této veličiny při ohřevech a ochlazeních se ukazuje, že jejich hodnoty ve druhém a třetím cyklu jsou velmi blízké, což řešitele opravňuje k očekávání, že chování je od třetího cyklu stabilní.

8.1. Výpočetní postup

Výpočet simuluje tři po sobě jdoucí teplotní cykly, které odpovídají cyklům používaným při testu životnosti sběrného výfukového potrubí. První cyklus je odlišný od následujících cyklů tím, že ohřev je proveden z výchozí teploty 20°C. Ostatní cykly se liší tím, že ohřátí tělesa vychází z teploty 200°C. Ohřátí je provedeno na teplotu, která odpovídá zatížení motoru při požadovaném provozním režimu, a která je různá v různých místech potrubí. Po ohřátí následuje ochlazení na teplotu 200°C, která je stejná v celém objemu potrubí.

Teplota, na kterou je potrubí ohřáto, vychází z měření teplot ve vybraných bodech při zkoušce na okruhu. Rozmístění měřených bodů spolu s jejich označením je na Obr. 4.2. Odpovídající rozmístění na modelu a zavedení oblastí s příslušnými teplotami do výpočtu je na Obr. 8.8. Teplotní cykly předpokládají proporcionální změnu teplot při ochlazování resp. ohřívání potrubí a konstantní teplotu po tloušťce stěny potrubí.



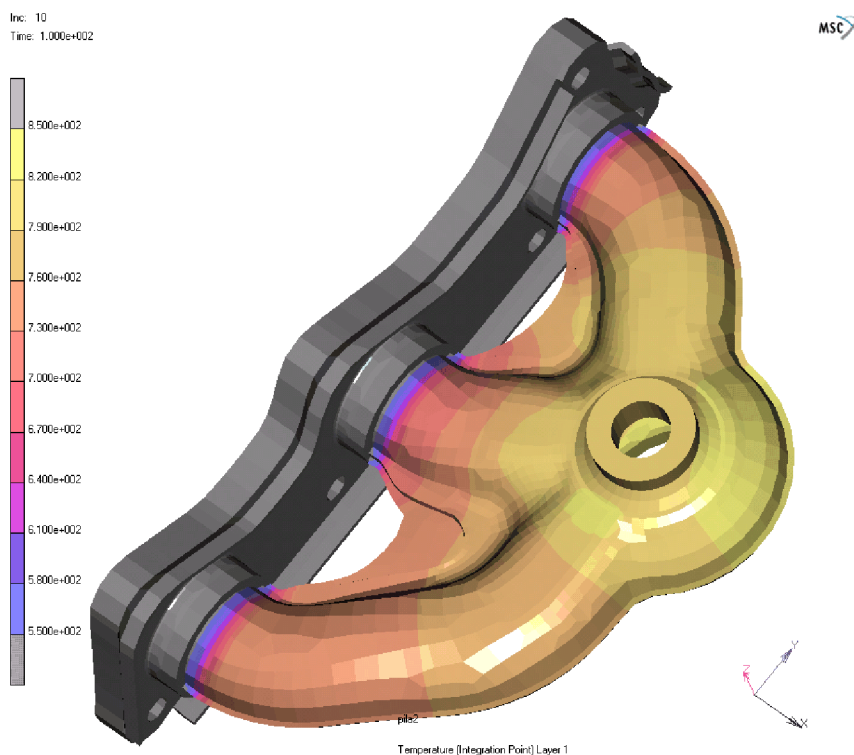
8.2. Okrajové podmínky modelu

Okrajové podmínky lze v zásadě rozdělit na mechanické a teplotní.

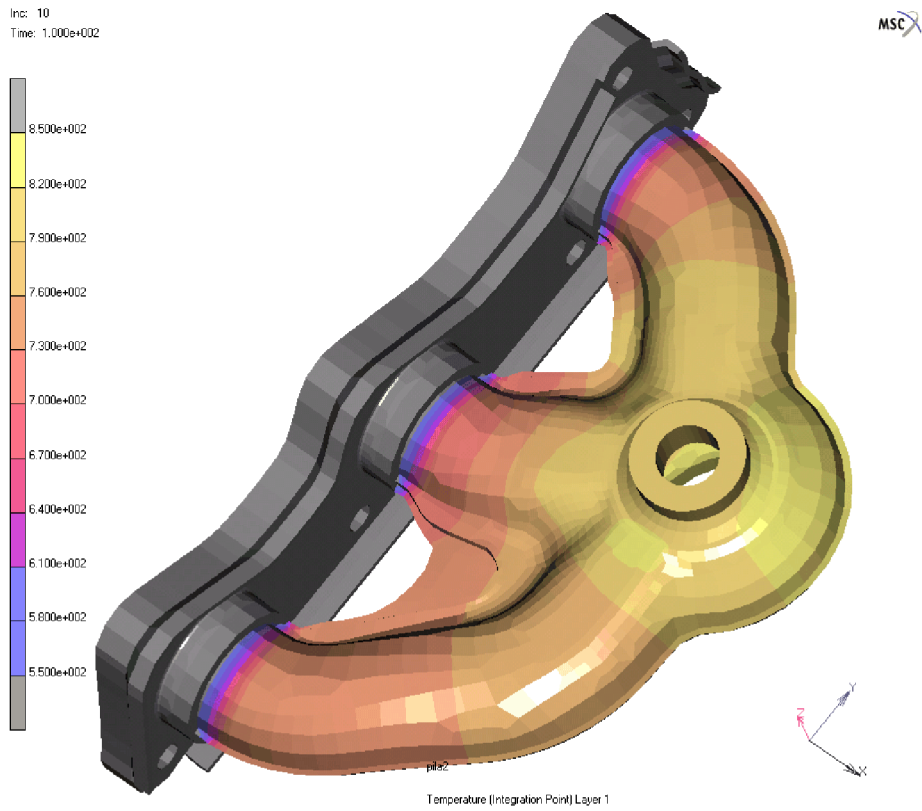
Mechanické uložení tělesa sběrného výfukového potrubí spočívalo v jeho spojení s 10mm silnou hliníkovou deskou, která nahrazovala hlavu motoru. Spojení bylo realizováno pouze v místech šroubů a tato deska sama byla uložena staticky určitě.

Stanovení teplotního pole vychází z experimentálně naměřených hodnot teploty v jistém počtu bodů sběrného výfukového potrubí. Celkové rozložení teploty bylo určeno výpočtem ustáleného tepelného pole ze zadaných teplot v oblastech snímačů za předpokladu nulového odvodu tepla do okolí. Po tloušťce stěny se teplota předpokládá konstantní (měření o tomto jevu neposkytuje žádnou informaci). Takto získané rozložení teploty je pro posuzované varianty zobrazeno na Obr. 8.1 – Obr. 8.7. Hodnoty teplot a jejich zavedení do výpočtu celkového rozložení teplot je patrné na Obr. 8.8. Tyto naměřené teploty jsou pracovní nazývány Ehra II.

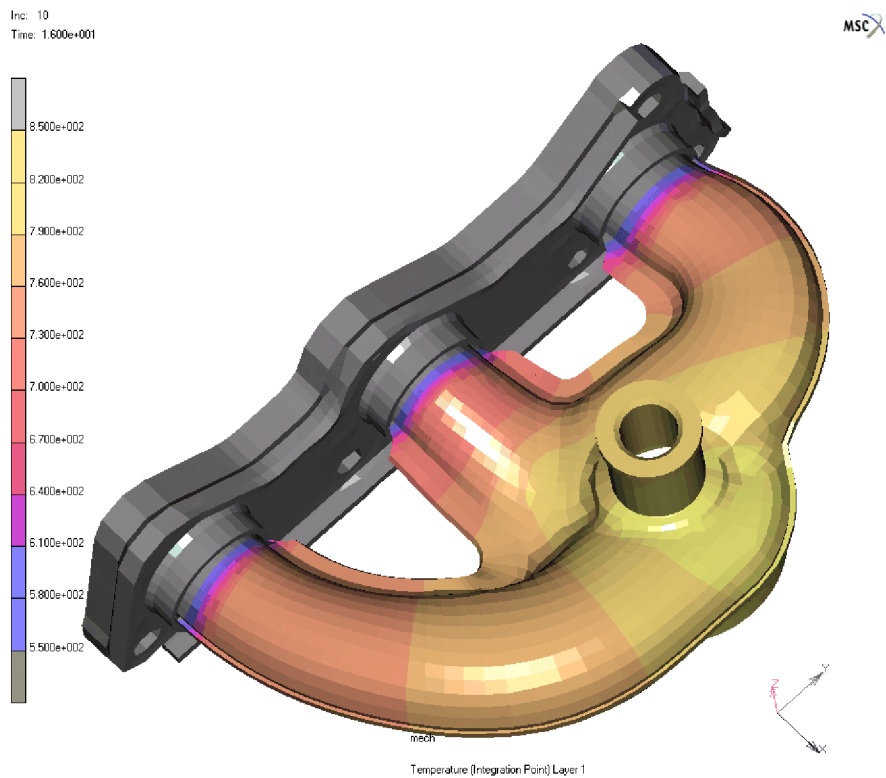
Teplotní cyklus vycházel z teploty v celém tělese 20°C pro první ohřev, resp. 200°C pro každé další ochlazení a následné ohřátí. Mezi touto teplotou a maximální teplotou určenou výše popsaným výpočtem se teplota měnila lineárně v závislosti na čase.



Obr. 8.1 – Rozložení teplot VAR.1



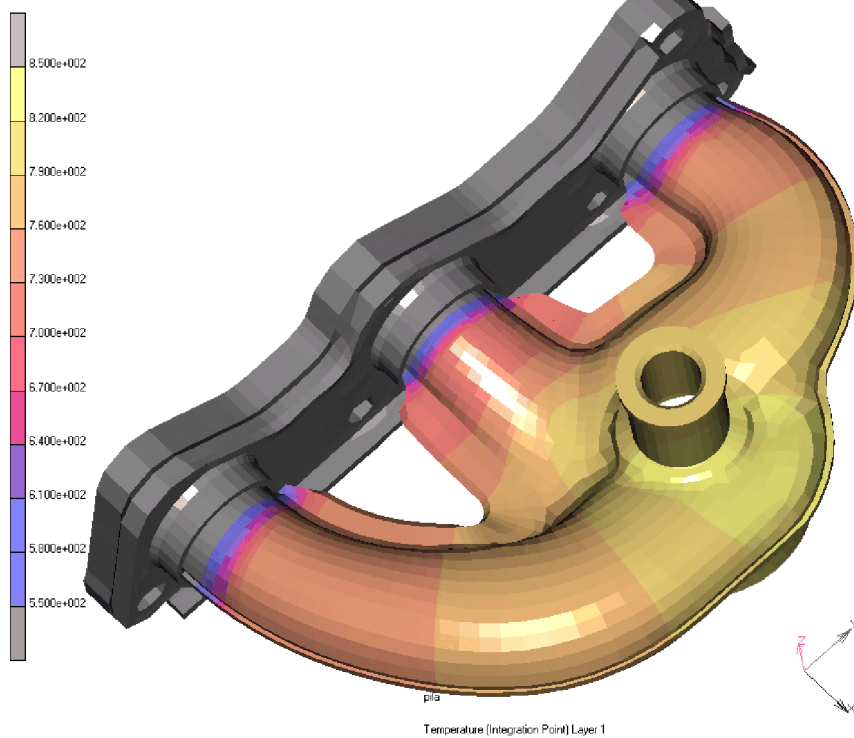
Obr. 8.2 – Rozložení teplot VAR.2



Obr. 8.3 – Rozložení teplot VAR.3

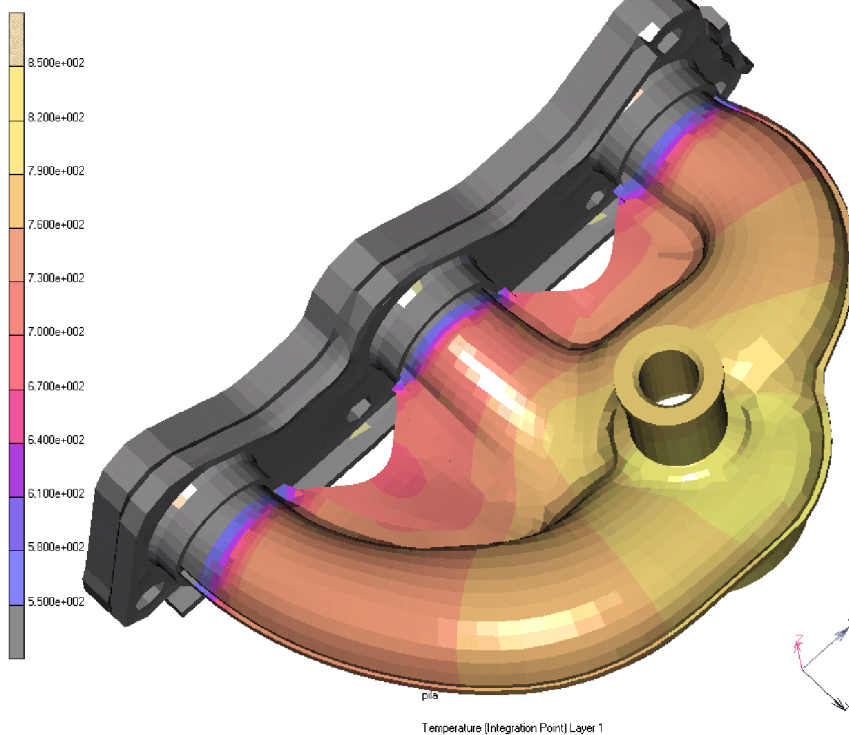


Inc: 10
Time: 1.000e+002



Obr. 8.4 – Rozložení teplot VAR.4

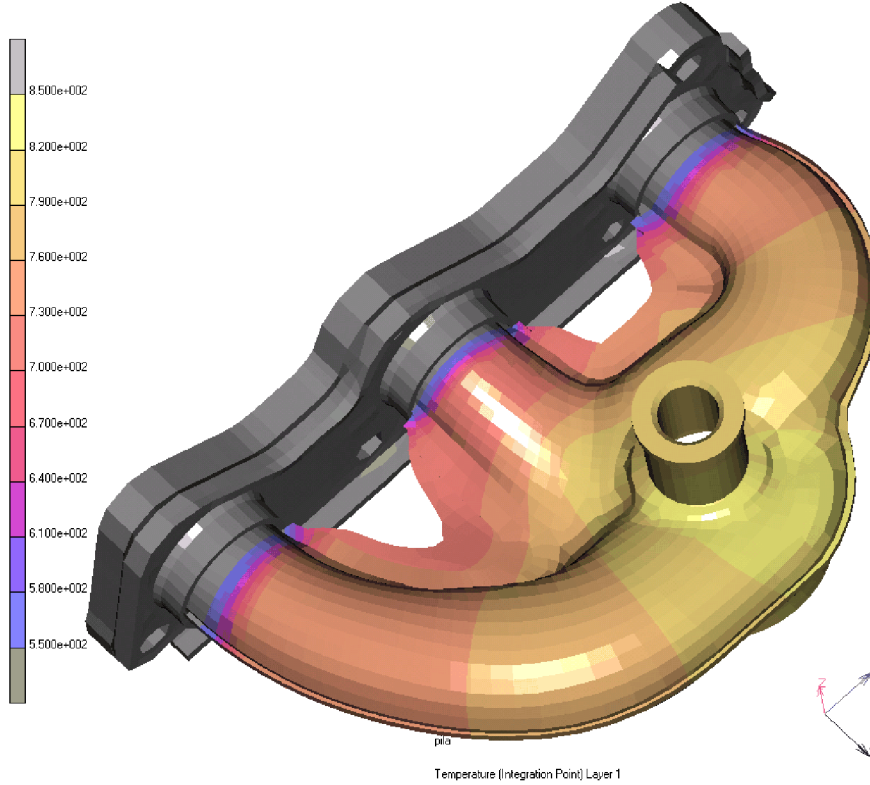
Inc: 10
Time: 1.000e+002



Obr. 8.5 – Rozložení teplot VAR.5

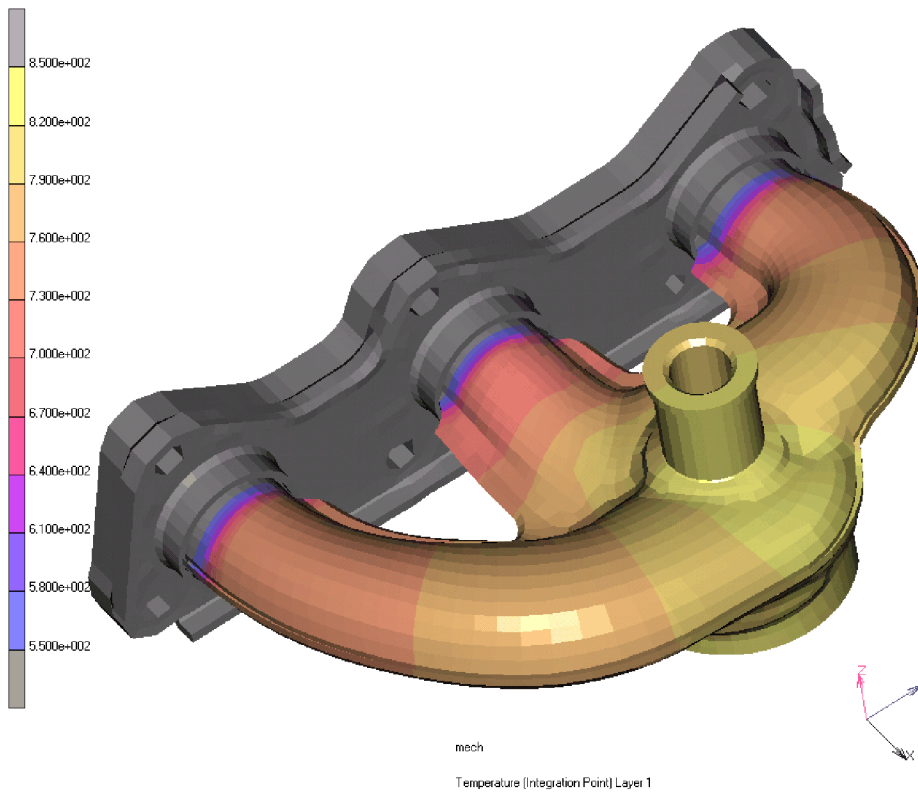


Inc: 10
Time: 1.000e+002

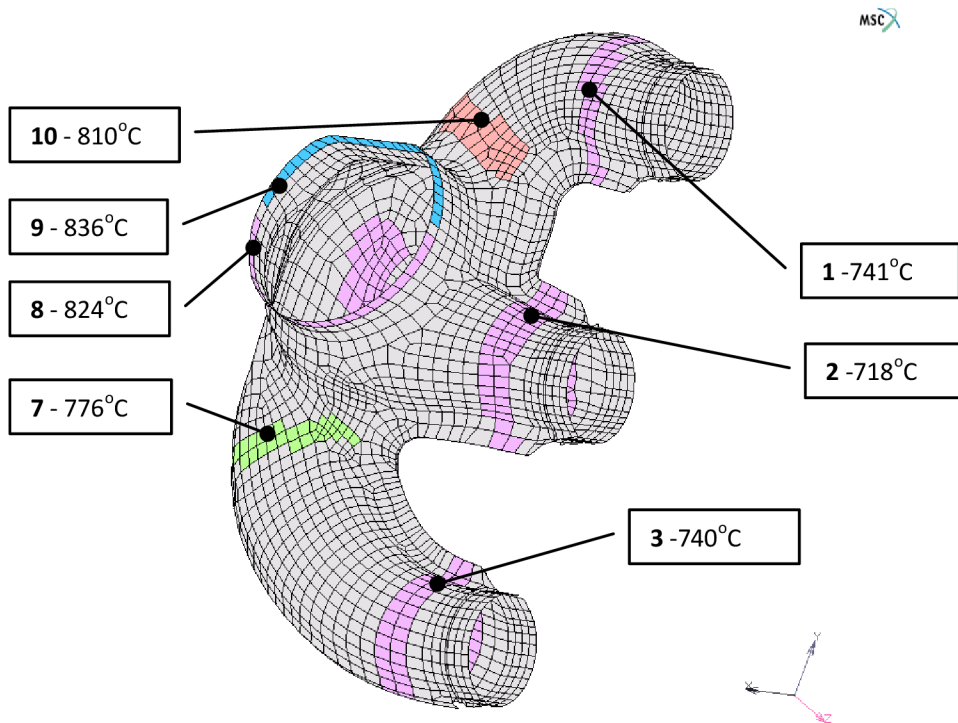
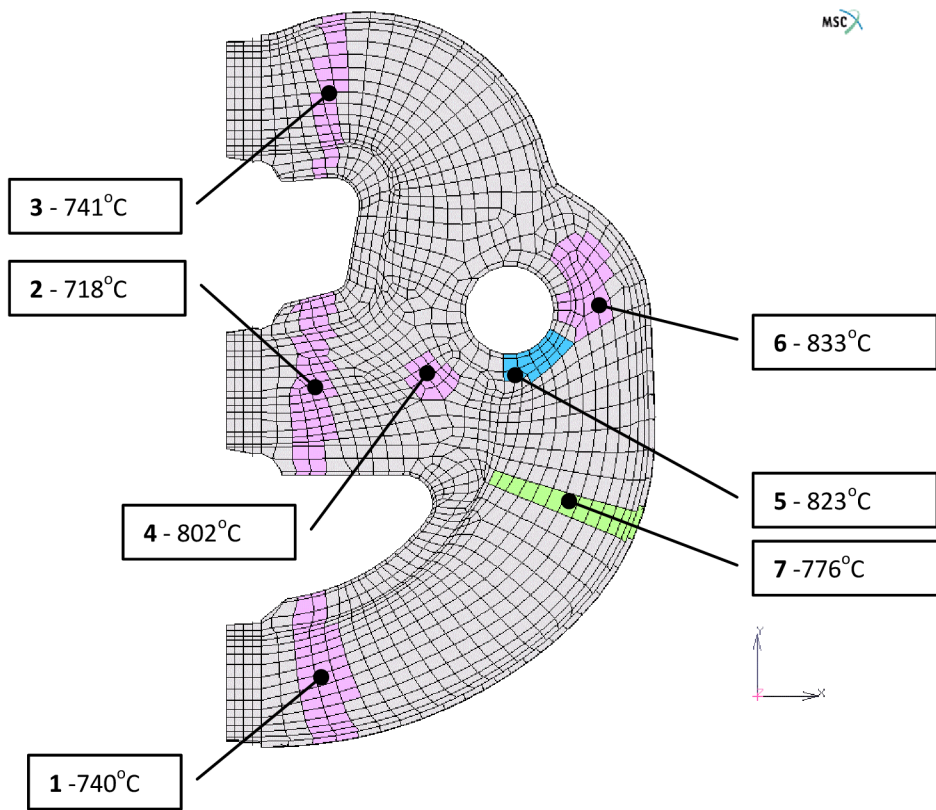


Obr. 8.6 – Rozložení teplot VAR.6

Inc: 50
Time: 6.133e+001



Obr. 8.7 – Rozložení teplot VAR.7



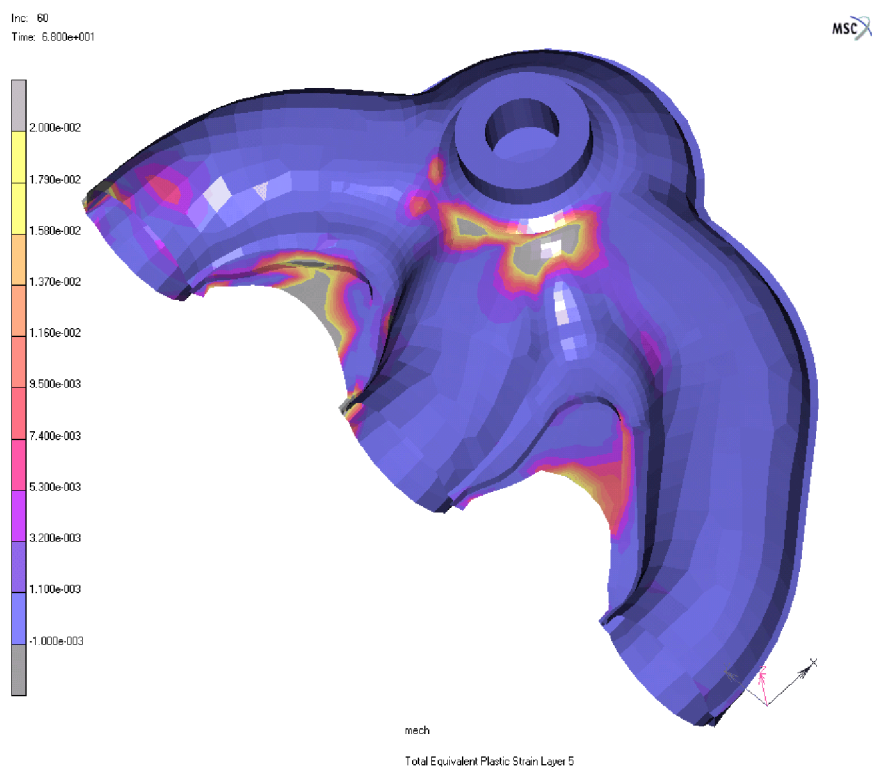
Obr. 8.8 – Hodnoty maximálních naměřených teplot Ehra II a jejich zavedení do výpočtu



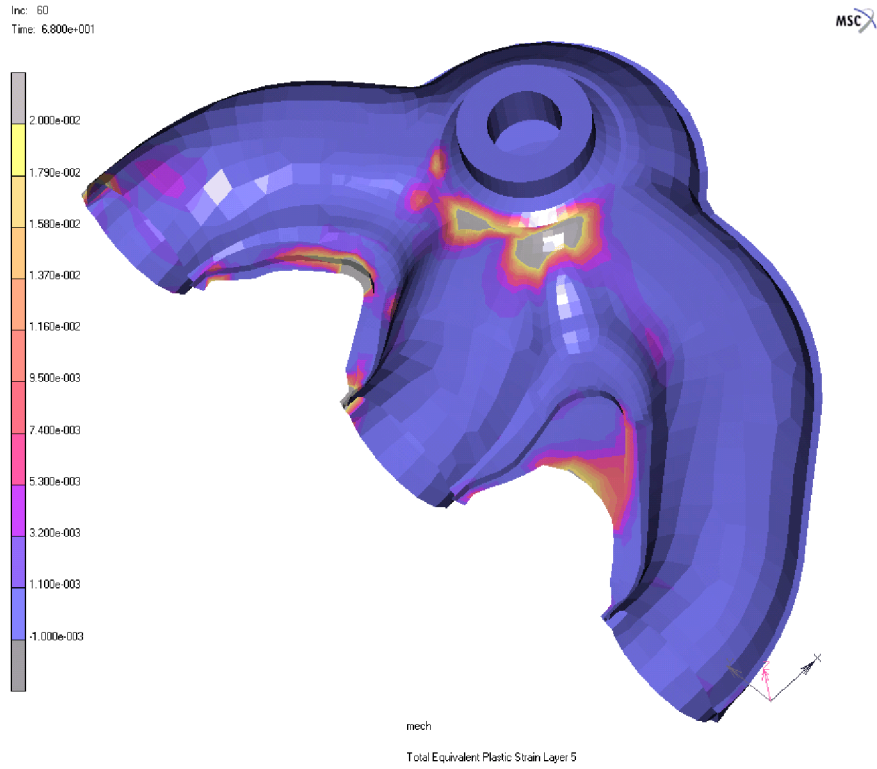
9. VÝSLEDKY

Pro stanovení míry namáhání materiálu je použita veličina přírůstku plastické deformace při teplotním půlcyklu. Tím je míněna změna teploty z minima na maximum - ohřev, nebo opačně z maxima na minimum - ochlazení. Z tohoto hlediska lze usuzovat na životnost výfukového potrubí.

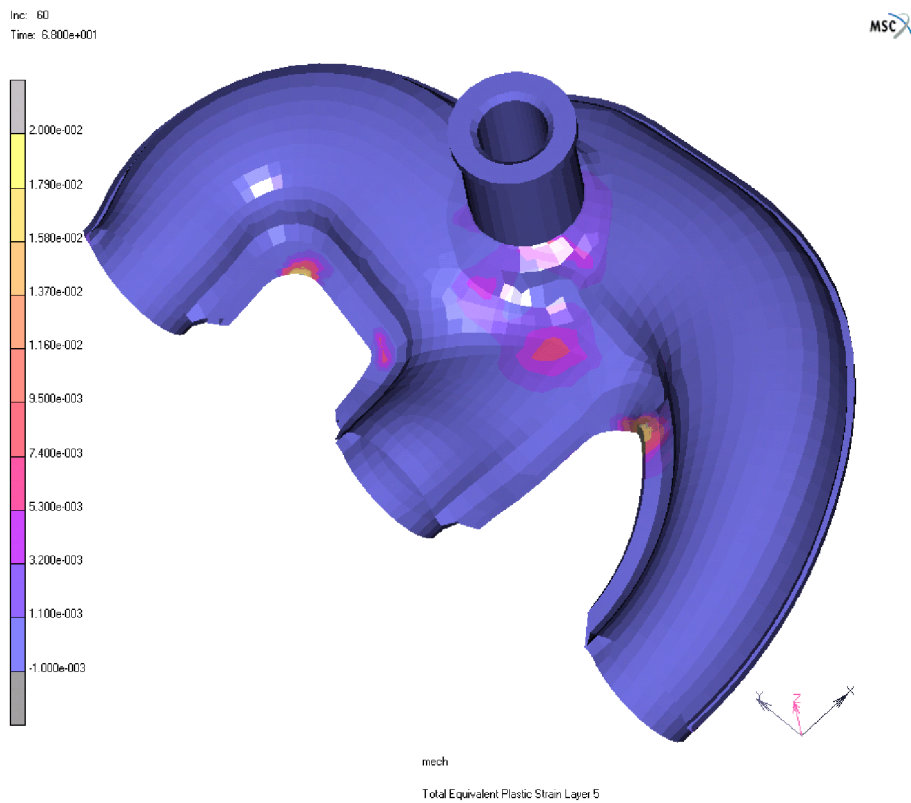
Ve výpočtu byly simulovány první tři teplotní cykly, tj. šest půlcyklů. Byly vykreslovány obrázky, na nichž je pomocí barevné stupnice zobrazen přírůstek plastické deformace. Kritická místa jsou ta, kde jsou přírůstky největší. Takto zpracované výsledky pro jednotlivé varianty jsou na Obr. 9.1 – Obr. 9.7. Sledována je situace na vnitřním povrchu plechu.



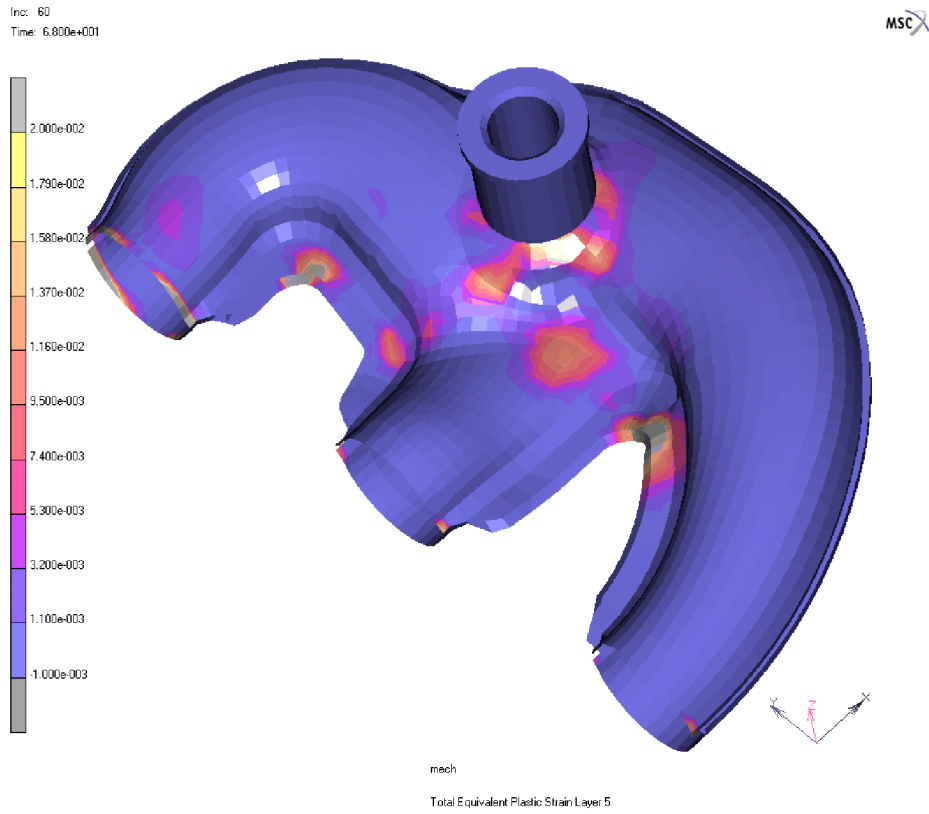
Obr. 9.1 – Přírůstky plastických deformací VAR.1



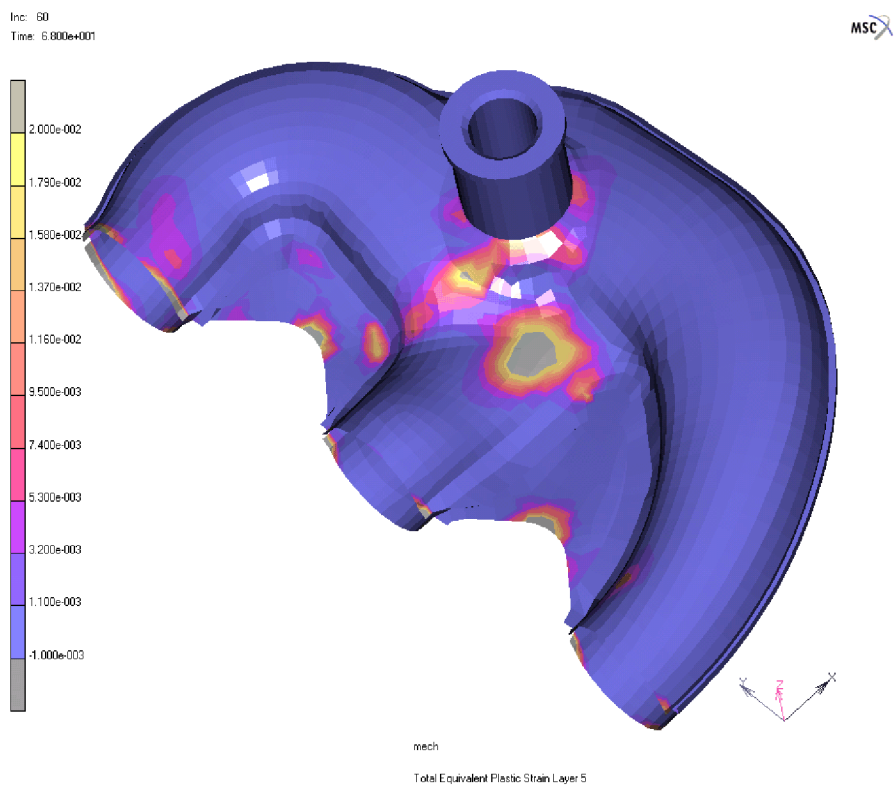
Obr. 9.2 – Přírůstky plastických deformací VAR.2



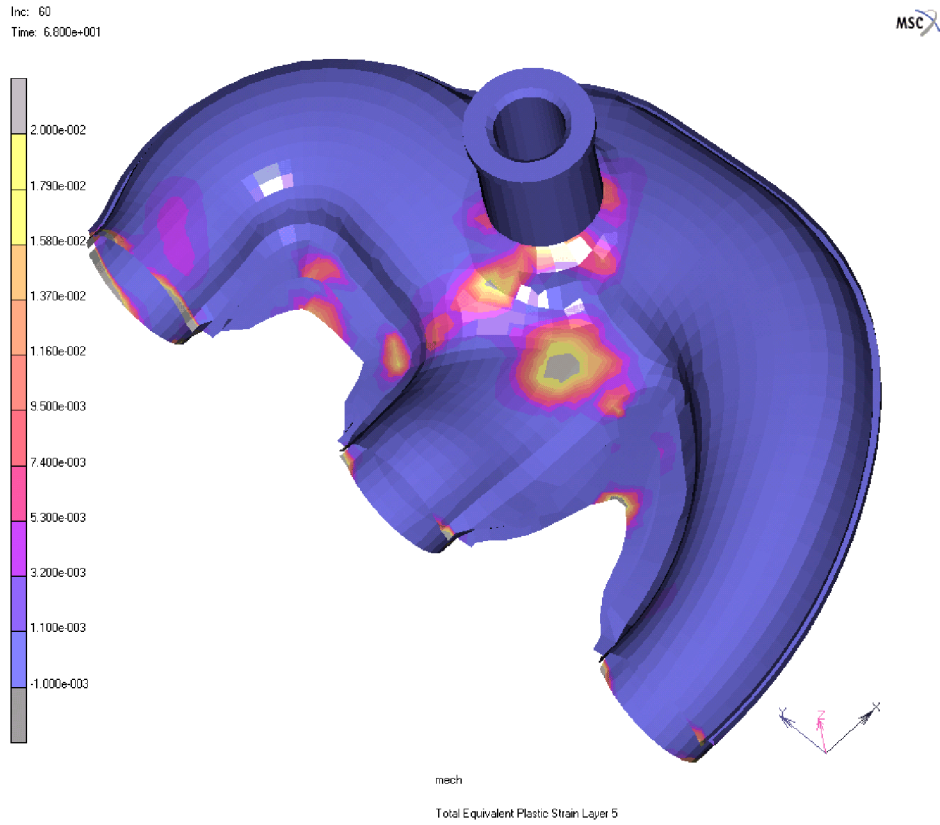
Obr. 9.3 – Přírůstky plastických deformací VAR.3



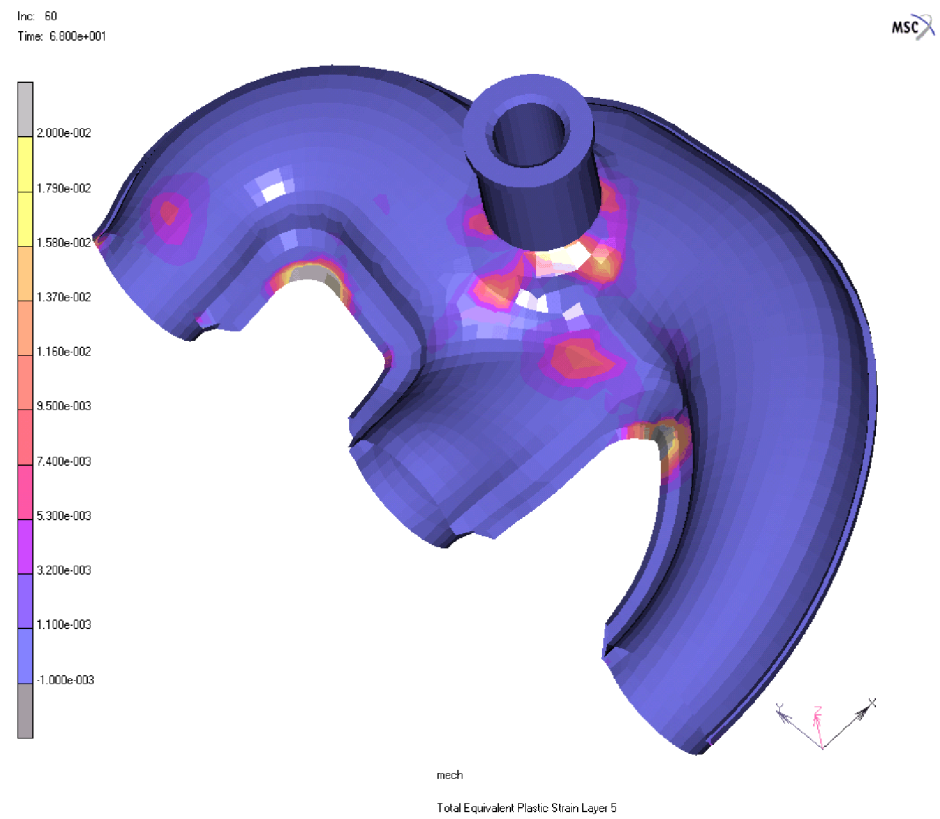
Obr. 9.4 – Přírůstky plastických deformací VAR.4



Obr. 9.5 – Přírůstky plastických deformací VAR.5



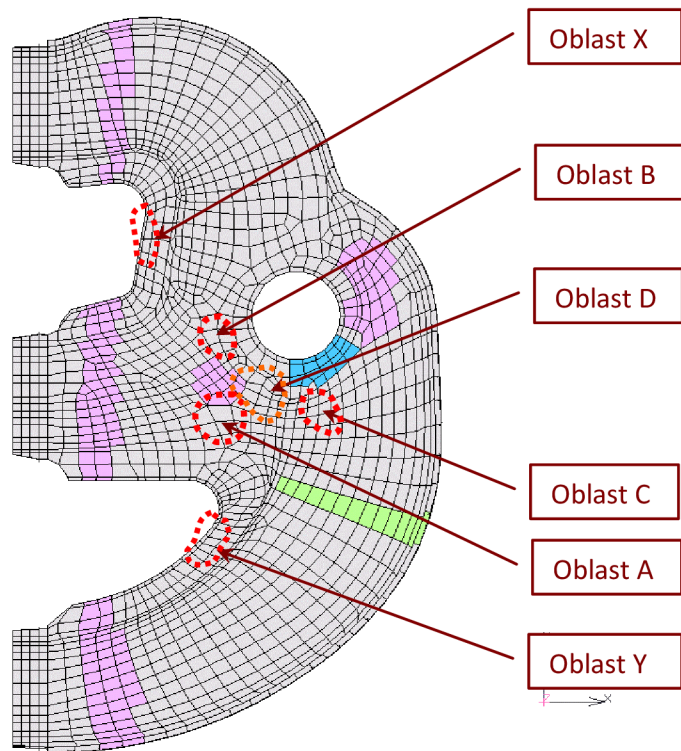
Obr. 9.6 – Přírůstky plastických deformací VAR.6



Obr. 9.7 – Přírůstky plastických deformací VAR.7



Na základě takto zpracovaných výsledků jsou určena kritická místa. Jejich označení, které je dále využíváno při popisu a dalším zpracování výsledků, názorně ukazuje Obr. 9.8.



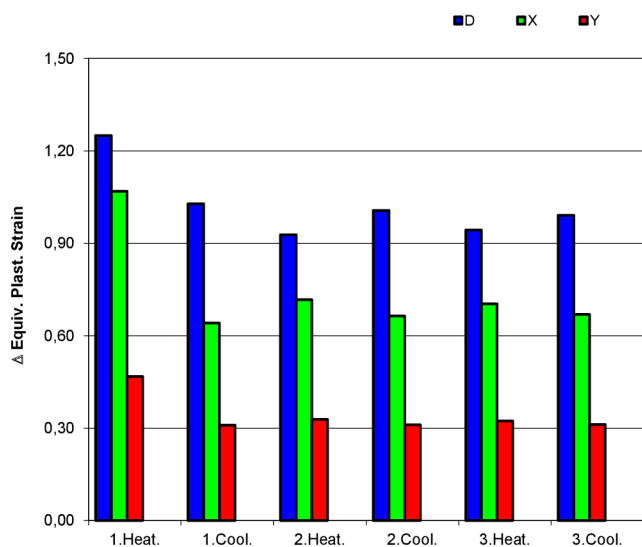
Obr. 9.8 – Označení kritických oblastí, kde jsou odečítány přírůstky plastických deformací

Přírůstky plastických deformací v kritických místech při jednotlivých půlcyklech jsou pro všechny porovnávané varianty uvedeny v Graf 9.1 – Graf 9.7. Každá barva odpovídá určitému kritickému místu. Označení míst a jim příslušejících barev je vyznačeno v horní pravé části diagramů. Stupnice je na všech diagramech stejná, což umožňuje snadnou orientaci.

Z diagramů je patrné, že první cyklus se od následujících liší. Je to dáno jednak tím, že první cyklus je mírně odlišný (ohřev ze 20° C), a zejména pak tím, že je ohříván výrobek z panenského materiálu. V dalších cyklech už podstatné odlišnosti v přírůstku plastických deformací v kritických místech nejsou.

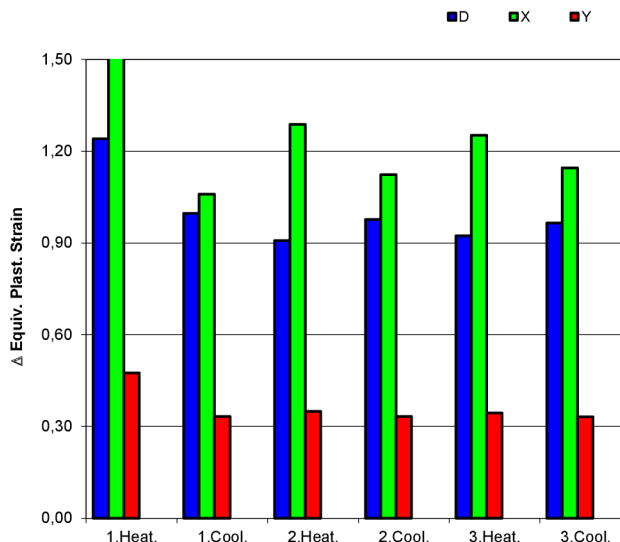


VAR.1



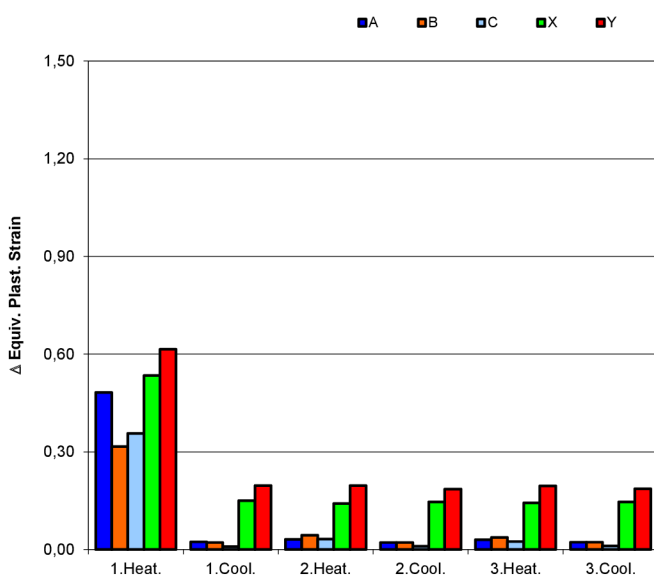
Graf 9.1 – Přírůstky plastické deformace po ohřevu a resp. ochlazení VAR.1

VAR.2



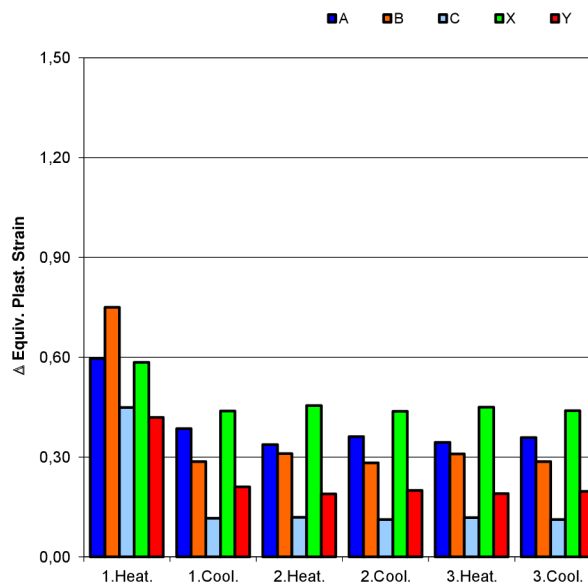
Graf 9.2 – Přírůstky plastické deformace po ohřevu a resp. ochlazení VAR.2

VAR.3



Graf 9.3 – Přírůstky plastické deformace po ohřevu a resp. ochlazení VAR.3

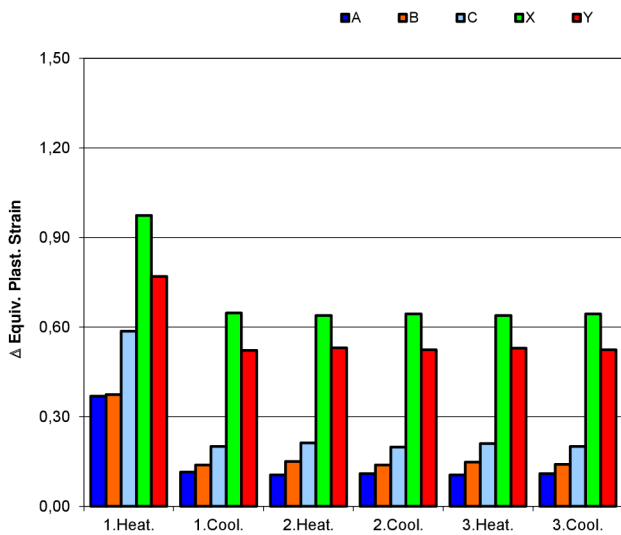
VAR.4



Graf 9.4 – Přírůstky plastické deformace po ohřevu a resp. ochlazení VAR.4

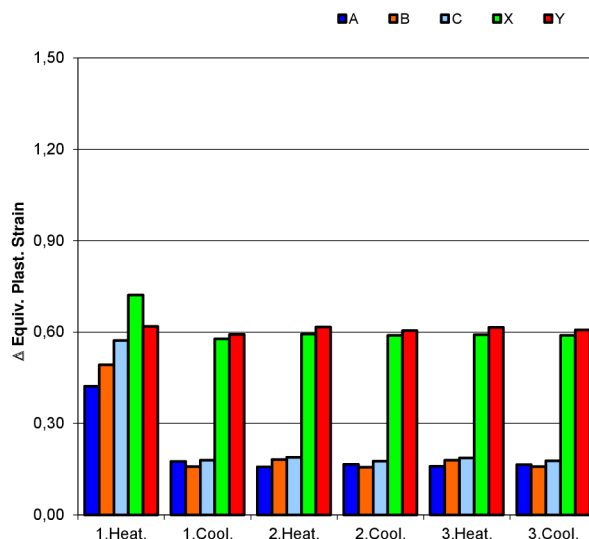


VAR.5



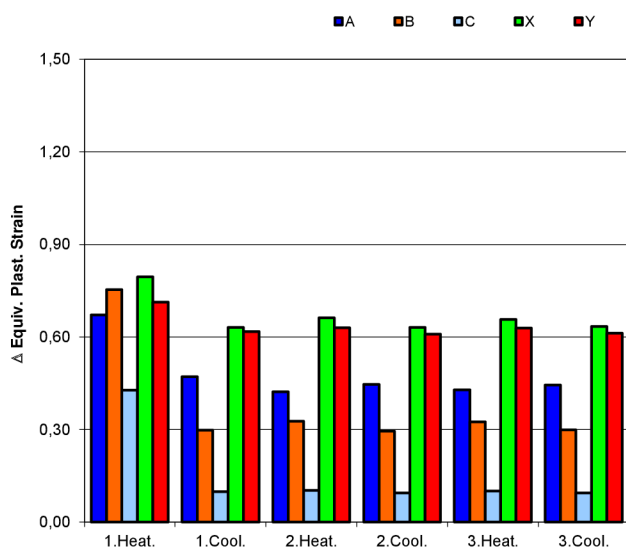
Graf 9.5 – Přírůstky plastické deformace po ohřevu a resp. ochlazení VAR.5

VAR.6



Graf 9.6 – Přírůstky plastické deformace po ohřevu a resp. ochlazení VAR.6

VAR.7



Graf 9.7 – Přírůstky plastické deformace po ohřevu a resp. ochlazení VAR.7



Stejné informace, avšak v přesnější číselné podobě, jsou uvedeny v Tab. 9.1 – Tab. 9.7. Označení kritických míst je rovněž ve shodě s označením zavedeným na obr. 2. Protože na sériových variantách VAR.1 a VAR.2 bylo u 1. kanálu jen jedno kritické místo, zatímco u variant s optimalizovaným prouděním se toto kritické místo rozpadlo na tři, mají tabulky těchto variant odlišný počet sloupců (sloupec D oproti sloupcům A, B, C).

Jak je z výsledků patrné, nejlepších hodnot dosahuje varianta VAR.3. Největší hodnoty přírůstků plastické deformace jsou v místě Y. V posledním tepelném cyklu nepřekračuje hodnotu 0,2 %.

Varianta VAR.4, která vychází z varianty VAR.3 a je upravena z technologického hlediska, má přírůstky plastické deformace podstatně vyšší. Největších hodnot dosahují opět v místě Y, a to v posledním teplotním cyklu 0,62 %.

VAR.1				
Δ ekv.plast.def (x100)				
	D		X	Y
1. Ohřev	1.25		1.07	0.47
1. Chlaz	1.03		0.64	0.31
2. Ohřev	0.93		0.72	0.33
2. Chlaz	1.01		0.66	0.31
3. Ohřev	0.94		0.70	0.32
3. Chlaz	0.99		0.67	0.31

Tab. 9.1 - Přírůstky plastické deformace pro VAR.1

VAR.2				
Δ ekv.plast.def (x100)				
	D		X	Y
1. Ohřev	1.24		1.76	0.47
1. Chlaz	1.00		1.06	0.33
2. Ohřev	0.91		1.29	0.35
2. Chlaz	0.98		1.12	0.33
3. Ohřev	0.92		1.25	0.34
3. Chlaz	0.97		1.15	0.33

Tab. 9.2 - Přírůstky plastické deformace pro VAR.2



VAR.3					
Δ ekv.plast.def (x100)					
	A	B	C	X	Y
1. Ohřev	0.48	0.32	0.36	0.53	0.61
1. Chlaz	0.02	0.02	0.01	0.15	0.20
2. Ohřev	0.03	0.04	0.03	0.14	0.20
2. Chlaz	0.02	0.02	0.01	0.15	0.19
3. Ohřev	0.03	0.04	0.02	0.14	0.20
3. Chlaz	0.02	0.02	0.01	0.15	0.19

Tab. 9.3 - Přírůstky plastické deformace pro VAR.3

VAR.4					
Δ ekv.plast.def (x100)					
	A	B	C	X	Y
1. Ohřev	0.42	0.49	0.57	0.72	0.62
1. Chlaz	0.18	0.16	0.18	0.58	0.59
2. Ohřev	0.16	0.18	0.19	0.59	0.62
2. Chlaz	0.17	0.16	0.18	0.59	0.60
3. Ohřev	0.16	0.18	0.19	0.59	0.62
3. Chlaz	0.16	0.16	0.18	0.59	0.61

Tab. 9.4 - Přírůstky plastické deformace pro VAR.4

VAR.5					
Δ ekv.plast.def (x100)					
	A	B	C	X	Y
1. Ohřev	0.67	0.75	0.43	0.79	0.71
1. Chlaz	0.47	0.30	0.10	0.63	0.62
2. Ohřev	0.42	0.33	0.10	0.66	0.63
2. Chlaz	0.45	0.29	0.09	0.63	0.61
3. Ohřev	0.43	0.33	0.10	0.66	0.63
3. Chlaz	0.44	0.30	0.10	0.63	0.61

Tab. 9.5 - Přírůstky plastické deformace pro VAR.5



VAR.6					
Δ ekv.plast.def (x100)					
	A	B	C	X	Y
1. Ohřev	0.60	0.75	0.45	0.58	0.42
1. Chlaz	0.39	0.29	0.12	0.44	0.21
2. Ohřev	0.34	0.31	0.12	0.46	0.19
2. Chlaz	0.36	0.28	0.11	0.44	0.20
3. Ohřev	0.34	0.31	0.12	0.45	0.19
3. Chlaz	0.36	0.29	0.11	0.44	0.20

Tab. 9.6 - Přírůstky plastické deformace pro VAR.6

VAR.7					
Δ ekv.plast.def (x100)					
	A	B	C	X	Y
1. Ohřev	0.37	0.37	0.59	0.97	0.77
1. Chlaz	0.11	0.14	0.20	0.65	0.52
2. Ohřev	0.10	0.15	0.21	0.64	0.53
2. Chlaz	0.11	0.14	0.20	0.64	0.52
3. Ohřev	0.11	0.15	0.21	0.64	0.53
3. Chlaz	0.11	0.14	0.20	0.64	0.52

Tab. 9.7 - Přírůstky plastické deformace pro VAR.7

Varianta VAR.6, která ověřovala vliv “blan” mezi jednotlivými kanály, dosahuje mírně horších výsledků, než varianta VAR.5. Dá se tedy tvrdit, že “blány” maximální velikosti mechanickou odolnost nezlepšují.

Varianta VAR.7 ověřovala vliv “blan”. Výrobce potrubí byla vyslovena hypotéza, že se zvětšením “blan” se snižuje namáhání v okolí umístění λ -sondy. Model byl vytvořen tak, že jejich velikost oproti variantě VAR.6 je zhruba poloviční. Jejich tvar byl navržen na základě analýzy chování sběrného potrubí s maximálními “blánami”. Nejzatíženější je místo X, tj. hrana “blány” mezi 1. a 2. kanálem. V posledním teplotním cyklu je přírůstek plastické deformace v tomto místě jen 0,45 %. Analýza potvrdila, že na namáhání materiálu v oblastech A, B a C má zvětšení “blan” nepříznivý vliv. V oblastech X a Y je možné dosáhnout vhodnou geometrií snížení namáhání.



Varianta VAR.7 vznikla další technologickou úpravou varianty VAR.4, kterou navrhl výrobce potrubí. Cílem této úpravy mělo být snížení zatížení míst X a Y. V oblasti Y sice došlo k poklesu namáhání, ale v oblasti X naopak ke zhoršení. Ani tak rozdíly oproti variantě VAR.4 nejsou podstatné a nelze tedy mezi variantami VAR.4 a VAR.7 očekávat významný rozdíl.

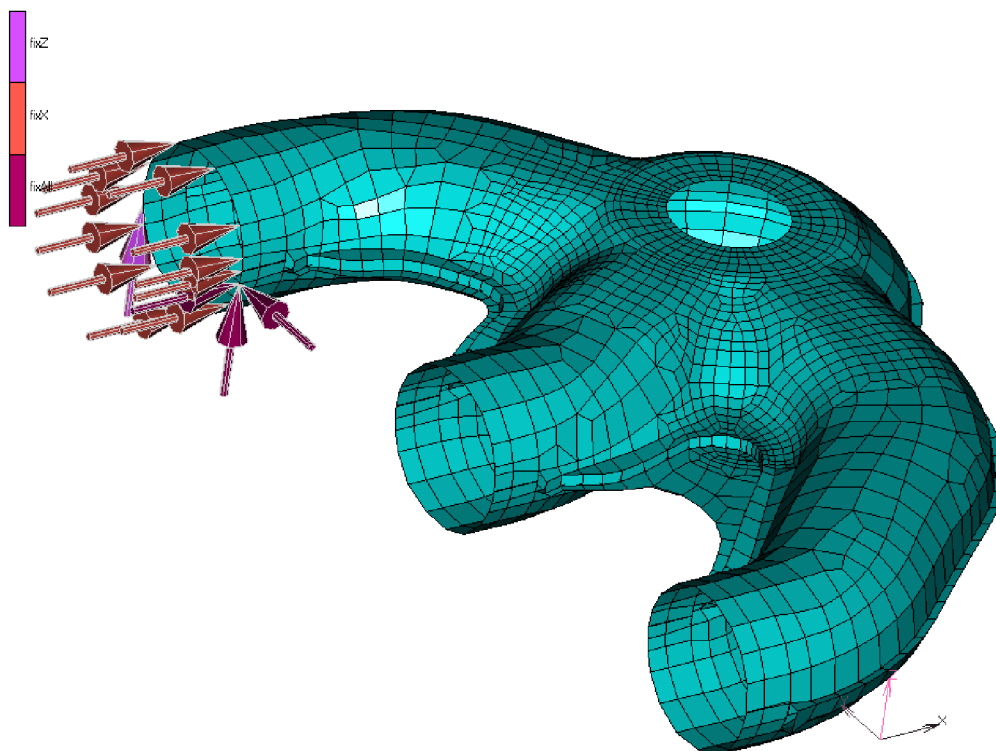
9.1. Studie chování sběrného výfukového potrubí při různých okrajových podmínkách

Analýzování stavu napjatosti a deformace potrubí při daném teplotním poli s uvažováním teplotních závislostí materiálu a různých okrajových podmínek uložení K modulu.

Parametry materiálu jsou popsány v kapitole - 5.3. Model materiálu.

9.1.1. Okrajové podmínky 1

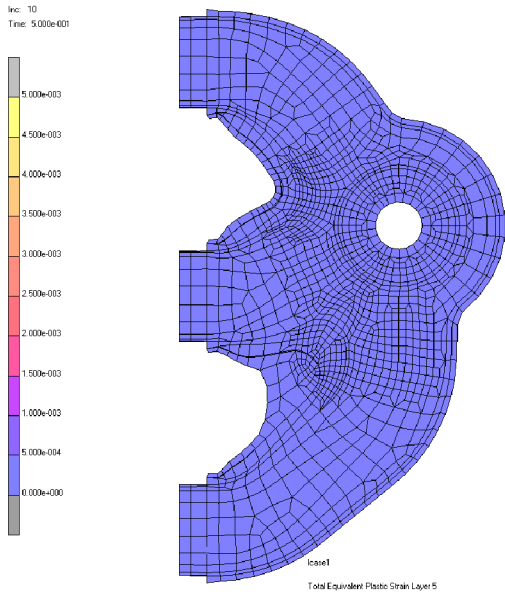
- Vytvoření pevné vazby modelu pouze na prvním kanálu sběrného výfukového potrubí



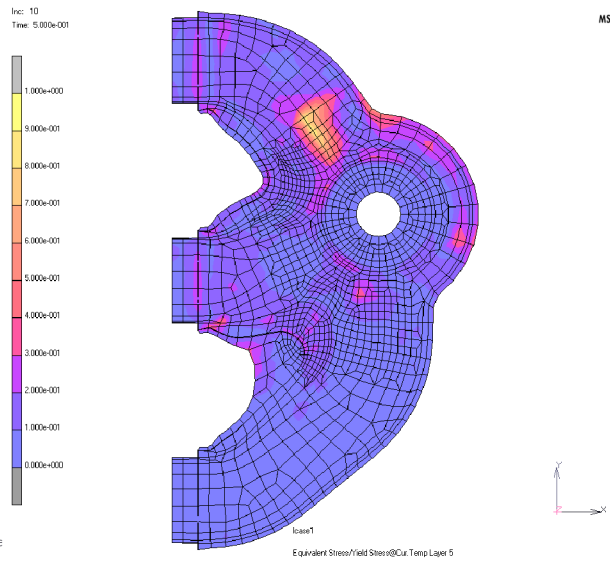
Obr. 9.9 – Zavazbení sběrného výfukového potrubí 1



Tmax=820°C; okrajové podmínky 1:

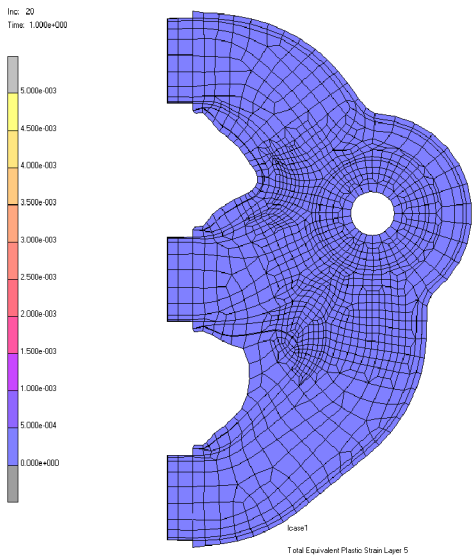


ϵ_{plast}

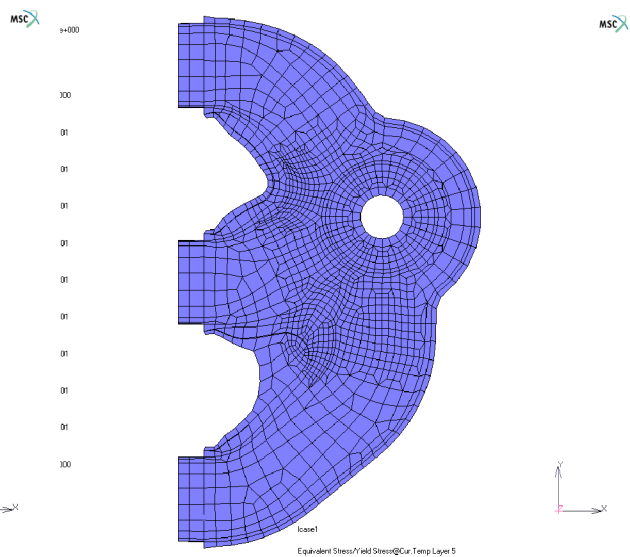


$\sigma_{\text{eq}} / R_{p0,2}(\text{temp})$

T=20°C po ochlazení; okrajové podmínky 1:



ϵ_{plast}

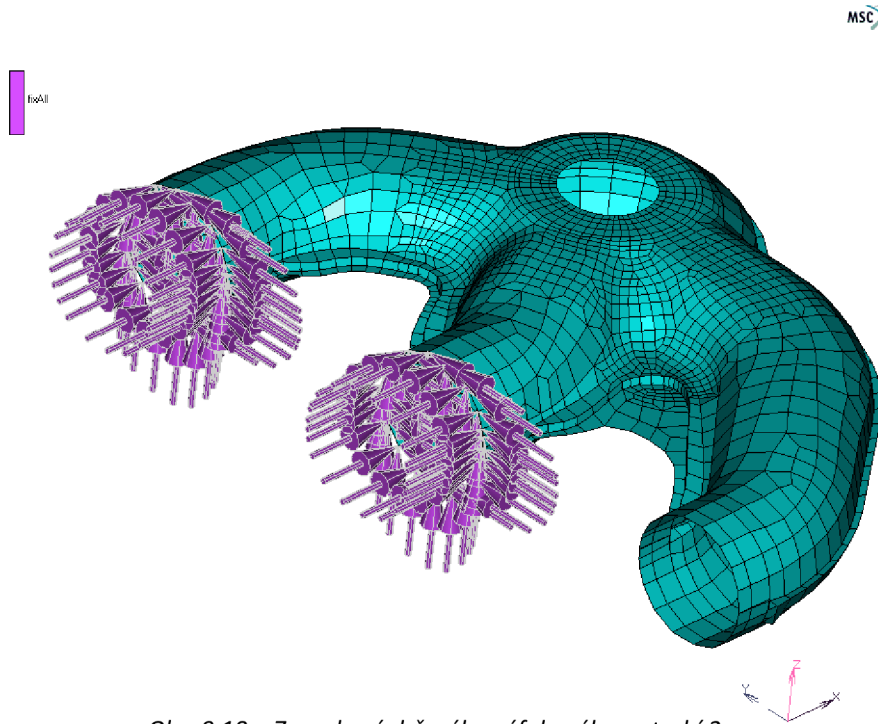


$\sigma_{\text{eq}} / R_{p0,2}(\text{temp})$



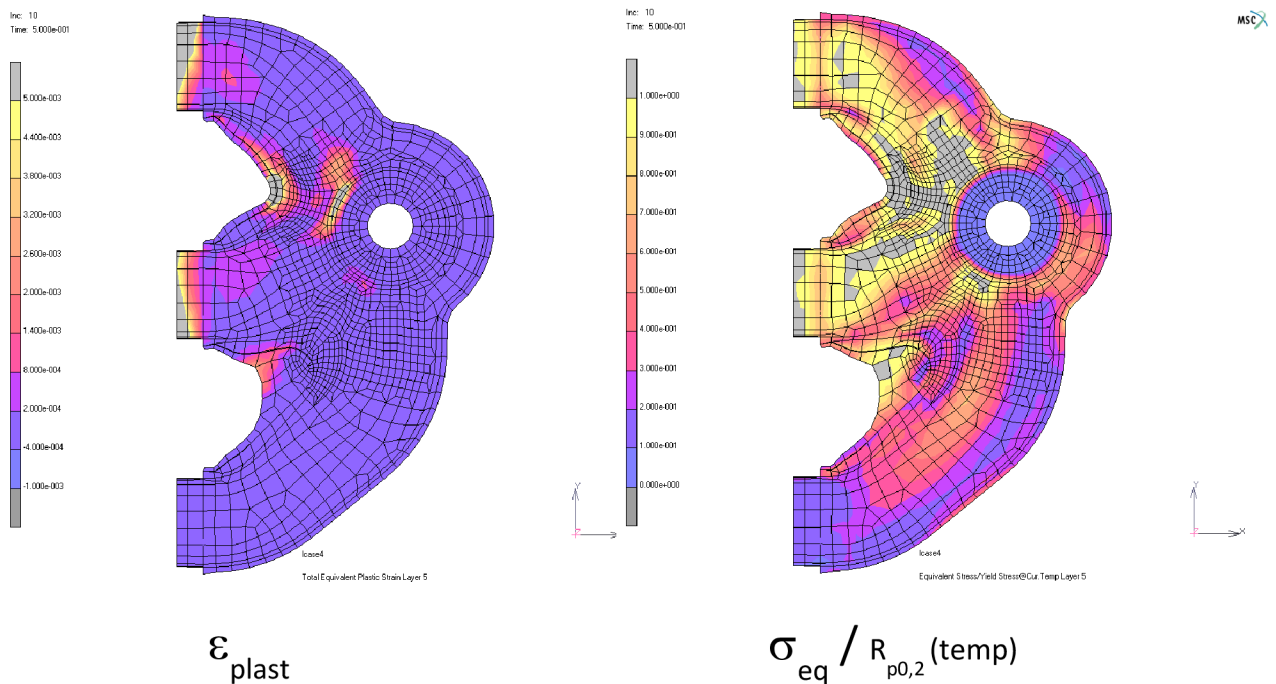
9.1.2. Okrajové podmínky 2

- Vytvoření pevné vazby modelu prvním a druhém kanálu sběrného výfukového potrubí



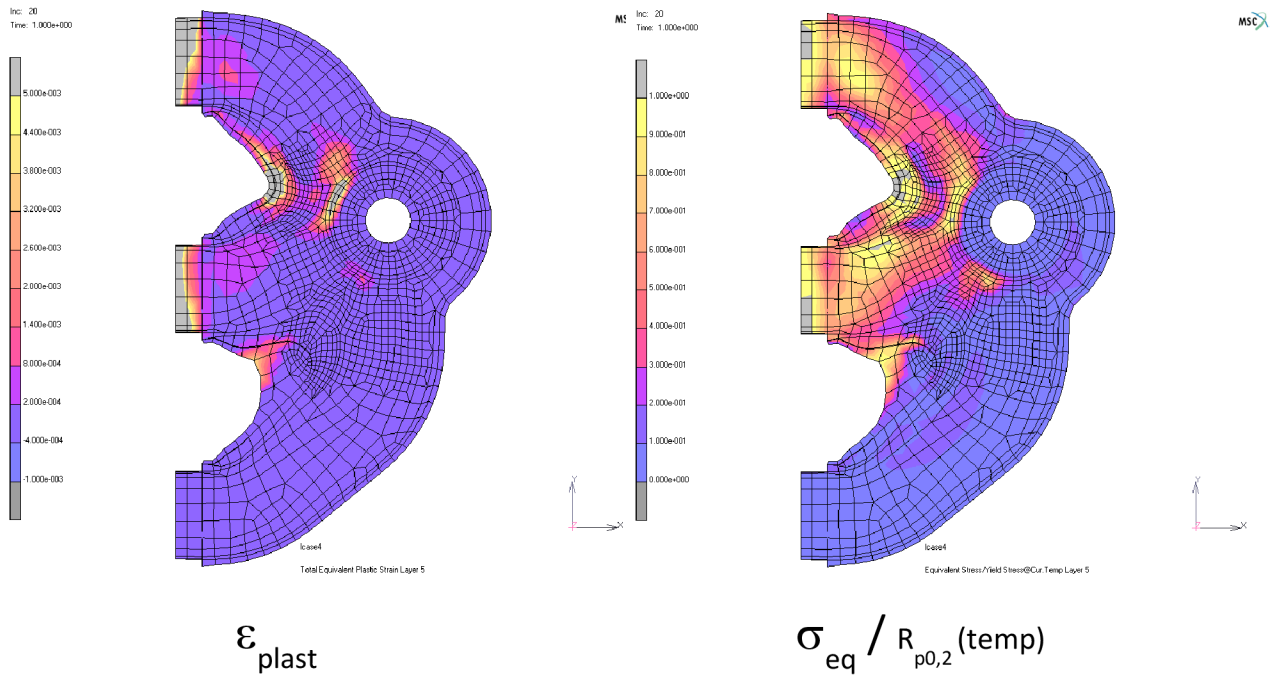
Obr. 9.10 – Zavazbení sběrného výfukového potrubí 2

T=820°C; okrajové podmínky 2:



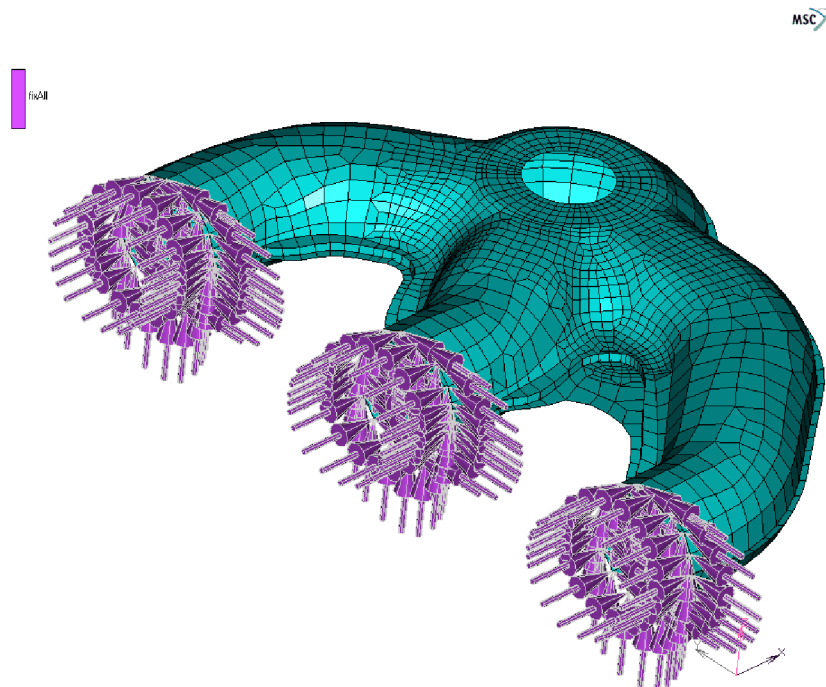


T=20°C po ochlazení; okrajové podmínky 2:



9.1.3. Okrajové podmínky 3

- Vytvoření pevné vazby modelu na všech třech kanálech sběrného výfukového potrubí

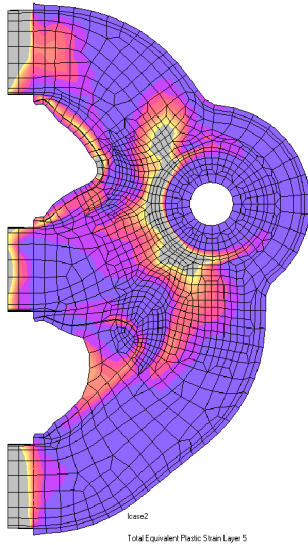


Obr. 9.11 – Zavazbení sběrného výfukového potrubí 3



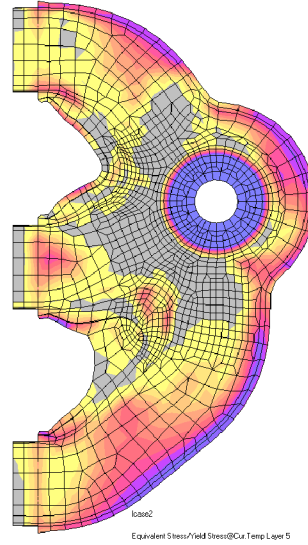
Tmax=820°C; okrajové podmínky 3

Inc: 10
Time: 5.000e-001



ϵ_{plast}

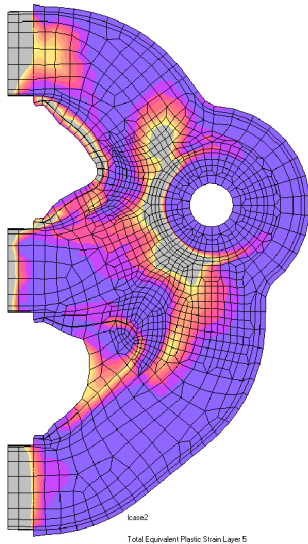
MS Inc: 10
Time: 5.000e-001



$\sigma_{\text{eq}} / R_{p0,2}(\text{temp})$

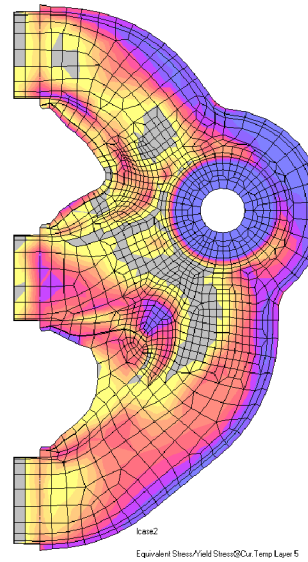
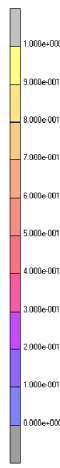
T=20°C po ochlazení; okrajové podmínky 3

Inc: 20
Time: 1.000e+000



ϵ_{plast}

MS Inc: 20
Time: 1.000e+000

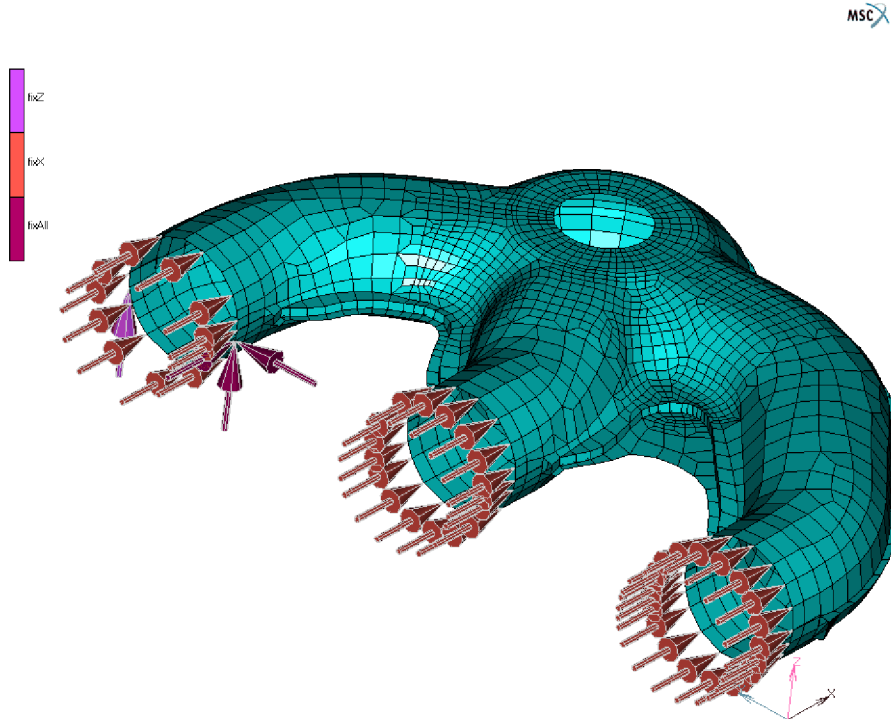


$\sigma_{\text{eq}} / R_{p0,2}(\text{temp})$



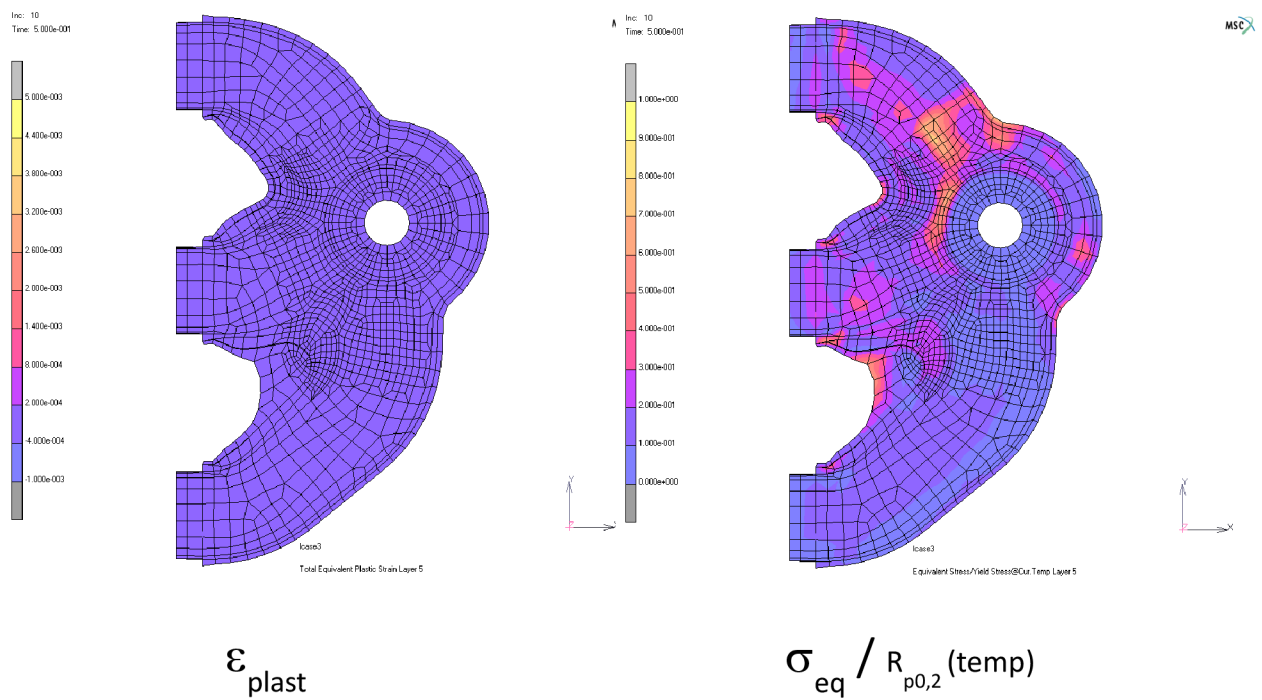
9.1.4. Okrajové podmínky 4

- Vytvoření pevné vazby na prvním kanálu a zavazbení druhého a třetího kanálu v ose X



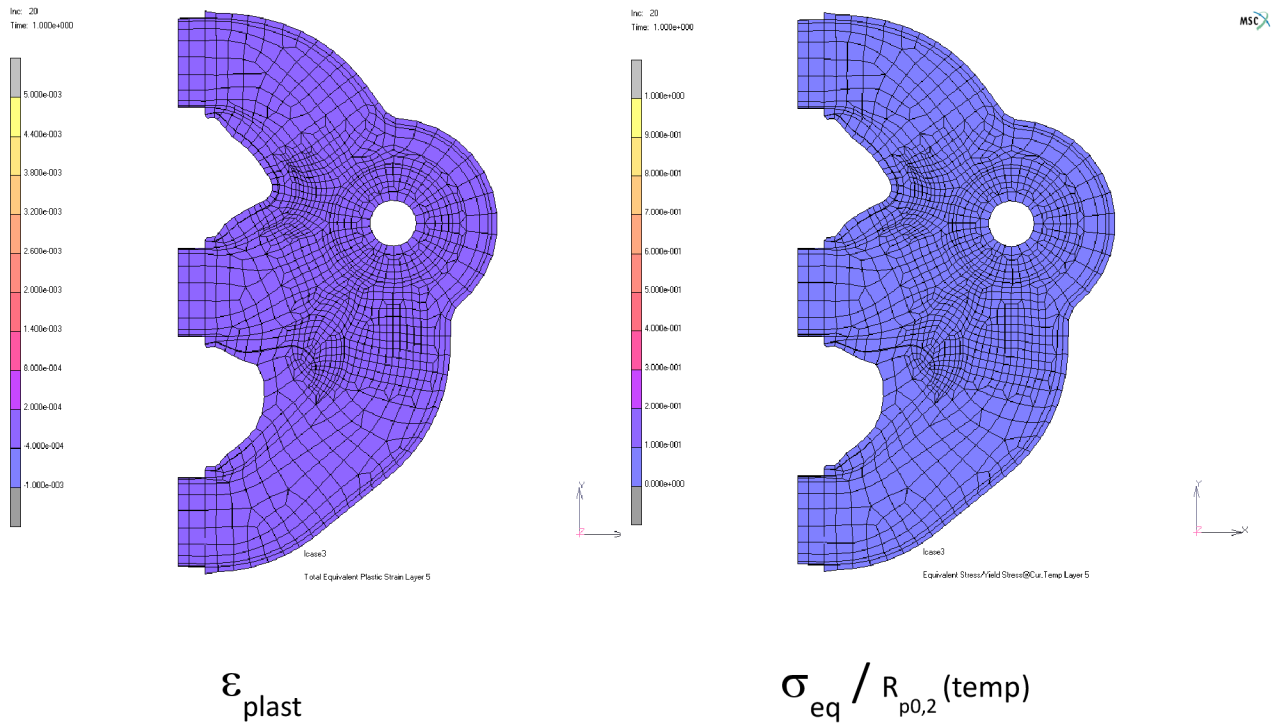
Obr. 9.12 – Zavazbení sběrného výfukového potrubí 4

Tmax=820°C; okrajové podmínky 4



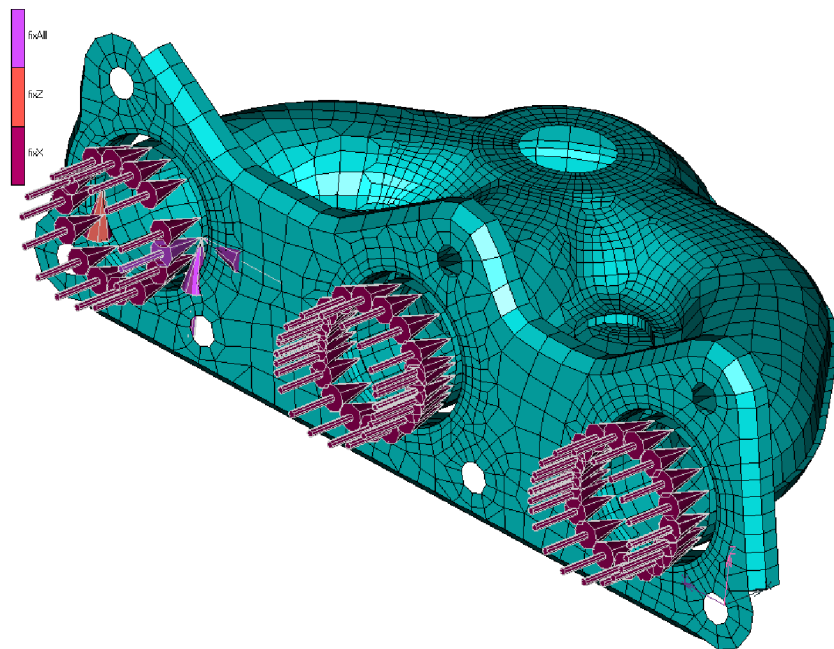


T=20°C po ochlazení; okrajové podmínky 4



9.1.5. Okrajové podmínky 5

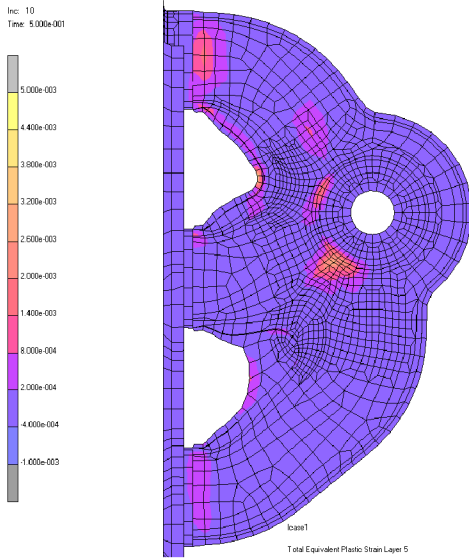
- Vytvoření pevné vazby na prvním kanálu a zavazbení druhého a třetího kanálu v ose X s použitím příruby sběrného výfukového potrubí.



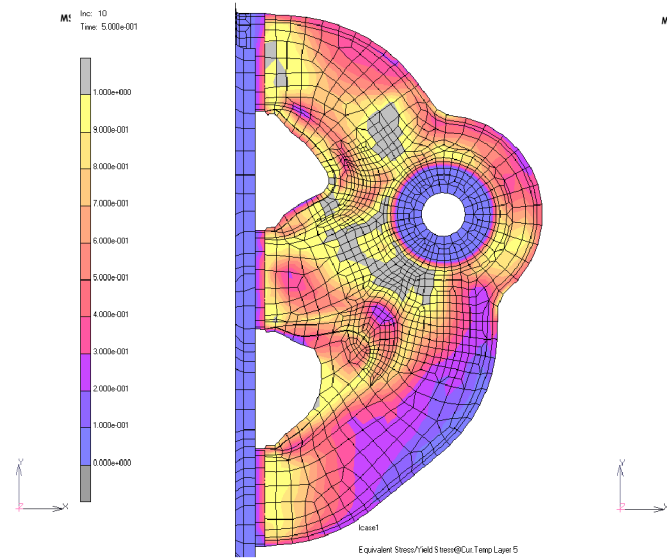
Obr. 9.13 – Zavazbení sběrného výfukového potrubí 5



Tmax=820°C; okrajové podmínky 5

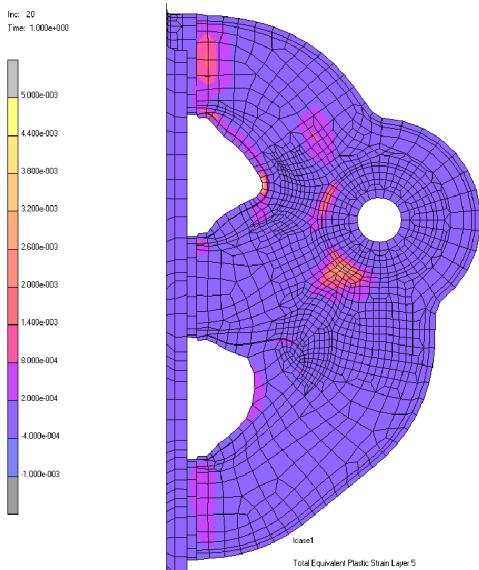


ϵ_{plast}

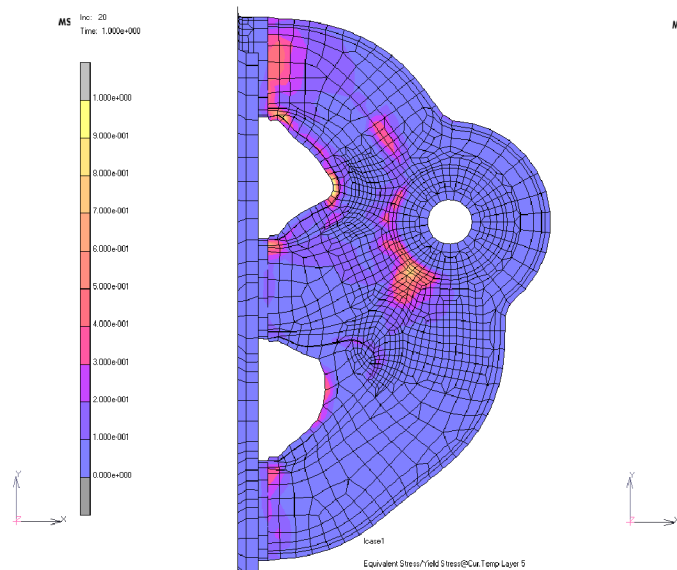


$\sigma_{\text{eq}} / R_{p0,2}(\text{temp})$

T=20°C po ochlazení; okrajové podmínky 5



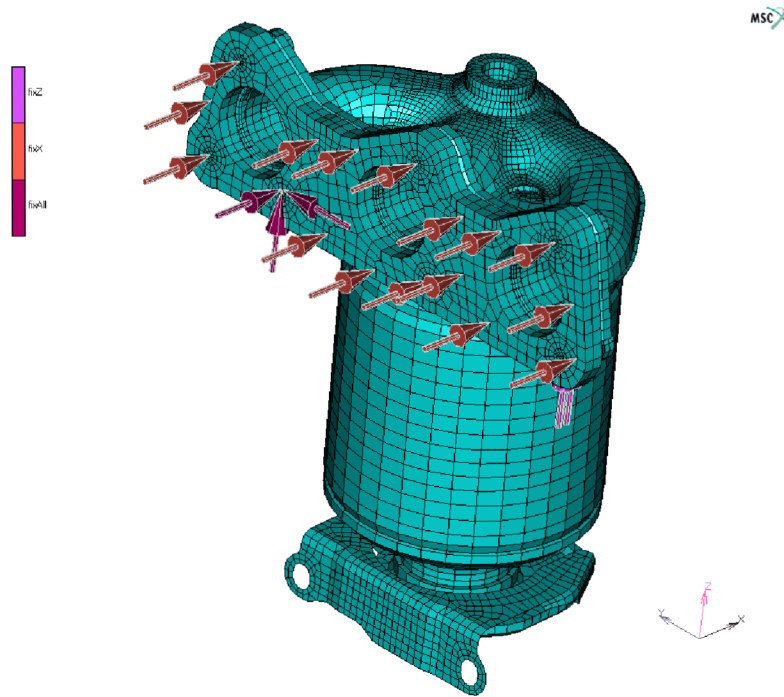
ϵ_{plast}



$\sigma_{\text{eq}} / R_{p0,2}(\text{temp})$

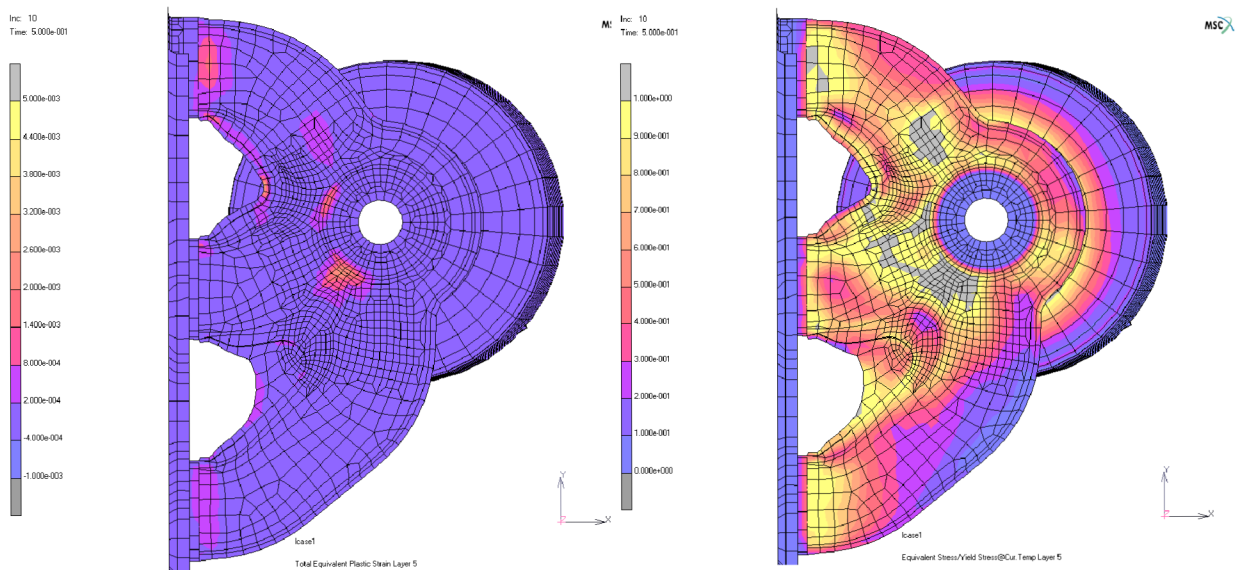
9.1.6. Okrajové podmínky 6

- Vytvoření vazby v ose x pro celý model katalyzátorového modulu s pevnou vazbou na spodní šroub přírubby.



Obr. 9.14 – Zavazbení sběrného výfukového potrubí 6

Tmax=820°C; okrajové podmínky 6

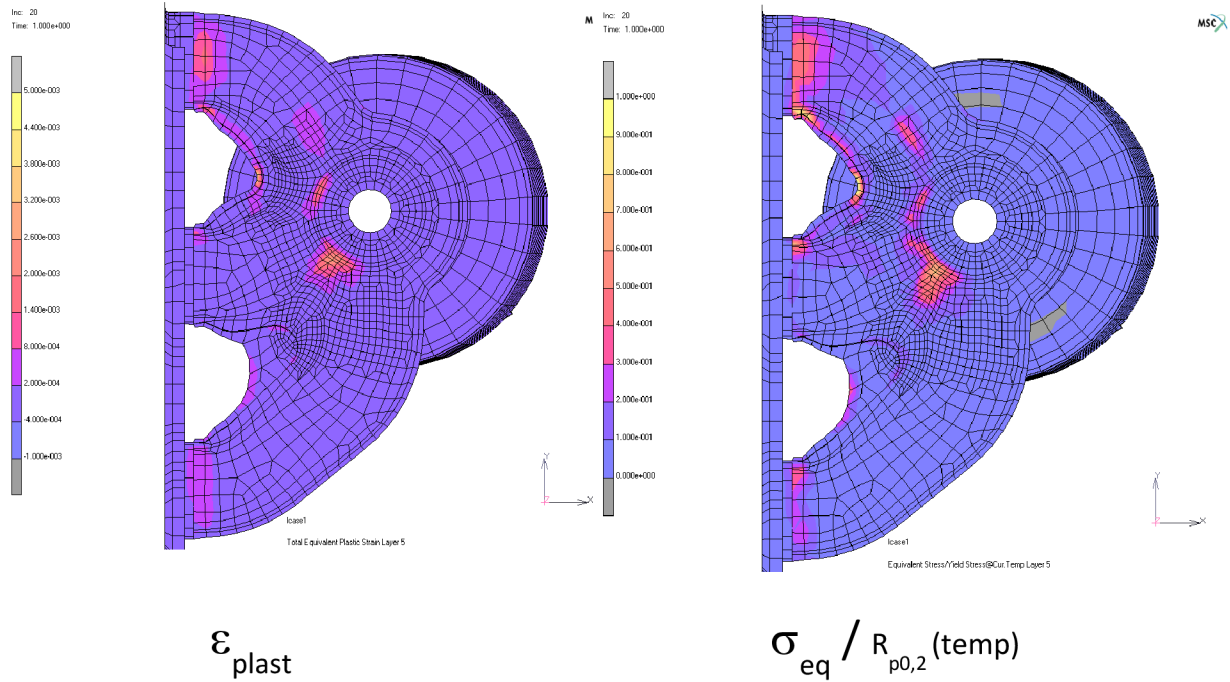


$\varepsilon_{\text{plast}}$

$\sigma_{\text{eq}} / R_{p0,2}(\text{temp})$

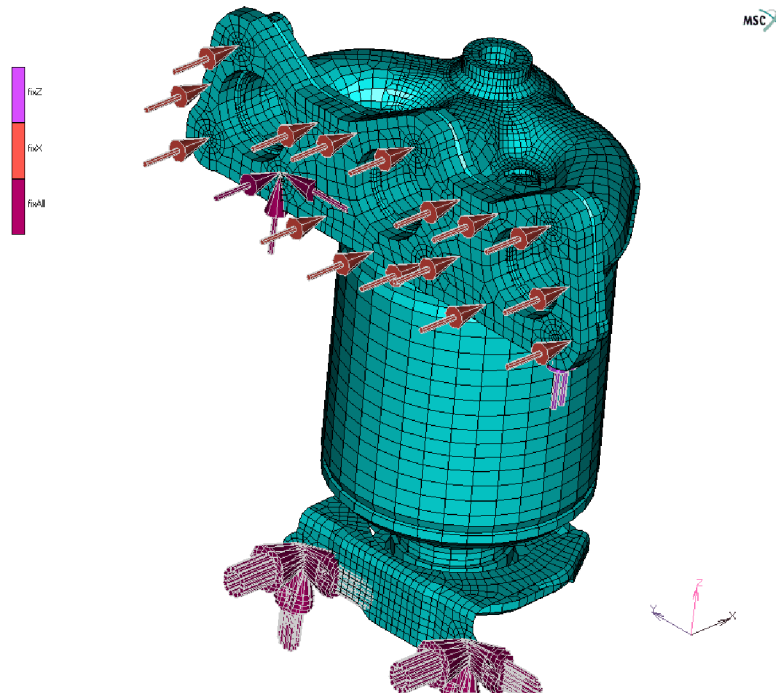


T=20°C po ochlazení; okrajové podmínky 6



9.1.7. Okrajové podmínky 7

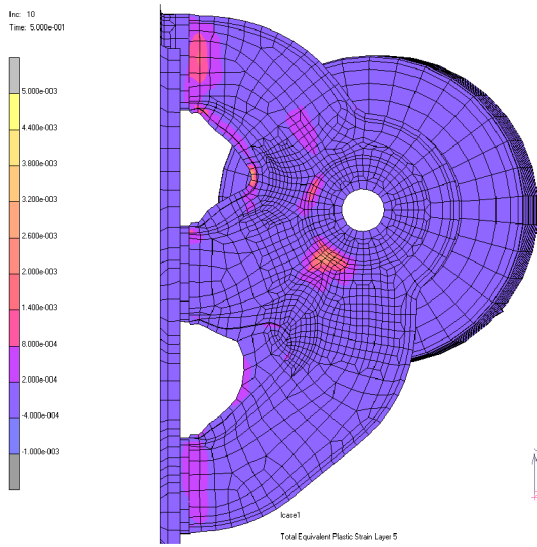
- Vytvoření vazby v ose x pro celý model katalyzátorového modulu s pevnou vazbou na spodní šroub přírůby a spodní držák modulu.



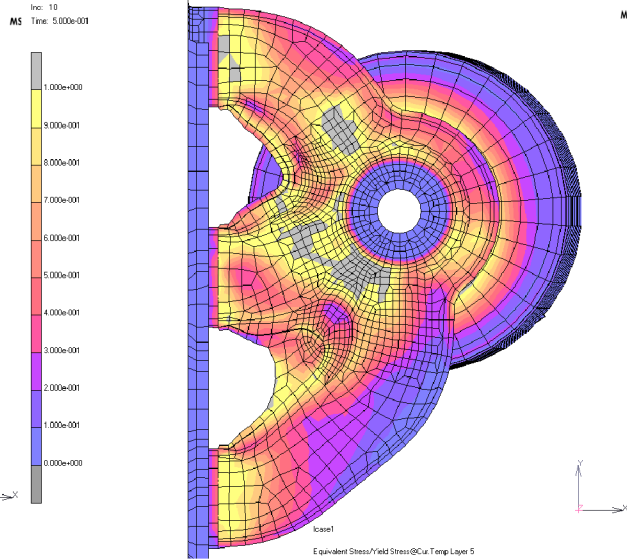
Obr. 9.15 – Zavazbení sběrného výfukového potrubí 7



Tmax=820°C; okrajové podmínky 7

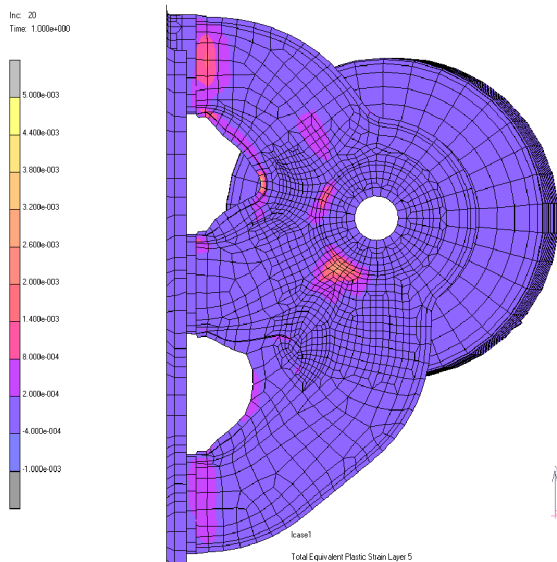


ϵ_{plast}

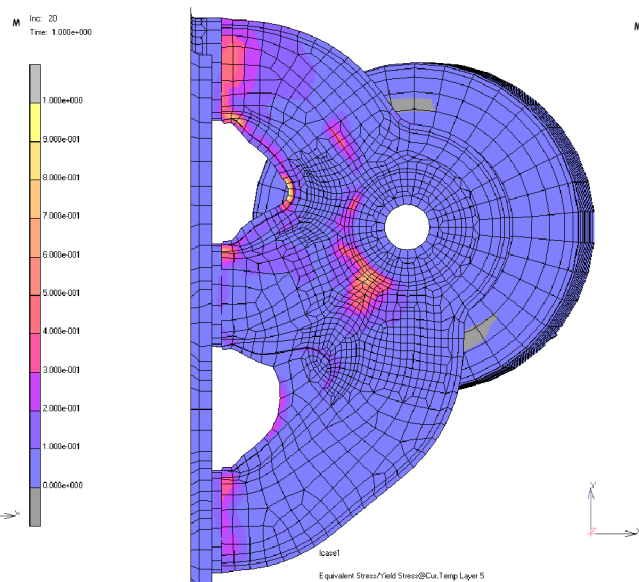


$\sigma_{\text{eq}} / R_{p0,2}(\text{temp})$

T=20°C po ochlazení; okrajové podmínky 7



ϵ_{plast}

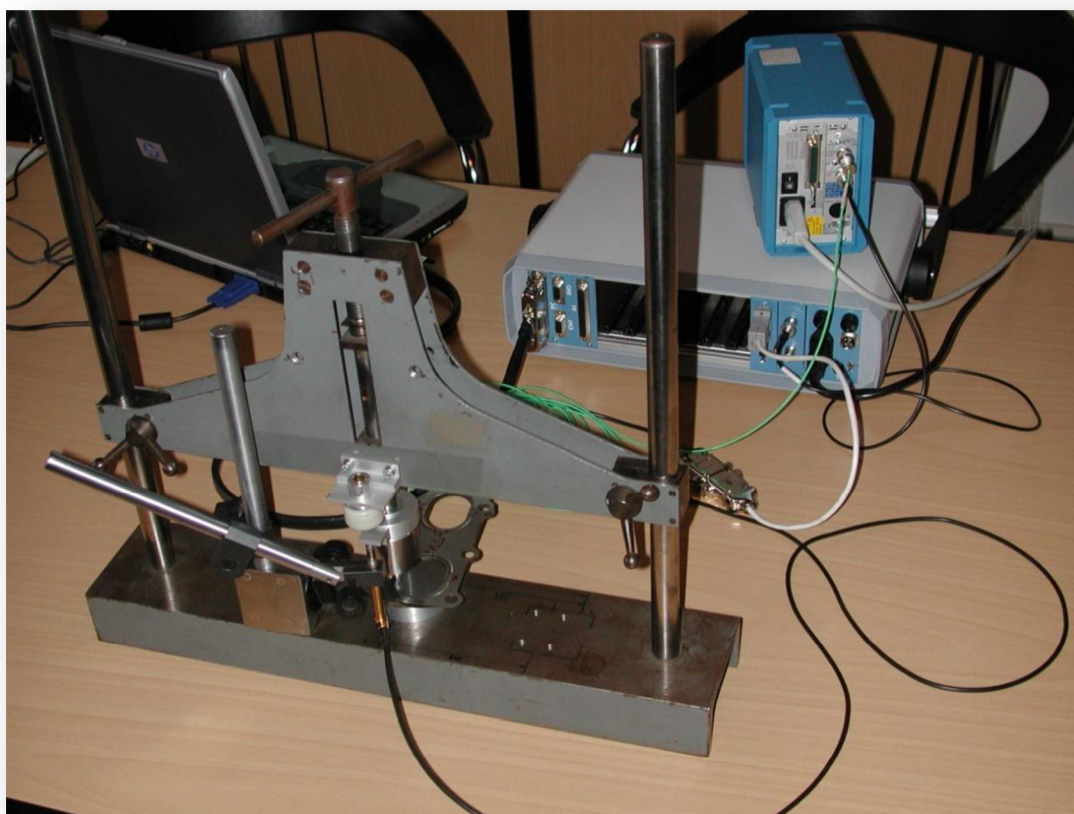


$\sigma_{\text{eq}} / R_{p0,2}(\text{temp})$



10. MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY TĚSNĚNÍ SBĚRNÉHO VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ

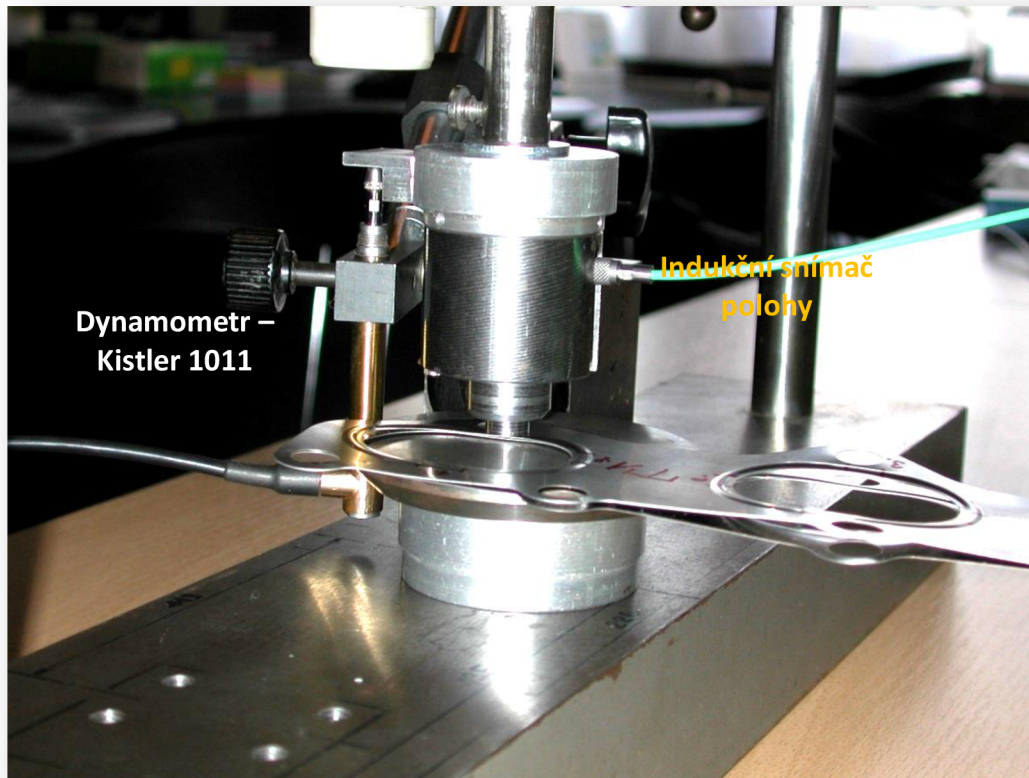
Uspořádání experimentu pro měření bodové charakteristiky těsnění.



Obr. 10.1 – Měřicí ústředna MU16 (na bázi National Instruments)

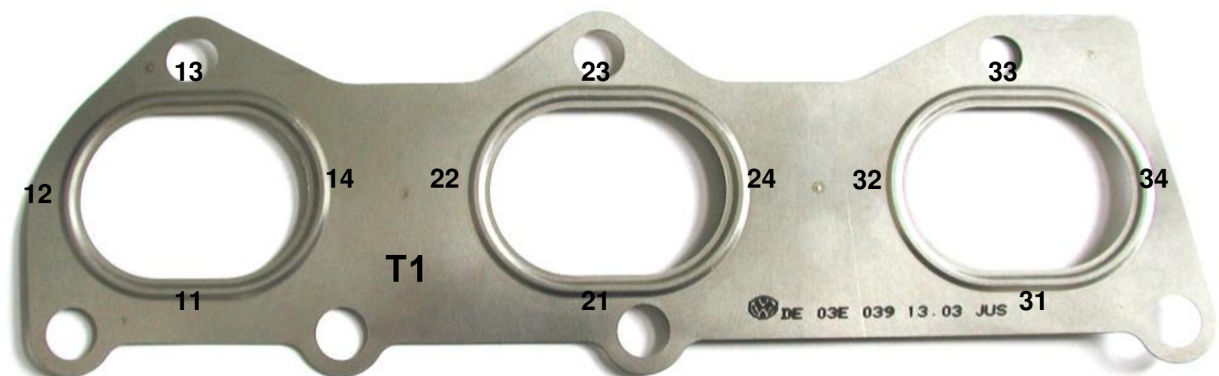


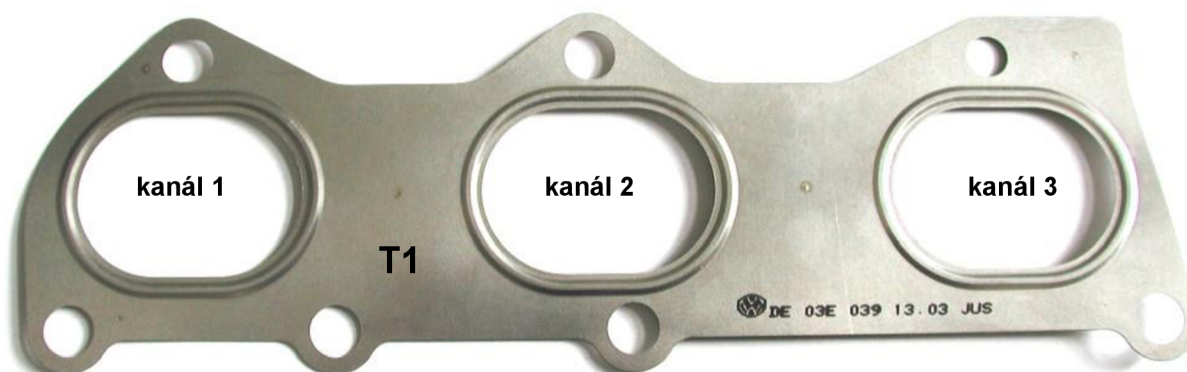
Pro měření bodové charakteristiky těsnění byl použit razník Ø10mm.



Obr. 10.2 – Měřicí ústředna MU16 (na bázi National Instruments)

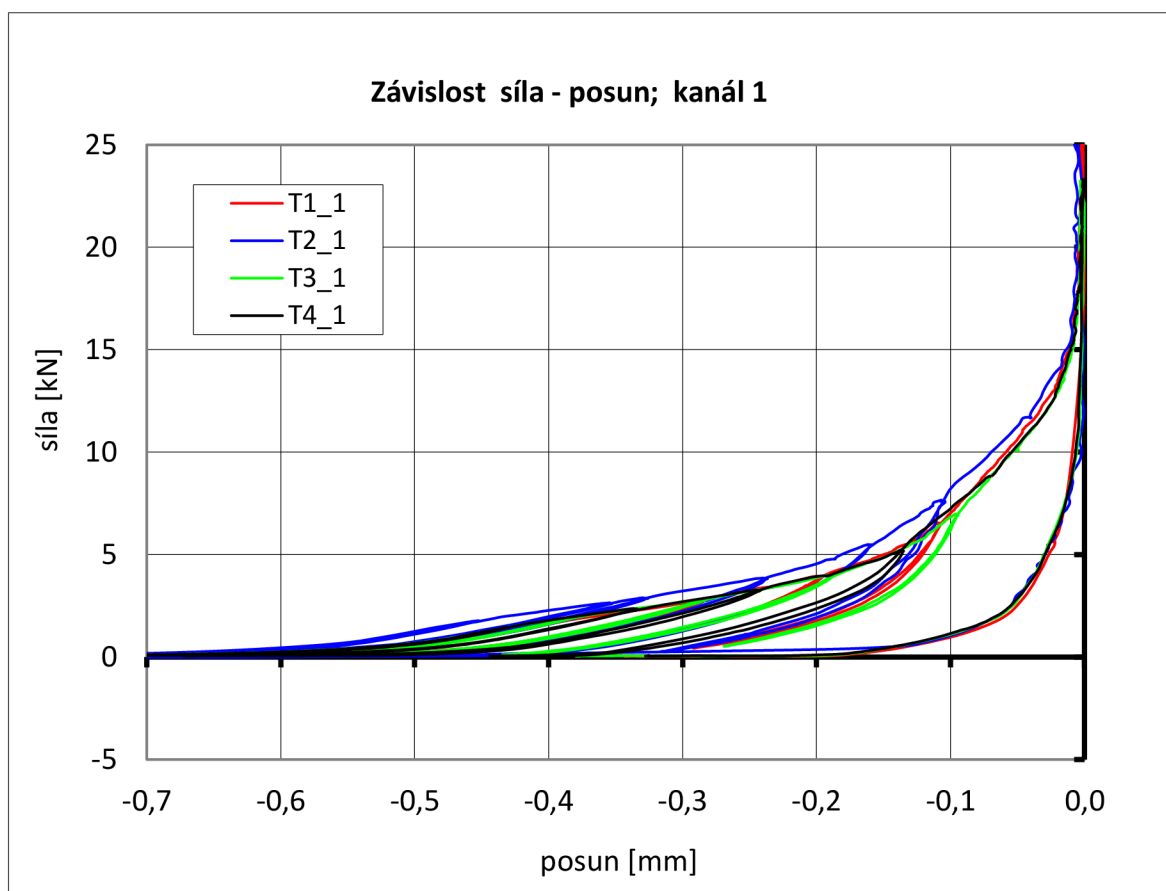
Umístění měřících míst na vzorku těsnění



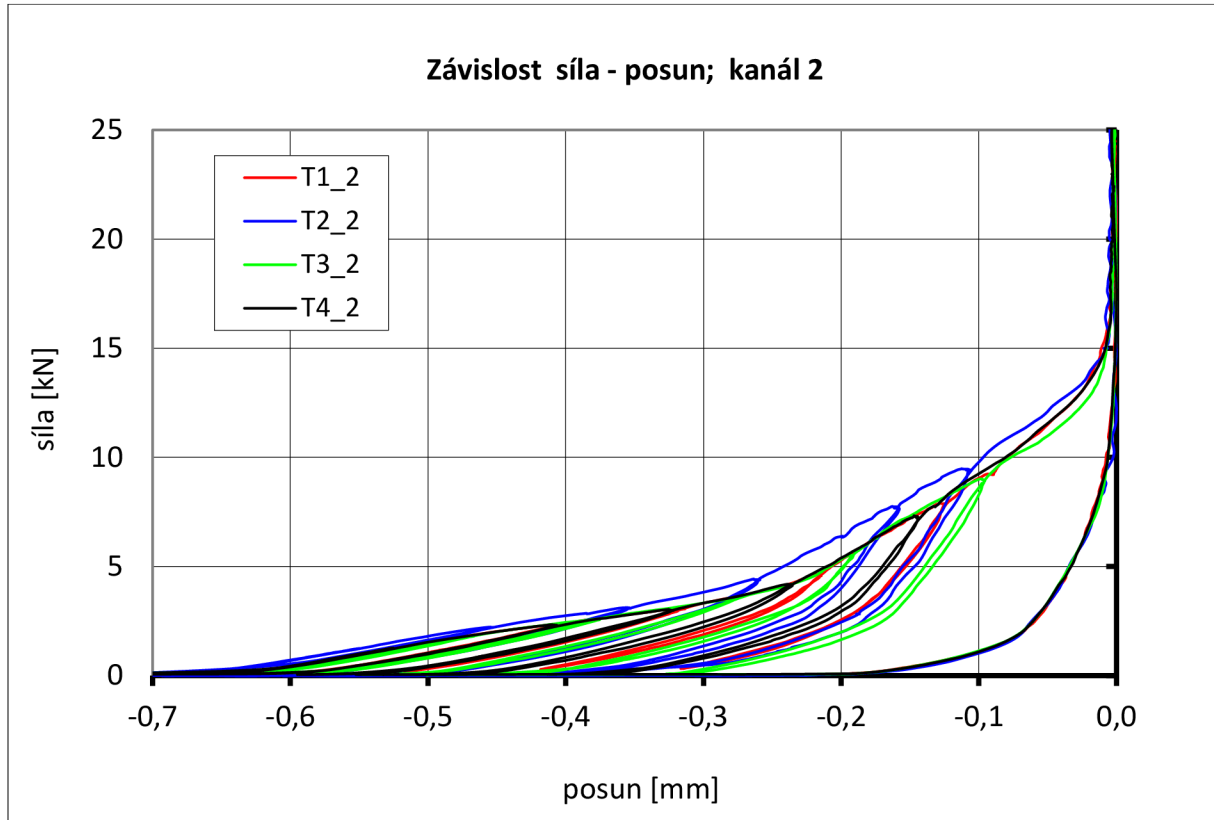


Obr. 10.3 – Ocelové těsnění sběrného výfukového potrubí

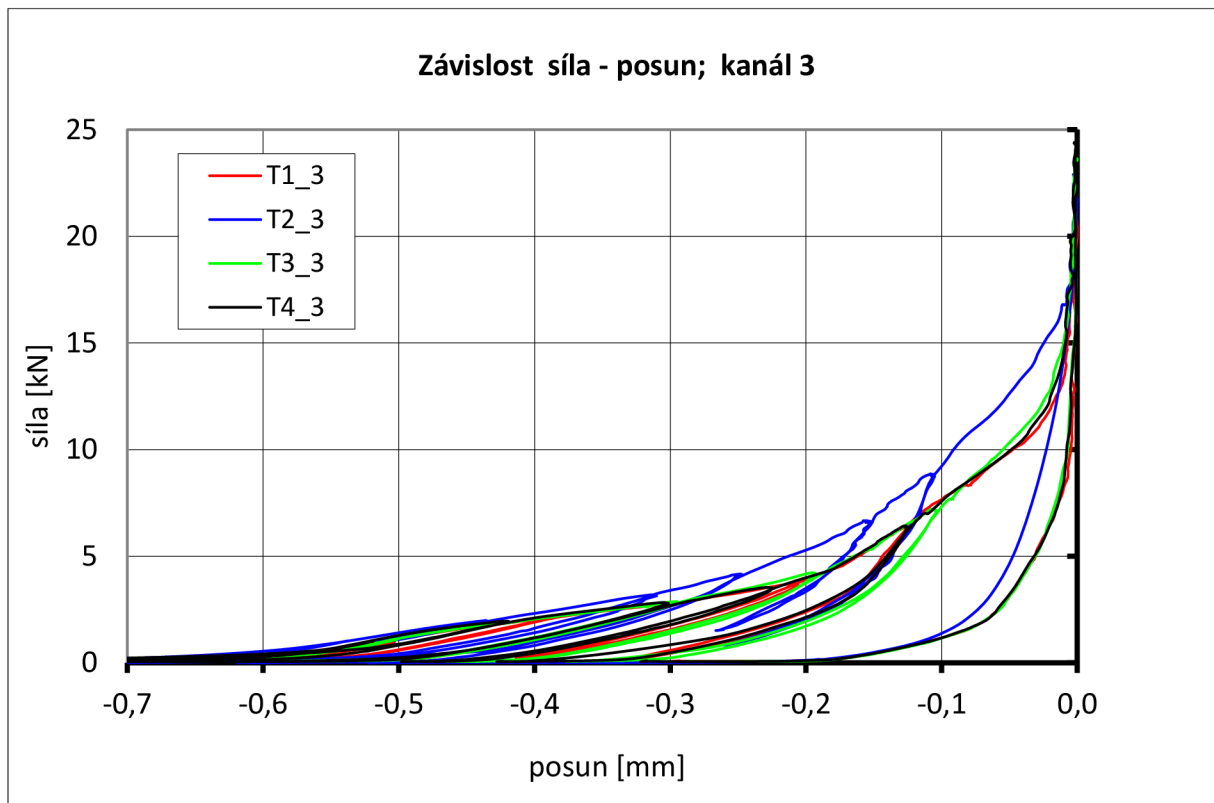
- Síla cca 18 kN je dostačující k úplnému stlačení těsnění jednoho kanálu.
- Charakteristika vykazuje systematické odchylky podle čísla kanálu – lze předpokládat vliv tvaru okolí.
- Na charakteristiku těsnění má vliv číslo šarže (datum výroby) těsnění.



Graf 10.1 – Charakteristika těsnění, kanál 1



Graf 10.2 – Charakteristika těsnění, kanál 2

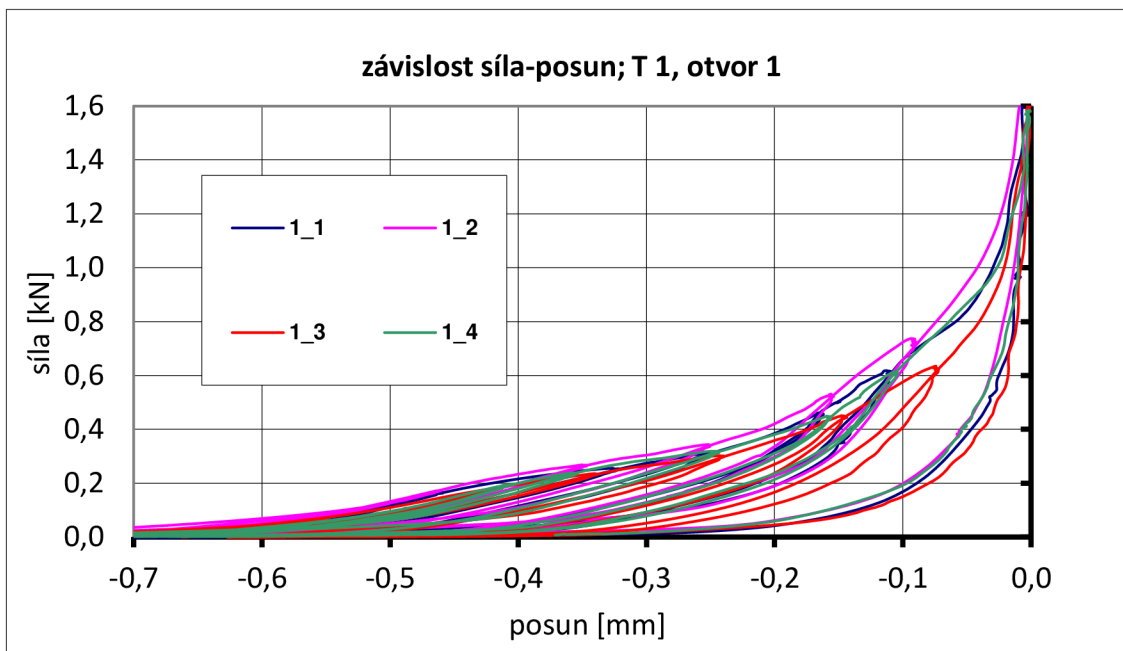


Graf 10.3 – Charakteristika těsnění, kanál 3

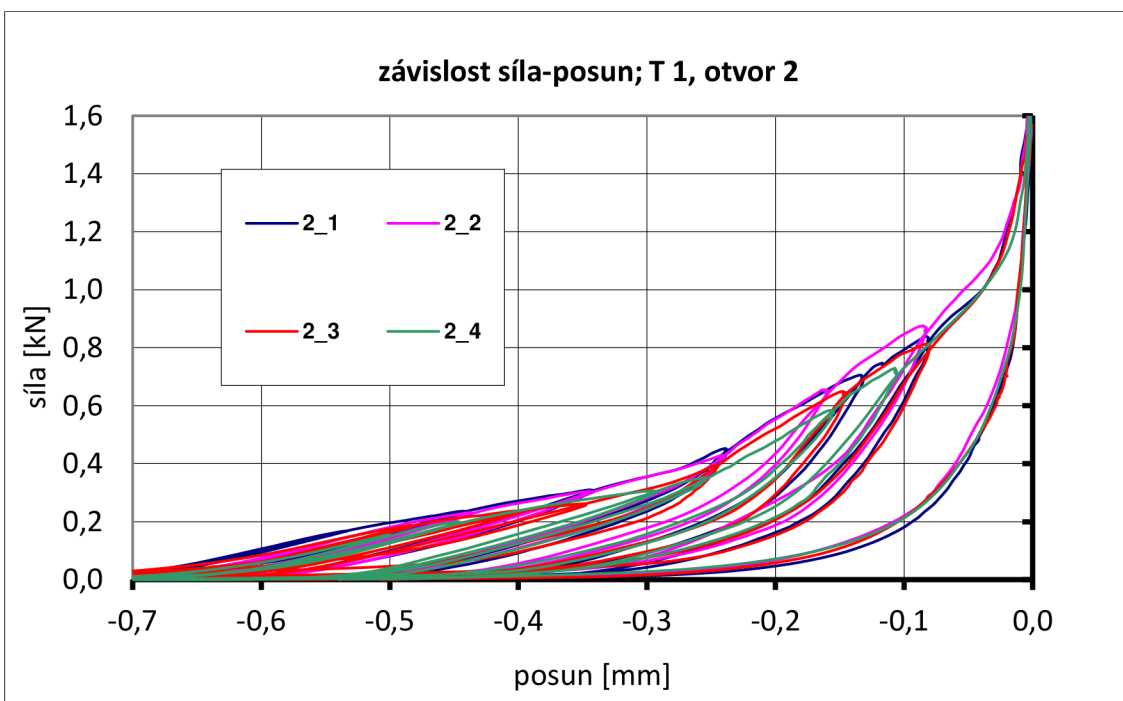


Předchozí lokální zatěžování ovlivňuje charakteristiku těsnění měřenou na obvodu celého kanálu.

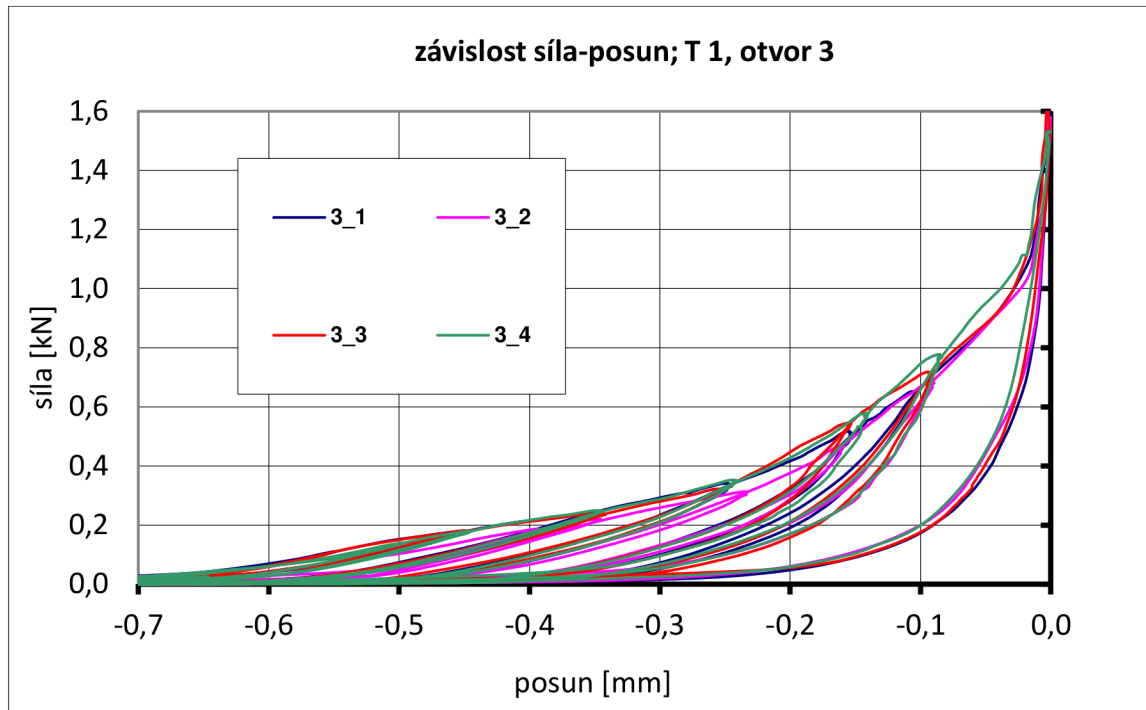
- Síla cca 1,4 kN je dostačující k úplnému stlačení těsnění razníkem $\varnothing 10\text{mm}$.
- Charakteristika je poměrně dobře reprodukovatelná v daném místě bez ohledu na výběr těsnění.



Graf 10.4 – Charakteristika těsnění, otvor 1



Graf 10.5 – Charakteristika těsnění, otvor 2



Graf 10.6 – Charakteristika těsnění, otvor 3

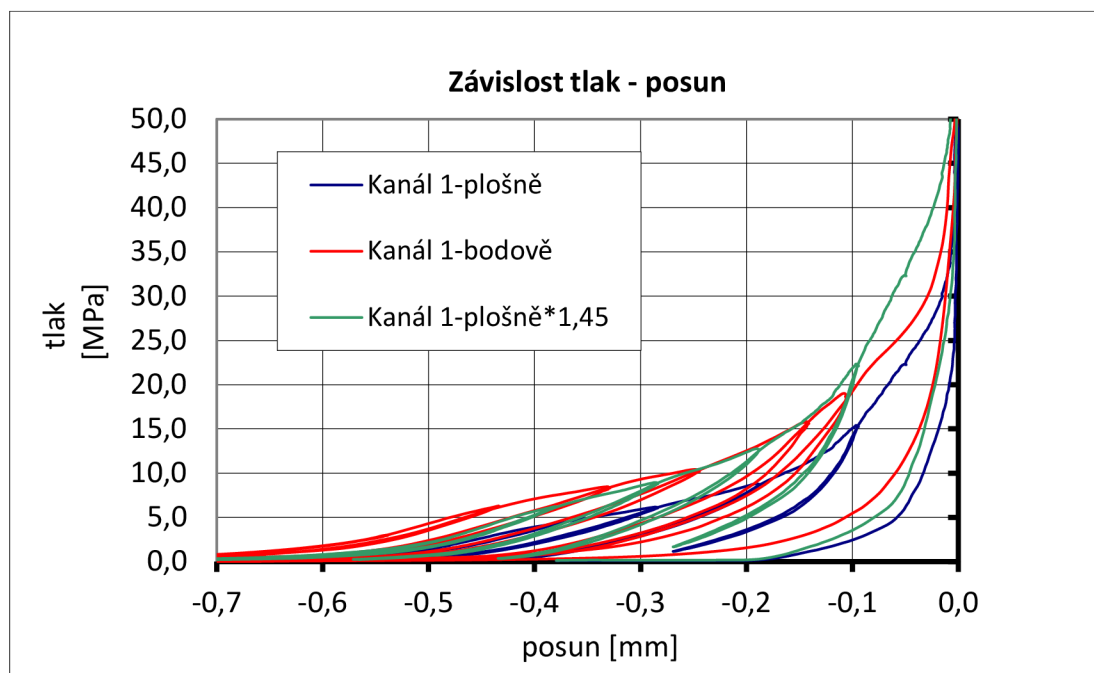
Podobně jako u celého kanálu, charakteristika vykazuje systematické odchylky podle čísla kanálu – lze předpokládat vliv tvaru okolí.

Volba místa měření na těsnění jednoho kanálu má druhořadý vliv oproti volbě kanálu.

Pro účely výpočtů je nutné vyjádřit na základě naměřené závislosti síla – posun (stlačení) charakteristiku těsnění ve tvaru závislosti tlak – posun (stlačení), vztažením síly k aktivní ploše těsnění.

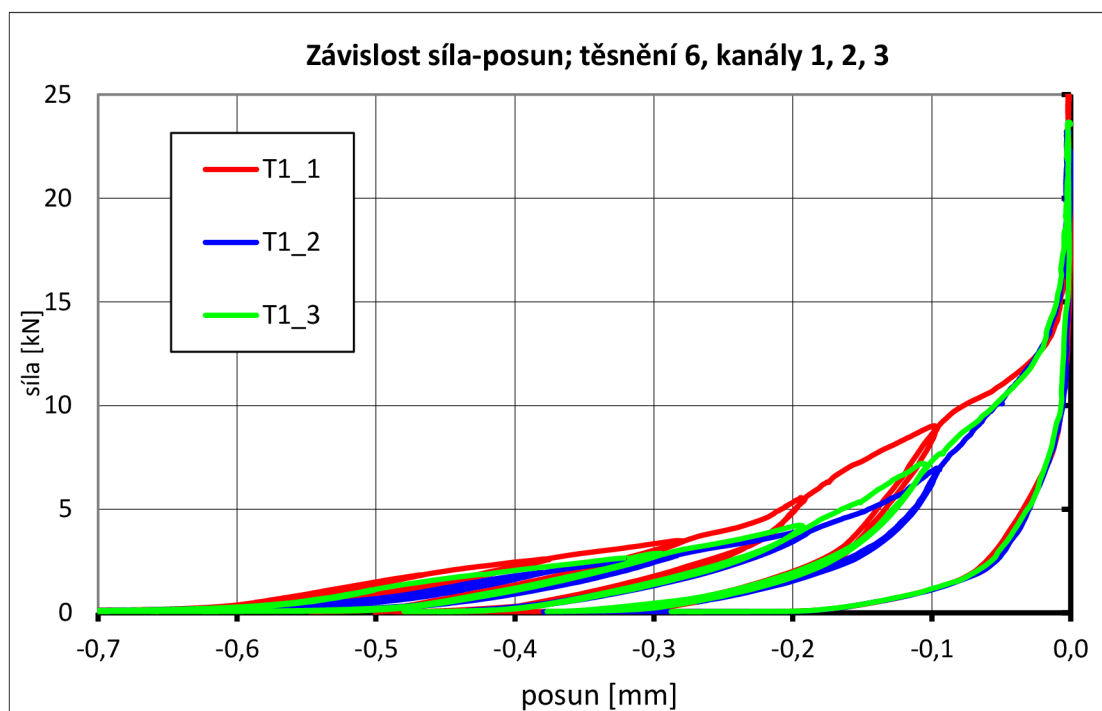
Typické průběhy získané takto z měření bodové a plošné charakteristiky na kanálu 1 jsou v zobrazeném grafu.

- Charakteristika získaná z bodového měření není shodná s charakteristikou měřenou plošně.
- Oba typy charakteristik si nejsou ani lineárně podobné. (viz. Kanál 1-plošně přenásobený konstantním koeficientem 1,45)



Graf 10.7 – Charakteristika těsnění (tlak-posun)

Pro účely výpočtu je vhodné vyjít z charakteristik měřených plošně, neboť speciální konečné prvky použité pro simulaci těsnění („gasket“ elementy) nemají schopnost přesně simulovat vliv okolního nezátíženého těsnění, tak jak by to odpovídalo situaci při bodovém měření. Naproti tomu při použití plošné charakteristiky pro účely simulace experimentu je vypočtená síla shodná s naměřenou.



Graf 10.8 – Charakteristika těsnění (síla-posun)



11. ZÁVĚR

V diplomové práci je ukázána metodika výpočtu životnosti sběrného výfukového potrubí při Scub-Riss testu. Vzhledem k této aplikaci není uváženo při výpočtu creep. Prostřednictvím uvedené metodiky je možné lokalizovat místa plastického přetvoření a v těchto místech stanovit saturované přírůstky ekvivalentní plastické deformace. Maximální hodnota těchto přírůstků pak umožňuje analyzovat životnost daného sběrného výfukového potrubí při Schub-Riss testu.

Výsledky výpočtů uvedené v této diplomové práci mají kromě identifikace kritických míst význam zejména pro porovnání sledovaných variant sběrného výfukového potrubí. Oblasti X a Y jsou místa svarů, kde není reálná geometrie dokonalá, a jak ukazují výpočty, může rovněž docházet ke kontaktům mezi horním a dolním plechem potrubí. To jsou skutečnosti, které pozorovatele nabádají k opatrnému posuzování výsledků. Naštěstí praktické zkušenosti ze zkoušek sběrného potrubí ukazují, že jen velmi vzácně dochází k poškození v oblastech X a Y. Z tohoto důvodu doporučujeme přikládat větší váhu při vyhodnocení hodnotám v oblastech A-D.

Z analyzovaných variant doporučujeme variantu VAR.4. V oblastech X, Y má poměrně nízké hodnoty přírůstků plastické deformace (kolem 0,6). Důležité jsou hodnoty přírůstků plastické deformace v oblastech A-C. Zde varianta VAR.4 vykazuje velmi malé přírůstky plastické deformace, které jsou pod úrovní 0,2.

Variantu VAR.7, v případě jejích významně lepších technologických vlastností, je rovněž možné akceptovat. Hodnoty přírůstků plastické deformace jsou oproti variantě VAR.4 poněkud vyšší, avšak nikoli výrazně.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HTP, Wikipedie[online].2013 [cit.2014-05-25]. Dostupný z WWW <<http://cs.wikipedia.org/wiki/HTP>>.
- [2] Výkonový diagram, ŠKODA Media Portal[online].2012 [cit.2014-05-25]. Dostupný z WWW:<https://media.skoda-auto.com/cs/_layouts/Skoda.PRPortal/pictures.aspx?Category=0&Refiners=2%7C53&type=0>.
- [3] Co je a z čeho se skládá výfuk [online].2014 [cit.2014-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.aavyfuky.cz/index.php?stranka=51-co-je-a-z-ceho-se-sklada-vyfuk#.U4Ypbf2KBhE>>.
- [4] Výfukové potrubí, škoda díly[online].2014 [cit.2014-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.skoda-dily.cz/nahradni-dil/047253031g-vyfukove-potrubi-svody-1-0mpi-1-4mpi-oe-9333.html>>.
- [5] Výfukové svody, Autodíly – Krbec[online].2014 [cit.2014-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.autodily-krbec.cz/index.php?nid=10417&lid=cs&oid=2365652>>.
- [6] Katalyzátor, autolexicon.net[online].2013 [cit.2014-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://cs.autolexicon.net/articles/katalyzator/>>.



SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázky

Obr. 2.1	Parametry motoru 1,2 HTP	11
Obr. 2.2	Motor EA111 – 1,2 HTP	12
Obr. 2.3	Výfukový systém - 1,2 HTP	13
Obr. 2.4	Sběrné výfukové potrubí – 1,2 HTP	14
Obr. 2.5	Litinové sběrné výfukové potrubí	14
Obr. 2.6	Ocelové sběrné výfukové potrubí	14
Obr. 2.7	Katalyzátorový modul - 1,2 HTP	16
Obr. 2.8	Redukce	16
Obr. 2.9	Oxidace	16
Obr. 4.1	Proudové poměry při simulaci sběrného výfukového potrubí	18
Obr. 4.2	Povrchové měření teplot	19
Obr. 4.3	Příklad vypočtených teplot spalín	20
Obr. 4.4	Schéma prostupu tepla stěnou	21
Obr. 5.1	Mechanické okrajové podmínky	24
Obr. 5.2	Materiálový model	25
Obr. 8.1	Rozložení teplot VAR.1	36
Obr. 8.2	Rozložení teplot VAR.2	37
Obr. 8.3	Rozložení teplot VAR.3	37
Obr. 8.4	Rozložení teplot VAR.4	38
Obr. 8.5	Rozložení teplot VAR.5	38
Obr. 8.6	Rozložení teplot VAR.6	39
Obr. 8.7	Rozložení teplot VAR.7	39
Obr. 8.8	Hodnoty maximálních naměřených teplot Ehra II a jejich zavedení do výpočtu	40
Obr. 9.1	Přírůstky plastických deformací VAR.1	41
Obr. 9.2	Přírůstky plastických deformací VAR.2	42
Obr. 9.3	Přírůstky plastických deformací VAR.3	42
Obr. 9.4	Přírůstky plastických deformací VAR.4	43
Obr. 9.5	Přírůstky plastických deformací VAR.5	43
Obr. 9.6	Přírůstky plastických deformací VAR.6	44
Obr. 9.7	Přírůstky plastických deformací VAR.7	44
Obr. 9.8	Označení kritických oblastí, kde jsou odečítány přírůstky plastických deformací	45
Obr. 9.9	Zavazbení sběrného výfukového potrubí 1	51
Obr. 9.10	Zavazbení sběrného výfukového potrubí 2	53
Obr. 9.11	Zavazbení sběrného výfukového potrubí 3	54
Obr. 9.12	Zavazbení sběrného výfukového potrubí 4	56
Obr. 9.13	Zavazbení sběrného výfukového potrubí 5	57
Obr. 9.14	Zavazbení sběrného výfukového potrubí 6	59
Obr. 9.15	Zavazbení sběrného výfukového potrubí 7	60
Obr. 10.1	Měřicí ústředna MU16 (na bázi National Instruments)	62
Obr. 10.2	Měřicí ústředna MU16 (na bázi National Instruments)	63
Obr. 10.3	Ocelové těsnění sběrného výfukového potrubí	64



Tabulky

Tab. 7.1 Parametry charakterizující cyklickou plasticitu a nízkocyklickou únavovou životnost vybraných materiálů	34
Tab. 9.1 Přírůstky plastické deformace pro VAR.1	48
Tab. 9.2 Přírůstky plastické deformace pro VAR.2	48
Tab. 9.3 Přírůstky plastické deformace pro VAR.3	49
Tab. 9.4 Přírůstky plastické deformace pro VAR.4	49
Tab. 9.5 Přírůstky plastické deformace pro VAR.5	49
Tab. 9.6 Přírůstky plastické deformace pro VAR.6	50
Tab. 9.7 Přírůstky plastické deformace pro VAR.7	50

Grafy

Graf 5.1 Závislost meze kluzu na teplotě	26
Graf 5.2 Vlastnosti materiálu	26
Graf 5.3 Koeficient tepelné roztažnosti	27
Graf 5.4 Závislost koeficientu roztažnosti a Youngova modulu na teplotě	27
Graf 5.5 Typický průběh po částech lineární funkce teploty používaný při výpočtu	28
Graf 5.6 Průběh teplot spalin	29
Graf 6.1 Charakteristika těsnění	31
Graf 6.2 Experimentálně získaná charakteristika těsnění	32
Graf 9.1 Průběh plastické deformace po ohřevu res. Ochlazení VAR.1	46
Graf 9.2 Průběh plastické deformace po ohřevu res. Ochlazení VAR.2	46
Graf 9.3 Průběh plastické deformace po ohřevu res. Ochlazení VAR.3	46
Graf 9.4 Průběh plastické deformace po ohřevu res. Ochlazení VAR.4	46
Graf 9.5 Průběh plastické deformace po ohřevu res. Ochlazení VAR.5	47
Graf 9.6 Průběh plastické deformace po ohřevu res. Ochlazení VAR.6	47
Graf 9.7 Průběh plastické deformace po ohřevu res. Ochlazení VAR.7	47
Graf 10.1 Charakteristika těsnění, kanál 1	64
Graf 10.2 Charakteristika těsnění, kanál 2	65
Graf 10.3 Charakteristika těsnění, kanál 3	65
Graf 10.4 Charakteristika těsnění, otvor 1	66
Graf 10.5 Charakteristika těsnění, otvor 2	66
Graf 10.6 Charakteristika těsnění, otvor 3	67
Graf 10.7 Charakteristika těsnění (tlak-posun)	68
Graf 10.8 Charakteristika těsnění (síla-posun)	68