

MKP simulace propadů na střeše od teplotního zatížení při průchodu vozu lakovnou se zohledněním vlivu přetvoření a zbytkových napětí po lisování

Bc. Rudolf Zweschper

Vedoucí práce: doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem jednotlivých parametrů získaných simulací lisování v MKP programu Pam-Stamp na deformaci a napjatost dané součásti při statickém zatížení. Zároveň je řešena otázka způsobu namapování těchto parametrů na jinou síť, vytvořenou pro MKP program Abaqus. Také je zkoumán vliv těchto parametrů a technologie výroby na buckling na střeše automobilu. Nakonec je navrženo řešení, které by mohlo pomoci buckling odstranit.

Klíčová slova

Abaqus, Pam-Stamp, Python, MKP, lisování, stabilita, lakování, střecha, skript, mapování, zbytkové napětí, deformace, plasticita

1 Úvod

Ztráta stability střechy (tzv. bucklingu) po průjezdu vozidla lakovnou je poměrně důležitý jev, který může nepříznivě ovlivnit kvalitu výsledného vozidla. Proto je snahou při vývoji vozu numerickými simulacemi metodou konečných prvků (dále jen MKP) tento jev předpovědět a případně mu vhodnými opatřeními předejít. Pokud se buckling podaří odhalit již v rané fázi vývoje, obvykle je nejjednodušší cestou k jeho odstranění optimalizace geometrie střechy směrem k menším poloměrům křivosti. Často ale změna geometrie střechy není možná, a proto je třeba otestovat vliv technologie výroby jak samotné střechy, tak její montáže k vozu.

Buckling na střeše vzniká v lakovně díky teplotnímu zatížení. Na vnějších plochách vozu, na které je nanášena barva, toto zatížení dosahuje přibližně 220°C. Měřením získané přesnější rozložení teplot v době tvorby této práce nebylo k dispozici.

Pro řešení úlohy propadu střechy vozu s výrobním označením SK250 při teplotním zatížení je použit MKP program Abaqus 6.8.2. Důvodem jsou především větší zkušenosti s tímto programem, zároveň ale také výsledky z Abaqusu pomohou verifikovat výsledky ze simulace bucklingu na stejném vozu pomocí programu MSC/Nastran (dále jen Nastran). Pro simulace lisování firma Škoda Auto používá MKP program Pam-Stamp, který je pro tyto účely speciálně navržen a je proto vhodnější než Abaqus.

Tato práce pojednává o způsobu přenesení dat z Pam-Stampu do Abaqusu za účelem zpřesnění simulací statických nelineárních úloh. Podrobněji se zabývá vlivem jednotlivých výsledkových parametrů Pam-Stampu na buckling. Na modelu konkrétního vozu SK250 je naznačeno možné řešení vhodnější volbou technologického procesu výroby střechy. Zároveň zkoumá na obecnější úrovni nutnost zahrnutí výsledkových parametrů Pam-Stampu do výpočtu standardní statické nelineární úlohy. Tím poskytuje možnost dalšího použití navržených postupů v zásadě na jakémkoliv plechové díly, které jsou vyráběny lisováním.

2 Cíl práce

Hlavním cílem diplomové práce je nalézt vhodný způsob přenosu výsledkových parametrů po lisování z programu Pam-Stamp do programu Abaqus a následné posouzení jejich vlivů na simulaci propadů na střeše od teplotního zatížení při průchodu vozů lakovnou. Dále je cílem navrhnout zvýšení stability změnou rozložení těchto výsledkových parametrů, zejména pak zbytkových napětí. Pokud nebude možno namapovat výsledky z Pam-Stampu na síť Abaqusu pomocí dostupného softwaru, potom bude třeba vytvořit skript pro namapování zvolených dat.

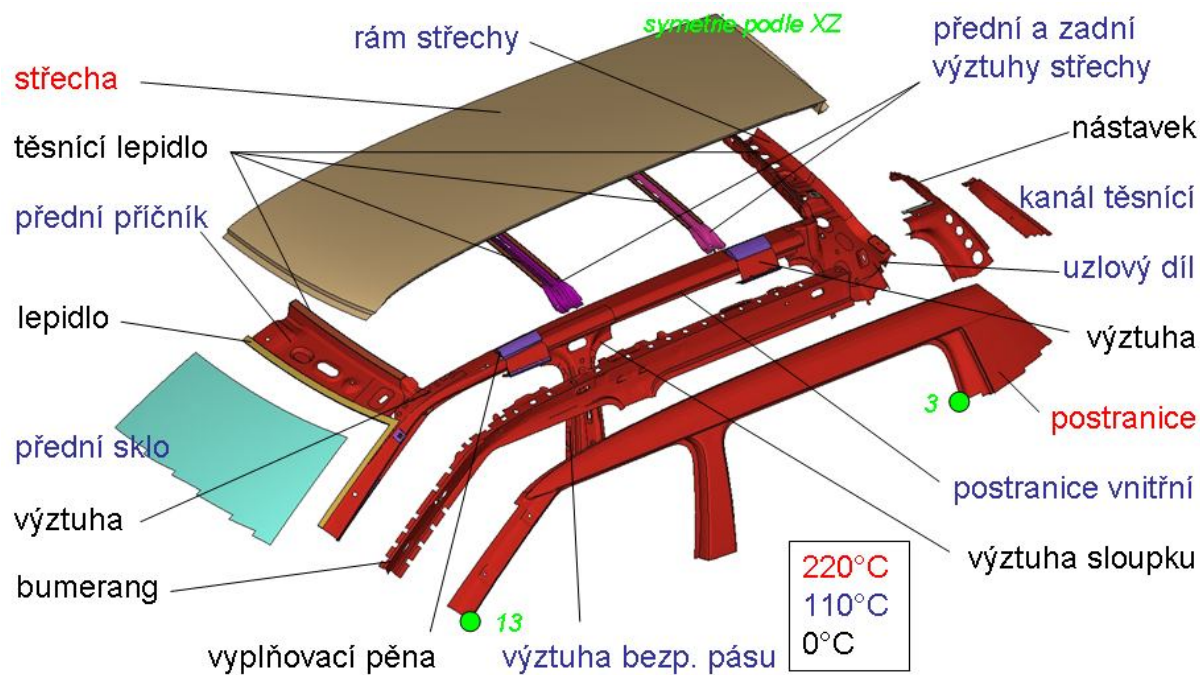
Dílčím úkolem je ověření vlivu jednotlivých výsledkových parametrů Pam-Stampu použitím v jednoduchých testovacích úlohách.

Dále je třeba převést vhodným způsobem model střechy Nastranu do Abaqusu tak, aby se při simulaci teplotního zatížení vypočtená deformace co nejvíce shodovala s výsledky z programu Nastran, které jsou experimentálně ověřeny. Několika simulacemi potom ověřit vliv kvality sítě (zejména hustoty sítě v blízkosti lemu), vliv odchylky skutečné naměřené geometrie po výrobě od jmenovitých rozměrů střechy a vliv možné nepřesnosti výroby střechy v oblasti lemu na výslednou deformaci při teplotním zatížení v lakovně.

3 Střecha vozu SK250

3.1 Model střechy

Model sestavy střechy obsahuje kromě samotného plechu střechy také přilehlé díly. Model využívá jedné roviny symetrie a je uložen v jednom bodě předního sloupku ve směrech os x , y , z a v jednom bodě zadního sloupku ve směru osy z . Zatížení modelu bylo definováno teplotním polem – plechy kapoty, na které je aplikován nátěr, mají teplotu vyšší o 220°C, díly viditelné části kapoty zevnitř auta měly teplotu vyšší o 110°C, vnitřní výztužné plechy mají teplotní změnu nulovou, viz. obr. 1. Barvy popisků jednotlivých dílů na obrázku odpovídají teplotnímu zatížení, barvy samotných dílů odpovídají materiálové definici.



Obr. 1. Rozklad sestavy modelu

Na střeše a přední a zadní výztuze střechy byl definován nelineární materiál, ostatní plechy jsou modelovány lineárním materiálem. Modul pružnosti plechových dílů je všude $E=210\text{GPa}$, Poissonovo číslo $\nu = 0,3$. Mez kluzu střechy $R_e = 140\text{MPa}$.

K úloze byl již připraven model v programu Nastran, který bylo nutné převést do programu Abaqus. Pomocí softwaru Ansa nebylo problémem přenesení skořepinových elementů a elementů pro 3D kontinuum, o něco komplikovanější bylo přenesení svarů. Bodové svary byly modelovány pomocí fastenerů s využitím informace o polohách a rádiusech vlivu elementů programu Nastran (Cweld). Při modelování podélného svaru stejným způsobem jako při modelování bodových svarů úlohu nebylo možné přivést do konvergence ani při použití značně vysokých parametrů stabilizace. V oblasti kolem svaru vznikaly nevěrohodně velké gradienty napětí.

Další pokusy vedly k vytvoření modelu podélného svaru vazbou tie. Úloha ale také špatně konvergovala, ke zvlnění docházelo po celé délce svaru, což neodpovídá skutečnosti. Jako nejvhodnější se nakonec ukázalo naprojektovat každý bod svaru na nejbližší plochy, na kterých byly vytvořeny nové uzly spojené mezi sebou beam elementy a s okolní střechou vazbou coupling.

Lepené spoje jsou modelovány pomocí jedné vrstvy solid elementů C3D8 (kohézní vrstva), jejíž uzly jsou spojeny s adherendy vazbou coupling (adhézní vrstva). Použití typů elementů na jednotlivé části modelu je v tab. 1:

Tabulka. 1. Použité elementy při stavbě modelu střechy

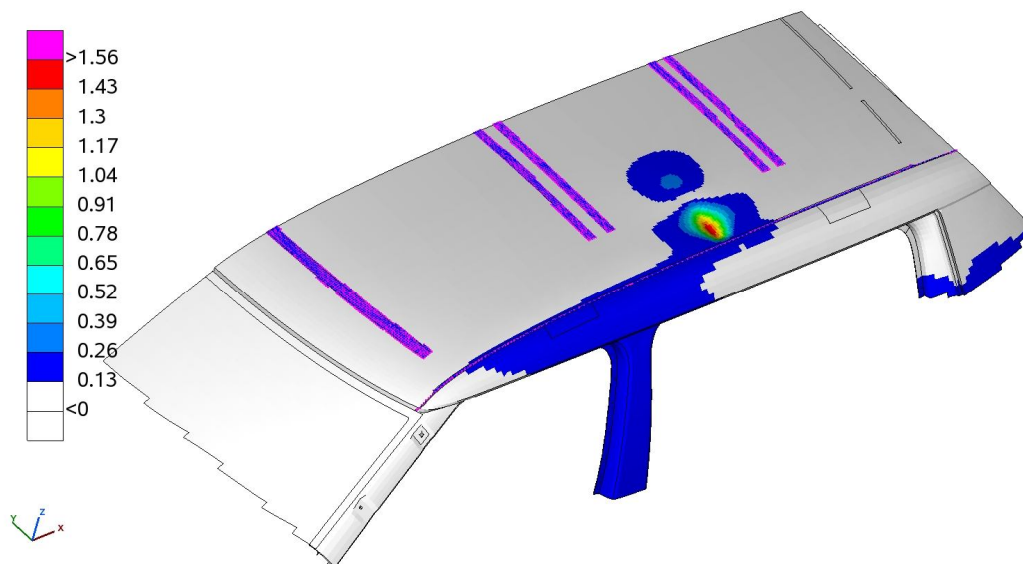
element	část sestavy střechy
skořepinové elementy S4,S3R	střecha, rám střechy, postranice, bumerang, výztužné plechy, přední sklo
elementy pro 3D kontinuum C3D8	kohézní vrstva lepidla, těsnění, vyplňovací pěna
nosíkové elementy	podélný svar MIG mezi střechou a vnější postranicí
fastenery	bodové svary

3.2 Propad na střeše

Střecha je v místě podélného svaru v oblasti mezi dvěma příčníky příliš plochá. Díky vyšší tuhosti se při ohřadí deformují části auta spojené se střechou jen málo v porovnání s deformací samotné střechy.

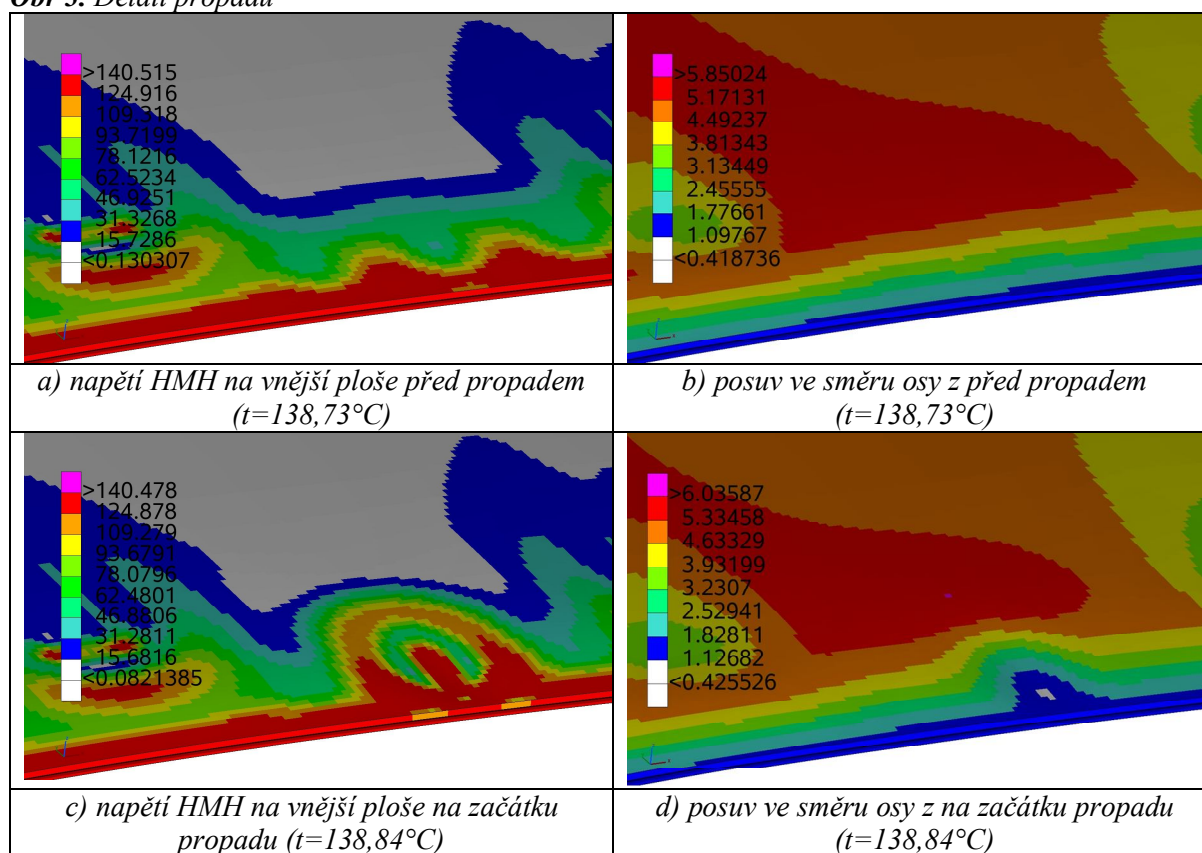
V místě svaru je střecha téměř vetknutá. Při zahřátí střechy jsou posuvy zpočátku díky konkávnosti celé plochy kladné a ve střeše vzniká tlakové napětí. Při dosažení určité teploty ale začne docházet v důsledku vetknutí a malému zakřivení k silnému nepravidelnému pěchování materiálu v oblasti blízko svaru. Zde vznikají první nepravidelné plastické deformace a tato lokální změna tuhosti materiálu způsobí, že se střecha začne vlnit. Toto zvlnění kopíruje ohybové napětí, membránové napětí je při iniciaci bucklingu rozloženo rovnoměrně. Zpočátku vznikne několik průhybů těsně vedle sebe, velmi rychle poté vznikne jeden hlavní propad přibližně uprostřed tohoto zvlnění a ostatní zvlnění je postupně eliminováno. Tento propad je provázen rychlým nárůstem ohybového napětí v místě největšího zakřivení, které je provázeno vznikem odpovídající plastické deformace. Rozložení plastické deformace a maximální napjatosti je paprskovité - jeden paprsek je kolmý na podélný svar, další dva jsou vůči němu orientovány přibližně pod úhlem $\pm 45^\circ$. Při začátku ochlazování se vzniklé napětí snižuje v celém objemu střechy a plastické deformace ustavené po zahřátí jsou stejné. V době, kdy je proces ochlazování hotov přibližně z 25 procent se začne viditelně projevovat vliv plastických deformací, které působí jako výztuhy pro propad a mají tendenci udržet vzniklé deformace od zahřátí. V malých oblastech kolem propadu vzniknou tahová napětí, která vytahují hranici propadu. Rozložení těchto napětí respektuje

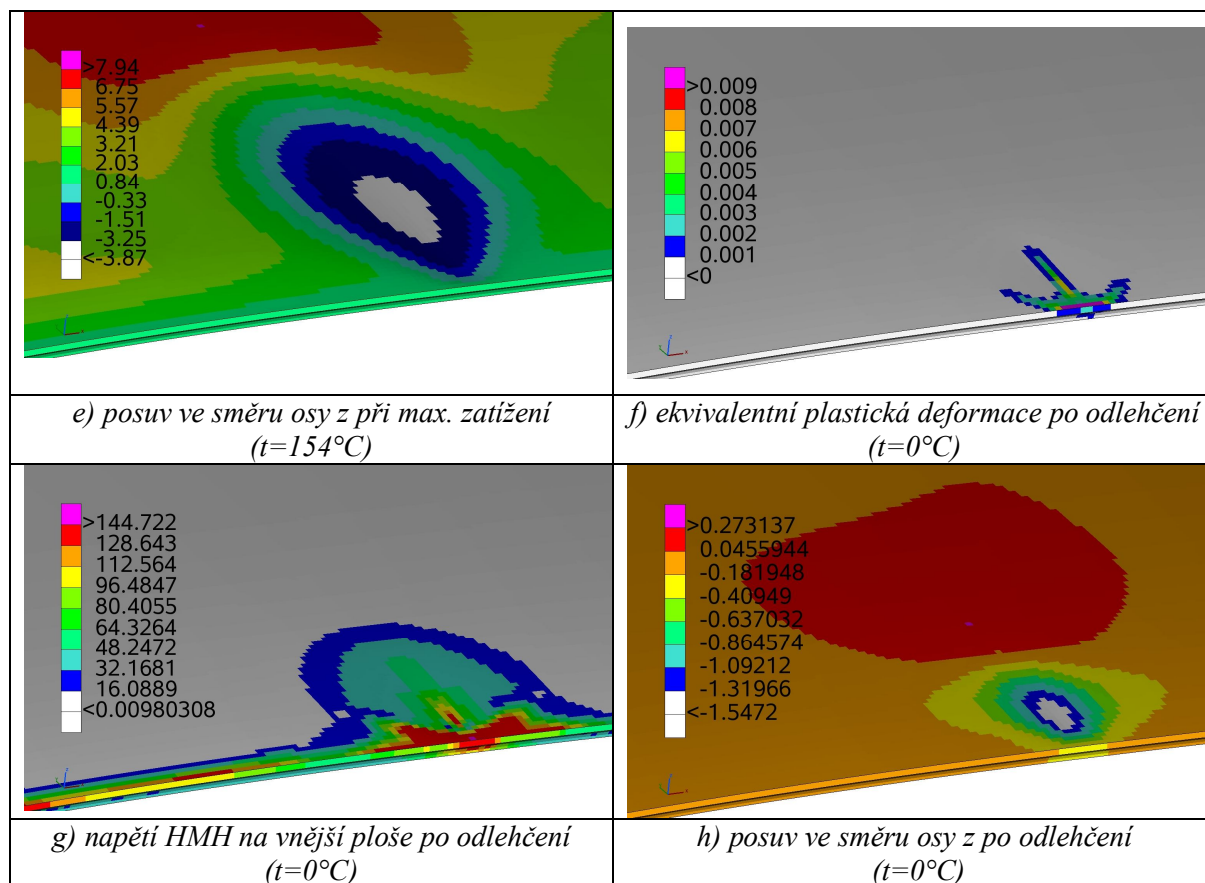
polohu zformovaných plastických deformací. Poloha minima propadu se začne posouvat blíž k svaru. Nejsilnější je tento jev v druhé polovině ochlazování, kdy poloha větší části střechy téměř dosáhla původní polohy, ale navzdory ochlazování se propad podle obr 2. zdánlivě zvětšuje (ve skutečnosti se posouvá a zmenšuje, posunutí propadu způsobí zvlnění křivky). Obr.3 jsou z výpočtu při ohřátí na 70% jmenovité hodnoty (220°C) a následném ochlazení.



Obr 2. Absolutní hodnota posuvů po odlehčení ($t=0^{\circ}\text{C}$)

Obr 3. Detail propadu





4 Export dat z Autoformu a Pam-Stampu

Oba programy lze použít k simulaci tváření plechových dílů, namapování výsledků na síť Abaqusu je velmi omezené. Z Autoformu lze namapovat na síť Abaqusu pouze tloušťku a efektivní plastickou deformaci. Z Pam-Stampu lze namapovat tloušťku, efektivní plastickou deformaci, tenzory napětí a deformace, backstress a lomové parametry. Mapování lze ale provést pouze na síti Pam-Stampu.

4.1 Přenos dat z Autoformu do Abaqusu

Autoform používá pro simulaci model vysítovaný trojúhelníkovou sítí, která je nevhodná pro jakékoliv výpočty MKP. Obsahuje mapovací funkci pro síť programů Abaqus, Nastran, Pam, Dyna a Radioss, ale umožňuje na síť Abaqusu namapovat pouze tloušťku a efektivní plastickou deformaci. Na základě údaje o plastické deformaci si Abaqus sám předefinuje materiálovou charakteristiku. Při mapování do programu Nastran lze také namapovat tloušťku, ale místo efektivní plastické deformace se exportují také materiálové charakteristiky pro jednotlivé oblasti.

4.2 Přenos dat z Pam-Stampu do Abaqusu

Pam-Stamp pracuje s vhodnější sítí než Autoform z hlediska použitelnosti pro výpočty MKP. Přesto je třeba síť upravit, protože obsahuje elementy, které v některých místech nemají společné uzly se sousedními elementy. Pam-Stamp v takovém případě definuje vazbu podobné vazbě té v programu Abaqus, která zajistí návaznost. Pam-Stamp umí namapovat tloušťky i celé tenzory napětí a deformace na jinou síť, ale pouze pokud tato síť bude ve formátu programu Pam-Stamp (*.stl).

Snaha vyhnout se tvorbě skriptu pro namapování výsledků do modelu Abaqusu vedla k pokusu o načtení souboru Pam-Stampu do Pam-Crashe, který načte zmíněný formát (*.stl), z

něj vyexportovat model do nějakého formátu, který umí načíst Ansa, v Anse model editovat a exportovat do Abaqusu, případně uložit a znovu načíst v Pam-Crashe, který by to vyexportoval zpět do (.stl). Z Pam-Crashe však nelze exportovat model přímo do Abaqusu, i když do Nastranu ano. Utilita, kterou v sobě obsahuje Abaqus pro načtení modelu z Pam-Crashe zase nerozpozná všechna klíčová slova potřebná pro přenesení počátečních podmínek.

Prověřil jsem také mapování metodou mesh-to-mesh (klíčové slovo *MAP SOLUTION), které Abaqus používá pro namapování dat z předchozí analýzy. Hlavní ideou je ztransformovat pomocí vlastního skriptu hodnoty z lokálního souřadnicového systému Pam-Stampu do lokálního souřadnicového systému Abaqusu. Tyto hodnoty je možné uložit jako počáteční podmínky a v Abaqusu na původní síti z Pam-Stampu provést pouze výpočet bez zatížení. Abaqus vytvoří výsledný *odb. soubor, ze kterého je možné načíst poslední stav na novou síť. Nevýhoda spočívá v tom, že Abaqus umí realizovat mesh-to-mesh mapování pouze na elementy 3D kontinua, nikoliv na skořepiny. Dalším problémem je skutečnost, že uzly některých sousedních elementů Pam-Stampu, které leží na společné hraně, nemusí být totožné. Následkem mohou být zvýšené odchylky počátečních podmínek při dopočtu rovnovážného stavu v Abaqusu. Přesto ale lze tuto cestu doporučit vyzkoušet v případě, že bude v budoucnu potřeba mapovat parametry po tváření na součásti tvořené 3D elementy.

S ohledem na uvedené nedostatky obou programů jsem vytvořil skript v programovacím jazyce Python *mapovani.py*, který umí namapovat tloušťky, efektivní plastické deformace, tenzory napětí a hlavní směry ortotropie na síť v Abaqusu.

4.3 Postup přenosu dat

Na základě uvedeného byl navržen zevrubný postup přenosu výsledkových parametrů z Pam-Stampu do Abaqusu:

- 1) Načtení sítě z Pam-Stampu do Ansy (lze použít skript *pamstamp2abaqus.py*, který síť uloží do vstupního souboru Abaqusu *.inp – ten lze importovat do Ansy).
- 2) Uložení upraveného modelu z Ansy do *.inp souboru Abaqusu.
- 3) Namapování tloušťky, ekvivalentní plastické deformace, napětí a je-li to nutné také hlavní směry ortotropie pomocí skriptu *mapovani.py*.

5 Počáteční podmínky

5.1 Počáteční tenzor plastické deformace

Výpočet rovnováhy počátečních napětí nezávisí na rozložení počátečních plastických deformací. Výpočet MKP zkušebnímu příkladu ukázal, že počáteční tenzor plastických deformací nemá žádný vliv na výsledné pole napětí a posuvů, výpočet proběhne úplně stejně s jediným rozdílem – hodnoty tenzoru celkové plastické deformace budou vyšší. Z toho lze usoudit, že přenos tenzoru plastické deformace obvykle není nutný a má vliv pouze při posouzení porušení materiálu a šíření trhliny.

5.2 Počáteční ekvivalentní plastická deformace a backstress

Dalším parametrem, který je nutné přenést, je hodnota ekvivalentní plastické deformace. Na základě tohoto parametru si Abaqus v každém bodě upraví materiálovou křivku. Dále lze ještě nadefinovat počáteční backstress, tj. polohu „středu“ plochy plasticity při kinematickém zpevnění. Stejně jako u počátečních hodnot napětí i zde je možné definovat hodnoty v jednotlivých vrstvách skořepiny. Pokud nepoužíváme kinematické zpevnění, jsou všechny hodnoty složek backstressu nulové. Při simulaci tváření střechy, stejně jako defoelementů použitých v testovacích úlohách, byl použit pouze izotropní model materiálového zpevnění.

5.3 Ostatní parametry

Kromě uvedeného je po procesu tváření plechu potřeba přenést do MKP modelu skutečnou tloušťku plechu, kterou lze hodnotami přiřazenými k jednotlivým uzlům.

Válcované plechy, ze kterých se vyrábí součásti karoserie, mohou mít odlišné materiálové vlastnosti v podélném (hlavním) směru válcování a směru k němu kolmém. Tato anizotropie se může projevovat větším počtem nezávislých elastických konstant, nekulovým tvarem plochy plasticity a hodnotou meze pevnosti závisující na orientaci materiálu stejně jako průběh zpevnění. Vzhledem k rozsahu práce a charakteru úlohy nebudou odlišné meze pevnosti a průběhy zpevnění uvažovány.

5.4 Otázka použití kinematického zpevnění

Kinematické zpevnění je nutné použít tam, kde nelze zanedbat vliv tzv. Bauschingerova jevu. Tento jev se projevuje při cyklickém zatěžování při překročení meze kluzu materiálu a závisí na historii zatěžování. Materiál v takovém případě může po změně orientace namáhání začít plastizovat o něco dříve. Kinematické zpevnění se modeluje souborem parametrů označeným jako backstress, což je v podstatě tenzor napětí, který definuje polohu středu plochy plasticity. Při izotropním zpevnění se plocha plasticity zvětšuje, její poloha se ale nemění. Pro přesnější simulaci chování materiálu při cyklickém zatěžování je někdy vhodné použít kombinaci izotropního a kinematického zpevnění.

Ať už lisování v Pam-Stampu proběhne najednou nebo v několika fázích, nedojde k cyklickému zatěžování. Po lisování následuje ořezání a kalibrace. Při těchto operacích se může napjatost v každém bodě ještě hodně změnit. Orientace namáhání každého bodu součásti se při lisování nemění a při ořezání a kalibraci jen výjimečně. Pokud tedy chceme ze simulace v Pam-Stampu získat informaci o výsledném rozložení pole napětí a deformace po tvářecím procesu, aniž bychom model používali k dalším simulacím, pak zcela jistě stačí pouze izotropní zpevnění. Při následné MKP simulaci při zatížení součásti ale může vzniknout nepřesnost kvůli změně orientace napětí. Při simulaci tváření střechy jsou membránová napětí σ_{11} a σ_{22} na většině součásti kladná (tahová), při simulaci střechy při teplotním zatížení vznikají napětí σ_{11} a σ_{22} záporná (tlaková). Střecha má tendenci se rozpínat, což nemůže do stran neomezeně (brání tomu tuhost přilehlých součástí). Pokud nechceme uvažovat kinematické zpevnění, musíme se smířit s tím, že místa na střeše, na kterých dojde při simulaci k plastizaci, ve skutečnosti zplastizují o něco málo dříve (při nižší teplotě) a zplastizovaná oblast bude o něco větší. Kinematické zpevnění bylo pro simulaci teplotního zatížení střechy s ohledem na tuto úvahu zanedbáno.

6 Pomocné skripty v Pythonu

6.1 Algoritmus pro transformaci souřadných systémů

Účelem je získat transformační matici mezi lokálním souřadnicovým systémem Pam-Stampu a Abaqusu $\bar{S}_{pa}$. Pro transformaci musí platit následující maticový vztah:

$$\bar{S}_{gp} \bar{S}_{pa} = \bar{S}_{ga} \quad (6.1)$$

kde index g označuje globální souřadnicový systém a indexy p a a lokální souřadnicový systém Pam-Stampu a Abaqusu. Nejedná se o indexy jednotlivých matic. Transformační matice $\bar{S}_{gp}$ popisuje transformaci mezi globální bází a lokální bází elementu Pam-Stampu, analogicky matice $\bar{S}_{ga}$ transformaci mezi globální bází elementu Abaqusu. Rovnici přepsat následovně:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{j}_p \\ \bar{k}_p \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{j}_a \\ \bar{k}_a \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{j}_p \\ \bar{k}_p \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{j}_a \\ \bar{k}_a \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

kde $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ jsou báze vektory vyjádřené vůči globálnímu souřadnému systému. Po rozepsání jednotlivých rovnic:

$$\begin{aligned} i_{p1}x_1 + j_{p1}x_4 + k_{p1}x_7 &= i_{a1} \\ i_{p1}x_2 + j_{p1}x_5 + k_{p1}x_8 &= j_{a1} \\ &\dots \\ i_{p3}x_3 + j_{p3}x_6 + k_{p3}x_9 &= k_{a3} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Těchto devět rovnic obsahuje devět neznámých x_1 až x_9 a k řešení bylo použito vlastnosti transformačních matic $\bar{S}_{gp}^{-1} = \bar{S}_{gp}^T$. Proto lze přímo vyjádřit $\bar{S}_{pa}$:

$$\bar{S}_{pa} = \bar{S}_{gp}^T \bar{S}_{ga} \quad (6.4)$$

Pro transformaci napětí byl použit vztah pro transformaci tenzorů druhého řádu:

$$\bar{\sigma}_a = \bar{S}_{pa} \bar{\sigma}_p \bar{S}_{pa}^T \quad (6.5)$$

6.2 Algoritmus pro namapování hodnot

Rychlý algoritmus pro namapování hodnot ze sítě Pam-Stampu na síť Abaqusu vypadá následovně:

- vstup uživatele (zadání cest k souborům a parametrů k namapování)
- výpočet dělicího bodu na základě průměrné polohy uzlů Pam-Stampu
- rozdělení prostoru do oktantů rovinami, které prochází dělicím bodem a jsou kolmé na vektory báze lokálního souřadnicového systému
- výše uvedené použito ještě jednou – každý oktant znovu rozdělen -> výsledkem 64 skupin uzlů rozdělených podle polohy

CYKLUS přes všechny elementy sítě v Abaqusu:

- nalezení souřadnice prvního uzlu u_{a1} daného elementu e_a (použito binární vyhledávání)

CYKLUS přes příslušnou skupinu uzlů sítě v Pam-Stampu:

- výpočet vzdálenosti uzlu u_{a1} od uzlu u_p
- pokud menší než předchozí, uložit
- nalezení tří nejbližších uzlů u_{p1}, u_{p2}, u_{p3} ze seznamu k uzlu u_{a1}

END

- nalezení čísla příslušného elementu e_p k uzlu u_p
- nejdříve je hledán element, který obsahuje všechny tři uzly
- pokud ne, pak vybrán element, který obsahuje nejbližší uzel u_{p1}
- pomocí binárního vyhledávání pořadí elementu e_x v seznamu
- hodnoty napětí, ekvivalentní plast. deformace a hlavních ortotropních směrů na elementu e_a odpovídají položkám v seznamu na e_x -tém místě

END

- uložení výsledku do podoby .inp souboru Abaqusu

Přesnější, ale o něco pomalejší algoritmus lze vytvořit tak, aby bral v úvahu tři uzly elementu sítě Abaqusu. Program byl úspěšně otestován na modelu střechy, který měl v Pam-Stampu 54089 elementů a v Abaqusu 31549 elementů. Celý program proběhl během přibližně tří minut. Ukázalo se, že rychlost se díky binárnímu vyhledávání vůči klasickému zlepší jen trochu, což je způsobeno velmi nerovnoměrným očíslováním uzlů. Největší vliv na rychlost skriptu má naopak rozdělení uzlů Pam-Stampu do podskupin podle jejich polohy v prostoru. Původně bez této operace trval skript přibližně šest a půl hodiny. Testy ukázaly, že ani vyhodnocení většího množství podmíněných příkazů není příliš časově náročné. Teoreticky by zrychlení díky rozdělení prostoru do osmi podprostorů (oktantů) mělo urychlit skript přibližně osmkrát. Pokud funkci rozdělení prostoru provedeme na každém podprostoru ještě jednou, rychlost skriptu se zvýší čtyřiašedesátkrát. Funkci rozdělení prostoru tak lze použít tolikrát, aby každý podprostor obsahoval minimálně jeden element.

Tabulka 2. Rychlost skriptu v závislosti na úrovni rozdělení prostoru

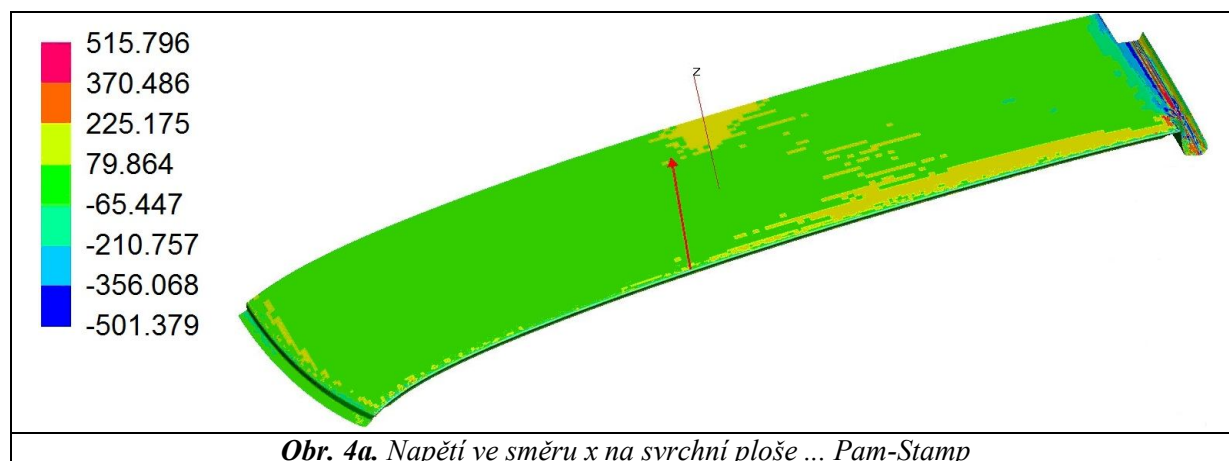
	úroveň rozdělení prostoru x	počet podprostorů	dobu výpočtu skriptu t [min]
naměřené hodnoty	0	1	390
	1	8	56
	2	64	3
odhad	3	512	0,3

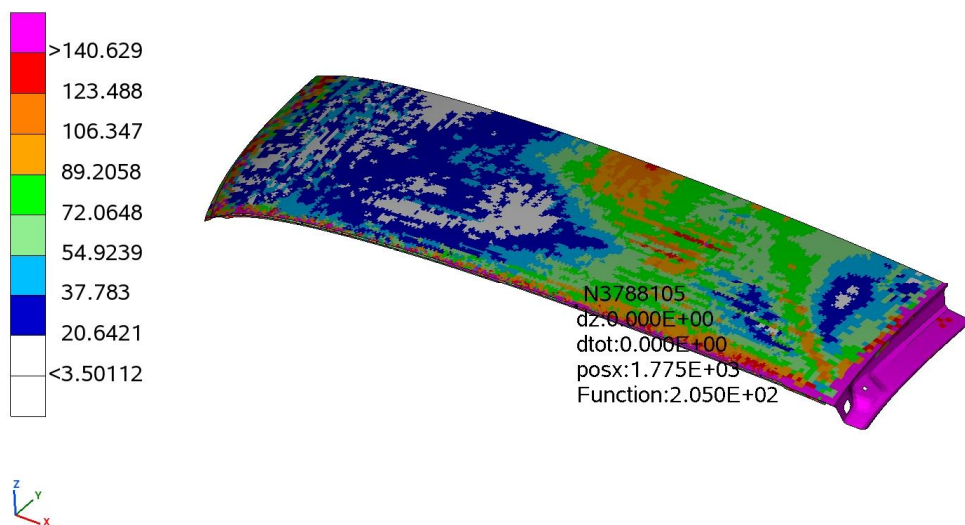
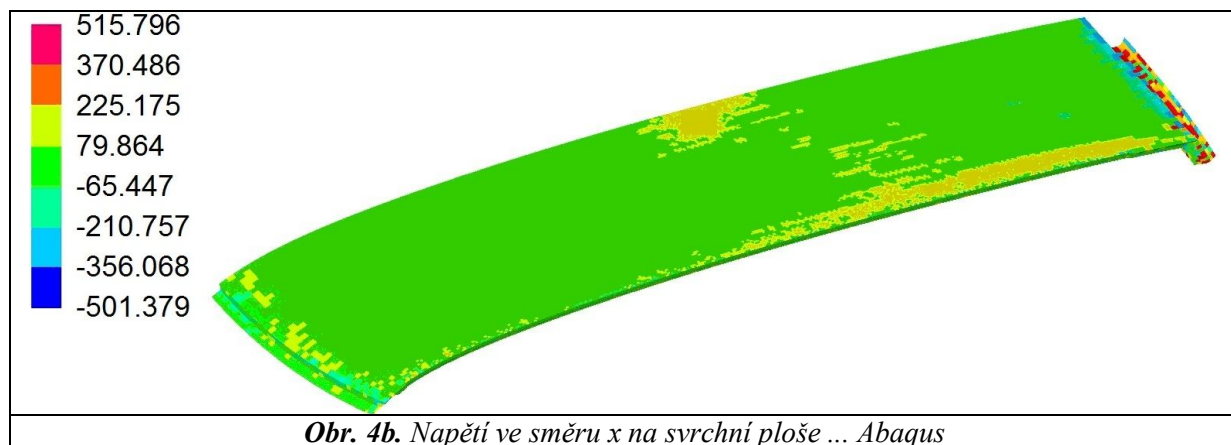
První tři hodnoty byly naměřené na stanici intel quad core 3GHz, 4GB RAM, poslední hodnota je odhad dosažen extrapolací z předchozích hodnot regresní funkcí $f(x) = ae^{bx}$.

6.3 Interface Pam-Stamp / Abaqus

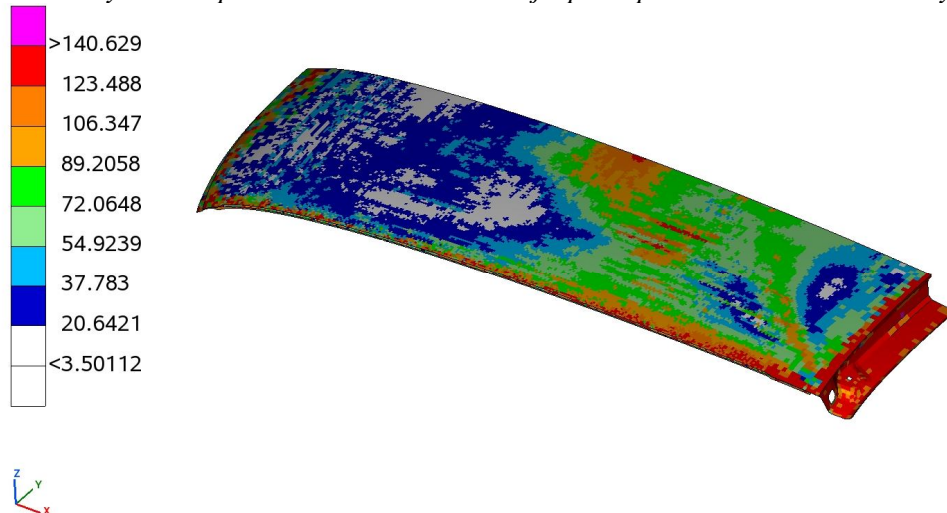
Celý skript *mapovani.py* pro namapování hodnot z Pam-Stampu do Abaqusu se skládá z následujícího sledu operací:

- 1) Vstup uživatele
- 2) Inicializace
 - načtení seznamu uzlů, elementů a mapovaných parametrů ze souboru Pam-Stampu
 - načtení uzlů a elementů ze souboru Abaqusu
- 3) Výpočet báze lokálního souřadného systému pro jednotlivé elementy, viz. kap. 0
- 4) Namapování zvolených parametrů, viz. kap. 0
- 5) Pokud anizotropní materiál, orientace báze elementů sítě Abaqusu podle namapované hodnoty hlavního směru anizotropie
- 6) Výpočet transformační matice mezi bázemi a transformace napětí, viz. kap. 0
- 7) Uložení výsledků





Obr. 5a. Zbytkové napětí HMM na střeše na vnější ploše před dosažením rovnováhy



Obr. 5b. Zbytkové napětí HMM na střeše na vnější ploše po dosažení rovnováhy

Obr. 4 ilustruje rozdíl mezi výsledkovým parametrem namapovaným na síť v Abaqusu a původním výsledkovým parametrem v Pam-Stampu. Je vidět, že na hlavní ploše střechy mapovací algoritmus dává poměrně dobré výsledky. Je to dáno velkou hustotou sítě Abaqusu a menší hustotou sítě Pam-Stampu. Naopak v oblasti lemů byla hustota sítě Abaqusu mnohem menší než v Pam-Stampu, což snížilo kvalitu namapování. Na obr. 5 je vidět namapované

zbytkové maximální napětí HMH v průřezu před a po dosažení rovnováhy. Napětí se významně změní jen v oblasti lemů, na většině plochy střechy se změní jen minimálně.

7.5 Algoritmus pro naprojektování jedné sítě na druhou

Software ANSA umožňuje pouze napromítat existující síť složenou ze skořepinových prvků na určitou geometrii. Při přenosu dat ze sítě Pam-Stampu na síť Abaqusu se ukázalo jako vhodné vytvořit utilitu, která by naprojektovala referenční síť Abaqusu na síť Pam-Stampu. Tím odpadne nutnost ruční tvorby nové sítě nebo nutnost tvorby geometrie na síti Pam-Stampu. Další výhodou „podobnosti“ referenční a deformované sítě je možnost snazšího odhadu vynucených posuvů při výpočtu uložení vypisované součásti do sestavy. Skript pro naprojektování jedné sítě na druhou *posuvy.py* má následující strukturu:

- vstup uživatele (zadání cest k souborům)
- výpočet dělicího bodu na základě průměrné polohy uzlů Pam-Stampu
- rozdělení prostoru do oktantů rovinami, které prochází dělicím bodem a jsou kolmé na vektory báze lokálního souřadnicového systému
- výše uvedené použito ještě jednou – každý oktant znovu rozdělen -> výsledkem 64 skupin uzlů rozdělených podle polohy
- načtení uzlů a elementů

CYKLUS přes všechny uzly sítě v Abaqusu:

- nalezení nejbližšího uzlu u_{p1} k danému uzlu u_a (prohledávání pouze dané skupiny uzlů, které je příslušný uzel u_a nejbližší)
- nalezení elementu Pam-Stampu e_{p1} , který obsahuje uzel u_{p1}
- nalezení ostatních uzlů $u_{p2}, u_{p3}, (u_{p4})$ náležících elementu e_{p1} a načtení jejich souřadnic
- normála elementu e_{p1} je získána vektorovým součinem:

$$n = \frac{(u_{p2} - u_{p1}) \times (u_{p3} - u_{p1})}{|(u_{p2} - u_{p1}) \times (u_{p3} - u_{p1})|}$$

KDYŽ $(u_{p1} - u_a) \cdot n < 0$, POTOM: $x = -1$

JINAK: $x = 1$

- výpočet posuvu uzlů z referenční na novou polohu:

$$a = |\vec{n} \cdot (\vec{u}_a - \vec{u}_{p1})|$$

$$\vec{v} = x a \vec{n}$$

KDYŽ uzel u_a leží na uživatelem vybrané hranici sítě, posuv a je vypočten jako vzdálenost od přímky procházející dvojicí nejbližších hraničních uzlů u_{phr}

END

- uložení posunuté sítě do souboru

Představíme-li si místo sítě, na kterou se projektuje síť referenční, skutečnou geometrii, je zřejmé, že nejvyšší přesnosti projekce bude na relativně rovných plochách. Naopak nejnižší přesnost projekce bude na plochách s nejmenšími poloměry křivosti.

Obdobným způsobem jako skript naprojektování jedné sítě na druhou funguje i skript pro vytvoření okrajových podmínek vynucených posuvů nazvaný *boundary.py*. Rozdíl je v tom, že uživatel na začátku zadává cestu k seznamu uzlů, pro které má být vytvořena okrajová podmínka. Výstupem pak není absolutní poloha uzlů, ale rozdíl poloh uzlů na referenční a zdeformované síti.

8 Výpočty

Při výpočtu úlohy v programu Abaqus úloha přestala zhruba na třiceti procentech zatížení konvergovat. Jako nezbytné se tak ukázalo použití parametru *stabilize*. Tím je do modelu vneseno umělé tlumení, díky čemuž je možné „přeskočit“ kritické oblasti bez nutnosti velkého snížení kroku. Zároveň je ale třeba zkontrolovat, zda disipační energie vzniklá tímto tlumením není příliš velká.

Hlavní faktory ovlivňující konvergenci:

- model podélného svaru
- použití stabilizace faktoru

Výsledky může dále ovlivnit:

- vlastní síť v problémové oblasti (hrubost, rozložení a tvar elementů,...)
- výrobní nepřesnosti (odchyly geometrie, ztenčení, zbytkové pnutí, přetvoření, ...)

Z výsledků výpočtů chceme znát především pole posuvů, a to nejen při zatížení teplotním polem o maximální amplitudě, ale i posuvy po úplném ochlazení. Dále bylo nutné ověřit vliv kvality sítě a uložení modelu na celkové výsledky. Proto bylo výpočtů provedeno několik:

- 1) výpočet při zatížení maximální teplotou
- 2) výpočet při zatížení na 70% teploty a následné ochlazení na původní hodnotu

Dále po odladění úlohy 2) při stejném zatížení byl proveden:

- 1) výpočet na jemnější síti v kritické oblasti
- 2) výpočet s tužším uložením modelu
- 3) výpočet na skutečné geometrii

Výpočet úlohy 1) na osmijádrovém serveru trval přibližně 1,5 hod., výpočet úlohy 2) trval přes 2 hodiny. Teplotní zatížení 70% bylo určeno s ohledem na skutečnost, že dál se propad příliš nemění (úspora výpočtového času). Při ochlazování byl průběh výpočtu mnohem hladší a trval kratší dobu. Důvodem je ztráta stability při zahřívání, která se projevuje jako rychlá změna počítaných veličin v dané oblasti. Abaqus na tuto změnu reagoval významným zmenšením kroku.

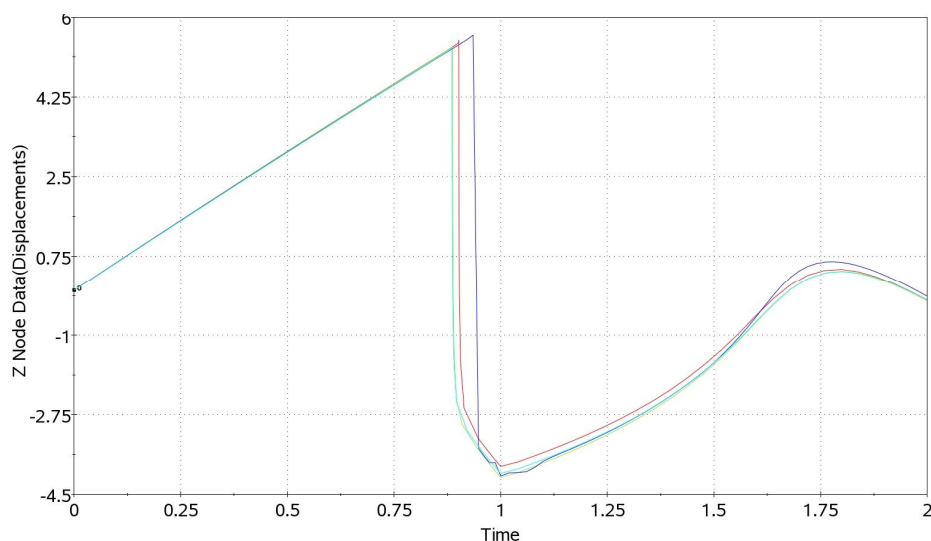
9 Výsledky

9.1 Referenční model bez zahrnutí počátečních podmínek

Úloha 1) probíhala hladce až do cca 40% zatížení, poté začal Abaqus zmenšovat krok. K inicializaci výrazného propadání střechy ve střední části došlo při 63% zatížení. Od 70% zatížení byl propad střechy téměř úplný a s dalším zvyšováním teploty se střecha dále propadala méně výrazně. Poloha a velikost propadu dobře odpovídá skutečnosti. Na obr. 2 je vidět pole magnitud posuvů. Při ohnutí tak může být výškový rozdíl mezi polohou bodu nejhlubšího propadu a polohou okolních bodů mimo propad přibližně 1 cm. V části propadu vzniknou plastické deformace, které se zformují v místě největšího zakřivení plechu (jsou zde největší ohybová napětí). Výpočty v programech Abaqus a Nastran se před a po hlavním kolapsu střechy velmi dobře shodují, průběh kolapsu se trochu liší, což je dáno především pevnou velikostí kroku, která byla nastavena při výpočtu v Nastranu. Také se zřejmě při kolapsu projeví jinak nadefinovaná konvergenční kritéria v Abaqusu a Nastranu. Propad střechy v Abaqusu je tak o něco menší než v Nastranu, během nárůstu teploty se tento rozdíl snižuje, na konci výpočtu je již zanedbatelný.

Úloha 2) umožnila určit, že maximální propad po úplném ochlazení bude větší než 1,5 mm, což bude okem viditelné. Abaqus při výpočtu udržel hodnotu disipované energie v důsledku stabilizace mnohem menší než jsou hodnoty celkové deformační energie. Stabilizace by tedy neměla mít významný vliv na kvalitu výsledků. Ukázalo se, že zjemnění sítě v kritickém místě ani změna uložení modelu nemá významný vliv na výsledný propad. Model vygenerovaný na skutečné geometrii se propadl blíže k zadnímu příčniku, maximální

propad je o něco menší než propad na referenčním modelu (cca 1,2 mm). Plasticke deformace vznikají nepravidelně podél celé hrany střechy. Ukázalo se, že shoda s Nastranem je velice dobrá i v porovnání zbytkových posuvů po ochlazení.



Obr. 6. Srovnání posuvu ve směru osy z bodu minima propadu (červená-původní, zelená-jemnější síť, světle modrá-uložení, tmavě modrá-Nastran)

9.2 Vliv vůle mezi střechou a postranicí na buckling

Výpočet byl proveden ve dvou fázích. Nejdříve byla provedena simulace natlačení střechy mezi postranice pomocí vynucených posuvů na modelu střechy bez podélného svaru. Výsledné napětí a posuvy byly použity jako počáteční podmínka v následné simulaci při teplotním zatížení.

Výpočty prokázaly, že vliv montážní vůle mezi střechou a postranicí na buckling je u SK250 patrný, přesto se ale při jmenovitém teplotním zatížení nepodařilo bucklingu zabránit. Z tabulky 3 je zřejmé, že příznivý vliv má přesah. Při něm dochází při montáži ke vzniku příznivých ohybových napětí a k vyklenutí části střechy podél svaru proti směru propadu. Z důvodu přílišného vyklenutí ale nelze přesah libovolně zvětšovat.

Tabulka 3. Vliv vůle / přesahu na počátek bucklingu

	přesah			ref.	vůle	
hodnota [mm]	0,4	0,2	0,1	0	0,2	0,4
mezni t. [°C]	167,86	140,86	147,07	138,82	117,04	97,02

9.3 Vliv materiálu střechy a tloušťky

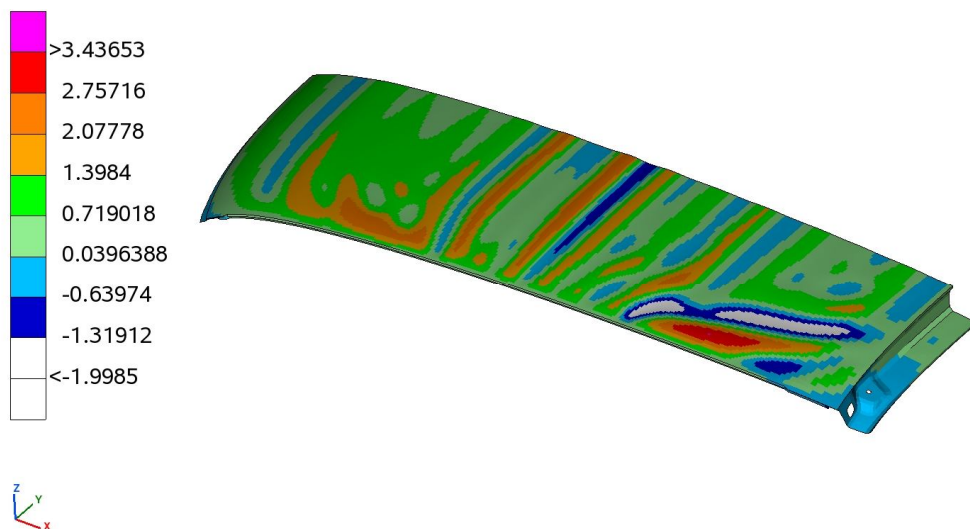
Výpočet s plně lineárním materiálem (bez plasticity) prokázal, že plasticita materiálu má na buckling zanedbatelný vliv. K bucklingu došlo při teplotě střechy 144,7°C, což je jen přibližně o šest stupňů více než u plastického materiálu. Stejně ani namapovaná skutečná tloušťka příliš neovlivnila propad ani deformace.

9.4 Vliv napětí

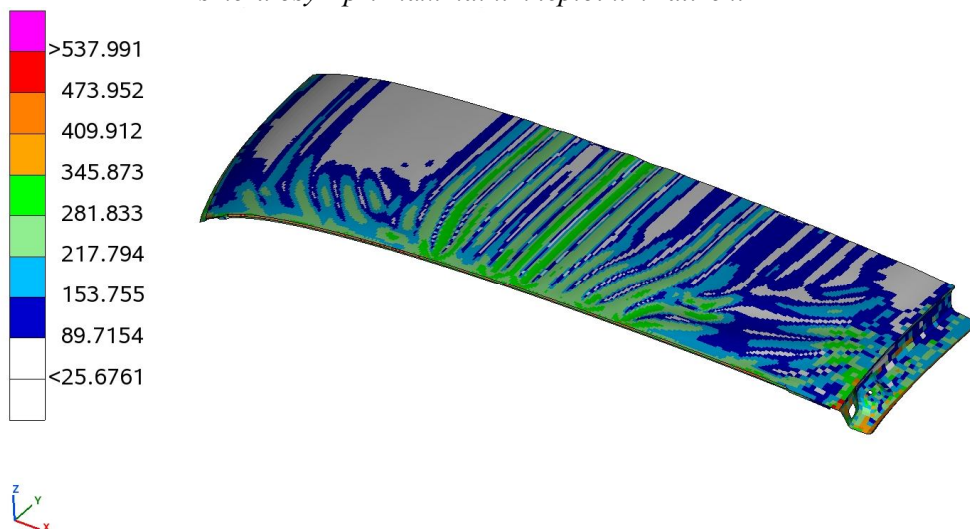
Pro zkoumání zbytkových napětí na deformaci střechy byly provedeny dva výpočty. Oba výpočty byly provedeny ve třech krocích - doiterování rovnováhy, teplotní zatížení, ochlazení na původní teplotu.

První výpočet byl proveden na sestavě se počátečním napětím odpovídajícím stavu bezprostředně po lisování plechu střechy. Přestože propad vznikl o něco později, výsledný propad po odlehčení měl zhruba stejné rozměry i polohu.

Druhý výpočet vzal do úvahy fakt, že po lisování dojde k velkému odpružení na lemech v přední a zadní části střechy, zatímco odpružení na postranních lemech je zanedbatelně malé. Proto byly vybrány uzly předního a zadního lemu a pomocí skriptu *boundary.py* změřena vzdálenost těchto uzlů od referenční sítě a nadefinovány okrajové podmínky. V přípravném výpočtu byla pomocí vynucených posuvů provedena simulace uložení samotného dílu střechy. Výstupem bylo pole napětí, které bylo přeneseno jako počáteční podmínka do sestavy a další kroky byly shodné s prvním výpočtem (výpočet rovnováhy, teplotní zatížení, ochlazení na původní teplotu).



Obr. 7a. Simulace uložení a zatížení střechy bez kalibrovaného předního a zadního prolisu -posuv ve směru osy z při maximálním teplotním zatížení



Obr. 7b. Simulace uložení a zatížení střechy bez kalibrovaného předního a zadního prolisu - maximální napětí HMH v průřezu při maximálním teplotním zatížení

Výpočty prokázaly, že vliv počátečního napětí na buckling je poměrně významný, nicméně spíše z hlediska polohy či doby vzniku propadu. Nalezení takového pole počátečních napětí, při kterém by vůbec k propadu nedošlo, se ukázalo jako velmi komplikované. V prvním výpočtu k propadu došlo, i když o něco později. Druhý výpočet prokázal, že po uložení a dopočítání rovnováhy se zbytková napjatost na sestavě (viz. obr.7b) výrazně liší od zbytkové napjatosti po vylisování na samotném dílu střechy. Druhý výpočet nezkonvergoval v při ochlazování, k bucklingu ale při ohřívání až do maximální teploty nedošlo.

Ve skutečnosti je střecha před montáží k autu kalibrována na jmenovité rozměry. Ukazuje se tak, že úpravou kalibru předního a zadního lemu nebo případným úplným vynecháním kalibrace by mohlo při montáži vznikat pnutí, které by příznivě působilo proti bucklingu a mohlo by zabránit jeho vzniku. Toto řešení by ale vyžadovalo jak změnu kalibru, tak návrh přídržovačů, které by při montáži střechy přitlačovaly k sobě přední a zadní část. Jiným řešením by byla úprava zbytkové napjatosti na střeše pomocí lokálního ochlazení určitých míst na střeše, například míst s maximálním tahovým ekvivalentním napětím.

Závěr

Teoretický rozbor a množství testovacích úloh ukázali vliv jednotlivých výsledkových parametrů z MKP simulace lisování v programu Pam-Stampu na další výpočty statické analýzy v programu Abaqusu. Ukázalo se, že největší vliv má skutečná tloušťka plechu a tenzor zbytkového napětí, z materiálových parametrů pak ekvivalentní plastická deformace a v případě uvažování válcovaných plechů také hlavní směr anizotropie materiálu. Ostatní výsledkové parametry Pam-Stampu jsou nutné pouze při výpočtu lomu.

Byla vytvořena sada skriptů určených pro namapování zmíněných parametrů ze sítě Pam-Stampu na jinou síť v Abaqusu a pro úpravu referenční sítě Abaqusu na tvar po odpružení po lisování a dále skript na vygenerování okrajových podmínek – vynucených posuvů. Všechny skripty jsou dostatečně rychlé na to, aby mohly být bez problému použity i na síť s větším počtem elementů a fungují stejně pod operačním systémem Linux jako pod MS Windows. Skript pro namapování dat je s drobnou úpravou sekvence pro načtení výsledkových parametrů použitelný i pro jakýkoliv jiný MKP program, který umožňuje export výsledků do textového souboru.

Úloha řešení bucklingu na střeše vozu SK250 vyžadovala odladění MKP modelu v Abaqusu tak, aby poloha a doba vzniku propadu co nejlépe odpovídalo skutečnosti, případně simulaci v MKP programu Nastran. To se podařilo zejména díky vhodné volbě modelu podélného svarového spoje mezi střechou a postranicí.

Na referenčním modelu vznikl propad přibližně při změně teploty o 138°C. Výsledkové parametry z Pam-Stampu zahrnuté v počátečních podmínkách simulace nemají příliš velký vliv na kritickou teplotu, při které vzniká propad (zvýšení teploty max. o cca 20°C). Zároveň se ukázalo, že pokud se změnou těchto parametrů podaří kritickou teplotu zvýšit, propad pak proběhne o to rychleji a výsledná zbytková deformace po odlehčení je přibližně stejná.

Další výzkum byl proveden za účelem odhalení vlivu uložení střechy mezi postranicemi vozu, v nejlepším případě (přesah 0,4mm) se ale kritickou teplotu podařilo zvýšit na přibližně 168°C, což stále nestačí.

Nakonec se podařilo najít možné řešení pomocí simulace montáže odpružené střechy po lisování do sestavy. Bez kalibrace střechy po lisování na jmenovité rozměry se při montáži musí přední a zadní lemy více přimáčknout, což způsobí na namontované střeše takovou napjatost, která při ohřívání způsobí zcela odlišnou deformaci střechy. Při simulaci ke ztrátě stability nedošlo ani při požadované teplotě 220°C.

Seznam použité literatury

- [1] HARMS, Daryl; MCDONALD, Kenneth. *Začínáme programovat v jazyce Python*. 2. opravené vydání. Brno : Computer Press, a.s., 2008. 456 s. ISBN 978-80-251-2161-0
- [2] TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. USA : ASM International, 2002. 499 s. ISBN 0-87170-729-2.
- [3] *Abaqus 6.9 Documentation* [online]. 2009 [cit. 2010-11-27]. Abaqus 6.9 Documentation. Dostupné z WWW: <<http://abaqusdoc.ualgary.ca/v6.9/>>.