

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd

Diplomová práce

Návrh hliníkové kapoty
Mercedesu třídy C

BcA. Zuzana Ettlerová

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd

Mechanika
Průmyslový design

Diplomová práce

Návrh hliníkové kapoty Mercedesu třídy C

BcA. Zuzana Ettlerová

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Adámek, Ph.D.
Katedra mechaniky
Fakulta aplikovaných věd, ZČU v Plzni

Konzultant: Ing. Michal Balihar
oddělení výpočtů
MBtech Bohemia s.r.o.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a použila jen uvedených pramenů a literatury.

V Plzni dne 24. května 2013

BcA. Zuzana Ettlerová

Poděkování

V první řadě bych ráda poděkovala panu Ing. Vítězslavu Adámkovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za vstřícný a obětavý přístup, odborné vedení a cenné rady a za trpělivost a podporu.

Velmi také děkuji odbornému konzultantovi panu Ing. Michalu Baliharovi za projevený zájem a ochotu, věnovaný čas a za přínosné poznatky a zkušenosti z praxe.

Poděkování patří také mé rodině a manželovi.

Návrh hliníkové kapoty Mercedesu třídy C

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá návrhem nové konstrukce přední kapoty Mercedesu třídy C z hliníkové slitiny za účelem snížení její hmotnosti. Cílem je vytvořit novou konstrukci dosahující shodných nebo lepších dynamických a tuhostních vlastností v porovnání s původní ocelovou kapotou. Data potřebná pro vypracování této práce byla oficiálně poskytnuta vývojovým centrem společnosti MBtech se sídlem v německém Sindelfingenu.

V rámci návrhu nové kapoty byly nejprve nastíněny současné trendy, technologie a materiály používané v oblasti výroby karoserií. Ve spolupráci s odborným konzultantem byla formulována kritéria pro posouzení mechanických vlastností kapoty s ohledem na požadavky běžně kladené na přední kapoty v automobilovém průmyslu. Následně byly prostřednictvím kritérií analyzovány vlastnosti původní ocelové kapoty. Další část práce byla věnována návrhu nové konstrukce s využitím topologické optimalizace a zpracování výsledků optimalizační úlohy. Pomocí koneč-noprvkového systému MSC.Marc/Mentat, produktů firmy Altair (HyperMesh, Radioss, OptiStruct), systému Matlab a Rhinoceros byly vytvořeny 4 varianty nového návrhu. Po analyzování a modifikaci variant bylo stanoveno nejvhodnější řešení pro novou kapotu z hliníkové slitiny, u kterého byla provedena analýza možnosti promáčknutí pohledového plechu. Novým návrhem se podařilo snížit hmotnost o 37,5 % při současném splnění všech zadaných kritérií.

Design of Mercedes C-class bonnet made of aluminium

Abstract:

This thesis is focused on design of a new structure of the Mercedes C-class front bonnet made from aluminum alloy to reduce weight. The aim is to create a new design with the same or better dynamic and stiffness parameters in comparison with the original steel bonnet. For the purpose of this thesis, original data were provided by computing department of MBtech company based in Sindelfingen, Germany. First part contains summary of the common and new trends, technologies and materials used in the design of the bodyworks. In collaboration with an expert consultant, there are formulated criteria for assessing mechanical attributes with respect to common requirements in automobile industry followed by the analysis of the original steel bonnet design. The next part of this thesis is devoted to the design of new structure using topology optimization and processing the optimization results. By using finite element system MSC.Marc/Mentat, Altair products (HyperMesh, Radioss, OptiStruct), Matlab and Rhinoceros software, four variants of the new design

are created and analyzed and the most appropriate solution for a new aluminium bonnet is found. The new design of bonnet allows weight reduction of 37.5 %, while meeting all specified criteria.

Vorschlag für die aus Aluminium hergestellte Haube Mercedes Klasse C

Abstrakt:

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Vorschlag für die aus Aluminium hergestellte Motorhaube Mercedes Klasse C. Das Ziel ist das Haubengewicht herabzusetzen und neue Konstruktion vorzuschlagen, die die gleichen oder besseren Eigenschaften als bestehende Stahlhaube haben. Die Daten und Unterlagen wurden von der Entwicklungsabteilung MBtech im Sindelfingen zur Verfügung gestellt. Am Anfang wurden gegenwärtige Materialien und Technologien zusammengefasst, die man bei der Herstellung von Karosserien verwendet. Mittels Zusammenarbeit mit dem Fachkonsultanten wurden die Kriterien für die Stiefheit und Modaleigenschaften weiter bestimmt. Nachfolgend wurden die bestehende Stahlhaube und die übereinstimmende Konstruktion aus Aluminium analysiert und verglichen. Der nächste Teil dieser Diplomarbeit hat sich mit dem Vorschlag für die neue Konstruktion beschäftigt. Mittels der Ausnutzung die Gestaltoptimierung wurden 4 Varianten für die Aluminiummotorhaube vorgeschlagen. Die am beste Variante wurde bestimmt und Beulenanalyse der Motorhaube wurde durchgeführt. Der neue Vorschlag hat das niedrigere Gewicht um 37.5 % als Stahlhaube und alle Kriterien wurden erfüllt. In dieser Diplomarbeit wurde das System MSC.Marc/Mentat, HyperMesh/Radioss, OptiStruct, Matlab 2012, und Rhinoceros 4.0. benutzt.

Obsah

1	Úvod	1
2	Současný stav v oblasti návrhu karoserií	3
2.1	Používané materiály	3
2.1.1	Ocel	4
2.1.2	Hliník	4
2.1.3	Hořčík	5
2.1.4	Plast	5
2.2	Povrchové úpravy	5
2.3	Technologie spojování	6
2.3.1	Svařování	6
2.3.2	Klinčování	7
2.3.3	Nýtování	7
2.3.4	Lepení	7
2.3.5	Pájení	8
2.4	Technologie tvarování hliníku	8
2.4.1	Lisování	8
2.4.2	Tlakové lití	8
2.4.3	Taylored blanks	8
2.4.4	Tažené profily	9
2.5	Stávající typy konstrukcí kapot automobilů	9
3	Původní ocelová kapota	12
3.1	Popis konstrukce kapoty	12
3.2	Kriteria hodnocení mechanických vlastností kapoty	13
3.3	Popis výchozího konečnoprvkového modelu kapoty	16
3.4	Analýza modálních a tuhostních vlastností původní kapoty	19
3.4.1	Modální analýza	20
3.4.2	Ohybové namáhání	21
3.4.3	Torzní namáhání	22
4	Návrh nové konstrukce z hliníkové slitiny	24
4.1	Konstrukční předpoklady	24
4.2	Řešení optimalizační úlohy	25
4.2.1	Volba vhodného softwaru	25
4.2.2	Vytvoření modelu v systému HyperMesh/OptiStruct	27
4.3	Výsledky optimalizace	30
4.3.1	Výsledky optimalizace pro jednotlivé zátěžné stavy	31

4.3.2	Výsledky řešení pro všechny zátěžné stavy současně	34
4.4	Vytvoření nové konstrukce na základě výsledků optimalizace	36
4.4.1	Popis postupu vytváření modelu	36
4.4.2	Modifikace prvotního návrhu, výsledná konstrukce	40
4.4.3	Analýza proklapnutí nové kapoty	43
4.5	Porovnání vlastností hliníkové a ocelové kapoty	47
5	Závěr	49
	Přílohy	52

1 Úvod

Každý den uniká do zemské atmosféry velké množství škodlivých látek zhoršujících životní prostředí zejména ve městech. Kromě negativního dopadu na zdraví obyvatel emise ovlivňují i celou planetu a způsobují klimatické změny známé jako globální oteplování, skleníkový efekt apod. Snahou vyspělých států 21. století je tyto nežádoucí změny eliminovat a snížit produkci emisí do ovzduší, např. prostřednictvím emisních norem a nařízení kladených na výrobní podniky, továrny, elektrárny a také na automobilový průmysl. Celosvětově vysoký a neustále rostoucí počet automobilů se odráží ve výrazném množství uvolněných výfukových plynů do ovzduší. Úplného zamezení úniku škodlivých látek nelze docílit, přechod na jiný zdroj (např. elektromobily) zatím není v širším měřítku reálný, a proto se světové automobilky snaží produkci emisí alespoň omezovat. Jednou z možných cest se v posledních letech stává nahrazování "těžké" oceli lehčími materiály. Menší hmotnost vozidla snižuje spotřebu pohonných hmot a tím i množství emisí. Vezme-li se v potaz neustálý růst cen ropy, je snížení spotřeby automobilů i důležitým obchodním bonusem.



(a)

(b)

Obrázek 1.1: Mercedes třídy C

V konstrukci zejména osobních automobilů se zvyšuje procento použití alternativních materiálů nahrazujících ocel, jako např. plasty, kompozitní materiály, hořčík a zejména hliník. Odlehčením konstrukce s využitím hliníku např. u částí karoserie lze ročně uspořit miliardy litrů pohonných hmot, snížit emise CO_2 až o desítky tun a zároveň zachovat automobily na vysoké úrovni bezpečnosti a komfortu, v některém případě dochází dokonce i ke zlepšení jízdních vlastností vozu. Hmotnost součástky vyrobené z hliníku je téměř třikrát menší než hmotnost stejné součástky vyrobené z oceli, nicméně i přes velmi dobrý poměr pevnosti a hmotnosti, je pevnost hliníku omezená a při stejné konstrukci pevnosti oceli nedosahuje. Konstrukci je proto nutné modifikovat, aby bylo docíleno stejných parametrů hliníkové a ocelové kapoty.

Návrh nové hliníkové konstrukce bude předmětem této diplomové práce. Cílem je vytvoření návrhu nové kapoty Mercedesu třídy C (obr. 1.1) vycházející ze stávající

konstrukce ocelové kapoty. První kapitola bude věnována rešerši současných trendů, materiálů a technologií používaných v oblasti výroby karoserií. Následující kapitola se bude zabývat formulací kritérií pro posouzení mechanických vlastností kapoty v souladu se standardními požadavky kladenými na komponenty tohoto druhu, tj. zohledněna budou zejména kritéria týkající se tuhosti a modálních vlastností kapoty. Mechanické vlastnosti budou zkoumány nejprve u stávající konstrukce a také pro původní konstrukci s materiálovými parametry hliníkové slitiny. Získané výsledky poslouží jako limitní hodnoty kritérií pro návrh nového tvaru hliníkové kapoty. Na vytvoření nové konstrukce je zaměřena následující kapitola, kde bude nejprve formulována optimalizační úloha a na základě výsledků topologické optimalizace navrženy 4, oproti reálné kapotě, zjednodušené varianty nového tvarového řešení kapoty. Po analýze vlastností nového návrhu budou provedeny modifikace a zvolena optimální varianta nové konstrukce z hliníkové slitiny. V závěru této kapitoly bude provedena analýza možnosti promáčknutí pohledového plechu nového návrhu. Numerické simulace budou prováděny zejména v systému MSC.Marc/Mentat. Pro potřeby řešení optimalizačních úloh bude využit systém HyperMesh/Radioss/Optistruct, dále Rhinoceros 4.0 a pro zpracování výsledků program Matlab 2012.

2 Současný stav v oblasti návrhu karoserií

Karoserie automobilu tvoří spolu s pohonnou jednotkou nejdůležitější konstrukční prvky vozu. Vývoj nových karoserií vyžaduje skloubení mnoha technických oborů. Při navrhování této části automobilu je nutné kromě konstrukčního, technologického a materiálového hlediska brát zřetel i na ergonomii, bioinženýrství, aerodynamiku, ekonomické a ekologické aspekty. Karoserie zastává např. funkci ochrany řidiče, cestujících a nákladu během provozu, omezení následků nehody i s ohledem na sražené osoby nebo objekty, pohlcení vibrací a hluku. Její účelné tvarování pomáhá k dosažení malého součinitele vzdušného odporu a tím zajištění příznivých jízdních vlastností. Typy karoserií jsou rozlišovány podle účelu a tvaru, a to např. na osobní automobily (sedan, liftback, kupé atd.), autobusy, nákladní automobily, tahače, traktory a ostatní automobily [1].

Druhy karoserií jsou rozdělovány také s ohledem na jejich strukturu a vztah k podvozku (podvozková, polonosná, samonosná). Dříve používaná podvozková karoserie je nesamonosná, upevňuje se na rám podvozku, který pak zachycuje veškeré síly a momenty od hnacího ústrojí, zavěšení kol apod. V dnešní době se podvozková karoserie objevuje výhradně u nákladních automobilů. Oproti tomu polonosná karoserie již dokáže přenášet statické zatížení a dynamické namáhání společně s rámem, ke kterému je pevně, ale rozebíratelně, připojena. Nerozebíratelným spojením karoserie a rámu vzniká samonosná karoserie. Tento druh karoserie je v současnosti nejpoužívanější. Samonosná karoserie plně přebírá nosnou schopnost vozidla, to znamená, že odpadá použití samostatného rámu a podvozku. Hnací ústrojí, nápravy a ostatní komponenty osobního automobilu jsou připevněny přímo na karoserii a její podpůrné konstrukci. Na základní skelet karoserie jsou připevněny i povrchové plechy (např. přivařeny bodovými svary). Výhodou tohoto provedení je odlehčení konstrukce (snížení hmotnosti až o 10 %) a zlepšení jízdních vlastností. Snazší je také možnost automatizace výroby. Na druhou stranu, malé výrobní náklady předchází nutnost vyšší počáteční investice pro zavedení velkosériové produkce.

2.1 Používané materiály

V posledních letech byly v oblasti vývoje osobních automobilů kladeny vysoké nároky mimo jiné na bezpečnost, pohodlí, komfort cestujících a vnitřní vybavenost vozů. Všechny tyto prvky zvyšovaly celkovou hmotnost karoserie. Do budoucna je nutné s ohledem na množství emisí i na případné zavedení elektromotorů hmotnost konstrukce snižovat. Těmto protichůdným trendům je možné vyhovět pouze s novým přístupem v koncepci konstrukce karoserií. Možnou cestou je vývoj zcela nových tvářecích technologií a zavádění lehčích alternativních materiálů. Rozdílným procentuálním podílem jsou už dnes v konstrukci kromě vysokopevnostních ocelí

zastoupeny i hliník, hořčík, kompozity a umělé hmoty [2].

2.1.1 Ocel

Ocel je stále nejvíce používaný materiál na výrobu karoserií. V různých částech karoserie osobních automobilů jsou používány dobře přetvárné hlubokotažné oceli, vysokopevnostní oceli, vícefázové oceli, oceli legované borem a ušlechtilé oceli [3]. Hlavními důvody používání ocelí jsou vysoká pevnost, snadná tvárnost (tažnost), dobrá svařitelnost, možnost spojování pájením, dostatečná životnost při antikorozi úpravě a v neposlední řadě i cena. Ocelové plechy jsou dodávány v tabulích a pásech. Povrch u jakostí určených k lisování je lesklý, v určitých případech žárově zinkovaný pro použití na korozně exponované díly [1]. Největší nevýhodou oceli je její hmotnost.

2.1.2 Hliník

Nejvýznamnějším používaným lehkým kovem na karoserie je hliník a jeho slitiny. Hliník je tvárný kov dobré tažnosti vyznačující se velmi dobrou korozní odolností, která je dána existencí tenké vrstvy Al_2O_3 na povrchu. Největší výhodou hliníku oproti ocelovým plechům je výrazně nižší hmotnost. Čistý hliník má pevnost v tahu kolem 70 MPa, tažnost okolo 30 %. Pevnost čistého hliníku lze však zvýšit legováním, tvářením za studena nebo tepelným zpracováním. Hliníkové slitiny lze rozdělit na vytvrditelné a zpevněné tvářením (pro zpevnění je hliník legován prvky Mg, Mn, Si nebo Fe). Tepelně nezpracované slitiny dosahují meze pevnosti 180 - 350 MPa, tepelně zpracované slitiny od 200 do 430 MPa [4]. Menší tvarová pevnost hliníku oproti oceli má za následek nižší absorpci energie při nárazu, a proto se musí používat plechy o větší tloušťce. To ovlivňuje výslednou úsporu hmotnosti, která se pohybuje jen okolo 30 % (vzhledem k oceli). Třetinové snížení váhy a další přednosti použití hliníku nesou i nepříjemný ekonomický aspekt, kterým je především vysoká cena. Z hliníku jsou vyráběny zejména pohyblivé konstrukční části jako dveře a kapoty osobních automobilů, dále kryty, víka, nosiče nárazníků u zavěšených kol a další části. Samotné tvářením hliníku je pak levnější oproti oceli z důvodu snazší deformovatelnosti hliníkových plechů [2]. Zavedení hliníku do výrobního procesu je navíc snazší než např. u plastů, protože technologické nároky jsou kompatibilní s již existující výrobní infrastrukturou. S ohledem na životní cyklus hliníku je vhodné zmínit také jeho snadnou recyklovatelnost.

Celohliníkové karosérie se v současnosti používají u sportovních a luxusních vozů, autobusů a užitkových vozidel [1]. U ostatních automobilů se používají zatím jen samostatné hliníkové díly karoserie. Tento fakt vnáší problém technologie spojování hliníku s ocelí. Ve spojích je zvýšené nebezpečí vzniku koroze a svařování těchto materiálů je vyloučené. Řešením jsou nové technologie spojování. Hliník je zpracováván také tlakovým litím, např. do vakua, odlitky jsou využívány nejčastěji v oblasti kování a na stavbu skeletu, kde odlévané díly slouží ke spojování tažených profilů. Tvar protlačovaných tažených profilů je navrhován přímo pro jednotlivá použití. Plechy

jsou vyrobeny ze slitin hliníku s obsahem hořčíku, jsou tvářeny lisem a nově se objevuje technologie hydroformingu – tváření kapalinou [3]. Slitiny hliníku a zinku se používají např. na dveřní zámky a mechanismy.

2.1.3 Hořčík

Stále větší vliv při výrobě karosérie má hořčík a jeho slitiny. Hořčík má nižší hustotu než hliník. Díky tomu se použitím hořčíku docílí ještě většího snížení hmotnosti, než je tomu u hliníku. Nevýhodou slitin hořčíku je snížení pevnosti při vyšších teplotách, proto je použití omezeno provozní teplotou pohybující se maximálně kolem 120°C. Hořčík se díky své lehkosti používá jako konstrukční materiál i v letectví. Slitiny hořčíku lze použít na výrobu automobilových karoserií, letadlových trupů a podvozků. Hořčík lze zpracovávat např. tavením, odléváním v ochranné atmosféře či vysokorychlostním obráběním. Tavením je možné vyrábět i složité, tenkostěnné konstrukční díly se sníženou potřebou obrábění.

2.1.4 Plast

Další možností vedoucí ke snížení hmotnosti karoserie je využití plastů. V dnešní době lze naradit celé panely karoserií (kapoty, nárazníky a blatníky) umělými hmotami, které díky své elasticitě zvyšují ochranu chodců a snižují riziko malých poškození. Kromě výhodné nízké hmotnosti plasty nekorodují a disponují dobrými tlumivými vlastnostmi pro eliminaci provozního hluku. Přestože výroba plastických hmot vyžaduje vyšší počáteční investice pro zcela odlišnou výrobní infrastrukturu, přináší následně využití plastů při výrobě a zpracování energetickou úsporu, jelikož je potřeba výrazně nižší teplota ve výrobním procesu plastů oproti oceli. Nevýhodou je obtížná oprava při poškození dílu, špatná absorpce energie při nárazu, křehnutí plastu při nízkých teplotách a oproti kovovým materiálům i nižší pevnost. Pro teplotně dlouhodobě zatěžované oblasti (např. motoru) plasty nedosahují dostatečné odolnosti a bezpečnosti jako ocel, jedinou alternativou pro tyto součásti jsou speciálně vyvinuté polyamidy [5]. Plastové díly se vyrábí hlavně vstřikováním, vakuovým tažením nebo lisováním. Z plastů lze vytvořit i tvarově velmi složité prostorové díly, které by se z kovu vyrobit nedaly. Stále častěji jsou v automobilovém průmyslu využívány plasty obohacené o částice jiných látek nebo vlákna (např. skelná, uhlíková) dosahující lepších vlastností a i odolnost vůči tepelnému stárnutí je u těchto kompozitů větší [5].

2.2 Povrchové úpravy

Povrchové úpravy karoserií jsou velice důležité, protože především odolnost proti korozi je hlavním faktorem životnosti karosérie automobilu. Karoserie jsou podrobeny povrchovým úpravám jako je odmaštění a očištění, nanesení protikorozní

vrstvy, zatěsnění svarů a podvozku, aplikace podkladového plniče, nanesení nátěru v odstínu karoserie a nanesení ochranného bezbarvého laku. Mezi jednotlivými úkony prochází vůz vypalovacími pecemi. V pecích jsou kromě laků zároveň vytvrzovány i lepidla [6].

2.3 Technologie spojování

Jednotlivé díly karoserie jsou ve formě různých profilů a plechů. Při montáži vozů je potřeba spojit díly do jednoho celku. Ke spojování se používají různé technologické metody a postupy. Vzniklý spoj může být rozebíratelný nebo nerozebíratelný. Kovové materiály se nejčastěji spojují nerozebíratelně například svařováním, lepením nebo pájením. Na díly spojené nerozebíratelnými spoji se následně upevňují další díly z plastu nebo kompozitu, které jsou spojeny převážně pomocí rozebíratelných spojů (např. šrouby). Hybridní konstrukce kladou z důvodu rozdílných materiálových vlastností vyšší nároky na spojování. Pokud je část konstrukce vyrobena z hliníkové slitiny a další komponenty z oceli, není k jejich spojení možné využít tavné svařování. Stále častěji se objevují nové metody spojování např. prolisování (tzv. klinčování). Nerozebíratelná spojení jsou získávána také pomocí dutých a polodutých nýtů, dále děrovacími a závity tvářecími šrouby.

2.3.1 Svařování

Nejčastější způsob spojování kovových materiálů je svařování. Možnost svařování materiálů je dána svařitelností neboli schopností materiálu vytvořit svarový spoj. Svařování je proces, kterým vytváříme trvalý nerozebíratelný spoj dvou nebo více materiálů. Na rozdíl od svařování oceli, kdy jsou jednotlivé ocelové komponenty karoserie spojovány např. bodovými svary a v běžné sériové výrobě prováděny automatizovanými linkami, svařování různorodých materiálů odlišného chemického složení vede vždy k určité degradaci materiálů. Svařování hliníku a oceli nelze použít. V případě svařování dvou hliníkových částí je svařitelnost velmi dobrá, avšak pouze při použití svařování elektrickým obloukem v ochranném plynu (WIG, MIG)[8], při kterém je zaručeno rozrušení oxidického filmu na povrchu materiálu. Al_2O_3 má vysokou teplotní stabilitu (teplota tání 2050 °C), nerozpouští se v roztaveném kovu, a proto je nutné ho při svařování hliníku z povrchu odstranit. Hliníkové konstrukční materiály jsou převážně nízkolegované slitiny, jejichž svařitelnost je srovnatelná s čistým technickým hliníkem (obsah Al nad 99 %). I přesto, že oxidickou vrstvu lze mechanickým nebo chemickým způsobem odstranit, při pokojové teplotě vzniká na povrchu materiálu okamžitě nová vrstva Al_2O_3 , což negativně ovlivňuje kvalitu svařeného spoje [7].

2.3.2 Klinčování

Klinčování (clinchng) je metodou spojování plechů do celkové tloušťky 4,5 mm bez použití dodatečných spojovacích prvků, pouze za použití speciálních nástrojů, které spojí plechy k sobě a vytvoří mechanický zámek (obr. 2.1). Klinčovací nástroj je tvořen speciálním razníkem a matricí. Existují dva základní typy matric - s pohyblivými prvky a bez pohyblivých prvků. Při klinčování razník stlačí dvě vrstvy plechu do matrice a vytvoří trvalé nerozebíratelné spojení. Tvar spojení závisí většinou na zvolené kombinaci razníků a matric, výsledné spojení může být kulaté nebo hranaté, s prostřížením nebo bez prostříhu spojovaných plechů. Klinčovací adaptéry na lisech umožňují provést spojení přímo na stroji nebo s pomocí ručního klinčovacího přípravku vytvářet spoje přímo na výrobku. Hlavními výhodami klinčování oproti bodovému sváření je možnost tváření za studena. Materiál spoje tudíž není negativně tepelně ovlivněn. Také po ekologické stránce je tento typ spojování přínosný, při klinčování nedochází oproti bodování ke vzniku výparů nebo jisker. Další výhodou je i možnost spojování lakovaných plechů. Zejména pro hliníkové plechy je klinčování žádoucí, protože zde je využití bodového sváření omezeno kvůli vysoké energetické náročnosti [9].



Obrázek 2.1: *Klinčovaný spoj [9]*

2.3.3 Nýtování

Nýtování slouží k vytváření nerozebíratelných spojů. Dříve byly nýty běžně používány ke spojování veškerých ocelových konstrukcí (mosty, skelety budov, lodě apod.). V oblasti automobilového průmyslu jsou v současnosti nýty využívány ke spojování tenkých plechů. Dřík nýtu se zasune do otvoru spojovaných materiálů, hlava nýtu musí překrývat oblast otvoru v dostatečné míře, následně je vytvořena na druhé straně nýtu kování závěrová hlava. V oblasti karoserií má nýtování výhodu zejména ve špatně dostupných oblastech, kam rameno svařovacího robota nemá přístup. Využití nachází nýty také u hliníkových plechů a jiných problematicky svařitelných materiálů.

2.3.4 Lepení

Lepení je vytváření nerozebíratelných spojů pomocí lepidel. Schopnost lepidla vytvořit spoj je dána adhezí (přilnavostí) k lepeným povrchům a kohezí (soudržnost látky). Adheze a koheze určuje výslednou pevnost lepeného spoje. Výhodou lepených

spojů je, že nedochází k ovlivnění vlastností lepených materiálů v blízkosti spoje, jako tomu je například u svařování. Lepením jsou spojovány například pohledové plechy karoserie, u kterých je nežádoucí jakékoliv narušení celistvosti a hladkosti pohledových ploch jinými způsoby spojování. Měkká kaučuková lepidla mají navíc pozitivní vliv na eliminaci hluku a vibrace konstrukce.

2.3.5 Pájení

Pájením dochází k vytvoření nerozebíratelného spoje. Plochy spojovaných materiálů nejsou při pájení roztaveny a k jejich spojení slouží přídavný materiál s výrazně nižší teplotou tání. Pájení je používáno u tenkých plechů karoserie, kde by mohla velká tepelně ovlivněná oblast po svařování způsobovat negativní deformace.

2.4 Technologie tvarování hliníku

2.4.1 Lisování

Lisování představuje proces, při kterém jsou nastřihávány polotovary z pásu hliníkového plechu a následně lisovány do požadovaného tvaru. Tento proces je relativně levný, rychlý a jednoduchý. Potenciální problém lisování plechů představuje konstantní tloušťka celého dílu. Pro lokální zesílení potřebných částí výlisku je nutné sekundární doplnění přídavných plechů využitím některé z metod spojování.

2.4.2 Tlakové lití

Nevýhodu konstantní tloušťky plechů a obtížnějšího lokálního zesílení může vyřešit použití odlitků. Hliníkové odlitky vyráběné tlakovým litím umožňují tloušťku dílu libovolně měnit přesně podle lokální potřeby, tímto způsobem lze snadno vytvořit i žebra a přitom je zcela eliminována nutnost spojování více dílů. Na druhé straně využití odlitků přináší i značné nevýhody zejména z ekonomického hlediska. Odlévání velkého kusu materiálu si žádá výrobu velké formy, což by bylo spolu s větší spotřebou materiálu velmi drahé, energeticky i časově nákladné a neekologické. Přihlédneme-li i ke skutečnosti, že není technologicky možné odlévat tenkostěnné výrobky, nebylo by ani výsledné snížení hmotnosti výrazné. Proto se v současnosti využívá hliníkových odlitků spíše na výrobu menších lokálních dílů specifických tvarů, které není možné vyrobit lisováním. V tomto případě je opět nutné využít nýtování ke spojení odlitků se zbytkem konstrukce. Nejčastěji se odlitků využívá v konstrukci dveří, blatníků a tlumičů.

2.4.3 Taylored blanks

Méně obvyklou alternativou je také využívání tzv. taylored blanks, plechů dvojitě tloušťky. Z tohoto typu plechu je pak možné vystříhnout nebo vyrazit zpevňující

díly např. pro oblast pantů, nicméně i tato technologie je velice nákladná.

2.4.4 Tažené profily

Levným způsobem pro využití hliníku jsou tažené profily. Proces výroby je velice rychlý a lze zvolit téměř libovolný tvar profilu. Profil lze vytáhnout a následně rozdělit na libovolně dlouhé díly, jejichž konce je možné stlačit pro vytvoření upevňovací plochy. Tuto metodu lze úspěšně využívat například v oblasti dveří, bohužel pro konstrukci kapoty jsou tažené profily nevhodné. Tvar kapoty je popsán přesně definovanými křivkami a tvarování prostorově zakřivených tažených profilů by bylo finančně náročné.

2.5 Stávající typy konstrukcí kapot automobilů

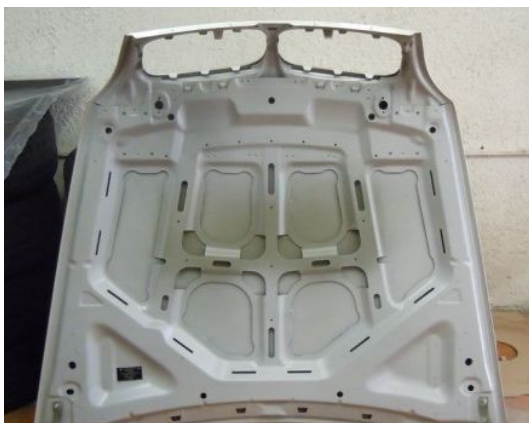
Tvarové řešení předních kapot automobilů se u jednotlivých automobilových výrobců liší. Rozmístění, velikosti a tvary otvorů v konstrukci vnitřních dílů se odvíjí od vnitřního uspořádání kapoty (motor, nasávání atd.). Tvarové rozmístění profilů a žebér předních kapot je pravděpodobně také určitou charakteristikou konstrukčního stylu značky. Obecnou zásadou je snaha o dostatečné podepření pohledového plechu a zároveň použití minimálního množství materiálu, aby nedocházelo k zatěžování konstrukce více, než je nutné. Rozložení výztuh a tvarovaných profilů má zajisté vliv na deformační a absorpční vlastnosti kapoty při nárazu nebo sražení objektu. Z hlediska bezpečnosti hraje velkou roli nejen tvarování, ale také například sklon přední kapoty. Vzhledem k tomu, že v rámci této práce je vycházeno z reálné funkční konstrukce kapoty zasazené do funkčního celku Mercedesu třídy C, v souvislosti s uložením přední kapoty není bezpečnost s designem pohledového plechu uvažována. Na obr. 2.2 jsou znázorněna konstrukční řešení předních kapot pro vybrané značky osobních automobilů. Tvarování vnitřního dílu přední kapoty u modelu Ford Ka (obr. 2.2(a)) je soustředěno do tří hlavních svislých profilů vymezující 4 poměrně rozsáhlé otvory, ve kterých není pohledový plech podepřen. Celkově je konstrukce nesymetrická. Model Volkswagen Passat disponuje symetrickou přední kapotou se dvěma výraznými výztuhami táhnoucími se z přední oblasti zámků do středu směrem k čelnímu sklu vozu. Pravoúhlé tvarování výztuh s šesti symetricky umístěnými čtyřúhelníkovými otvory má kapota automobilu značky BMW, viz obr. 2.2(c). Naopak spíše oválný věncový tvar tvoří tvarované profily přední kapoty Škody Octavia (obr. 2.2(d)). Na obr. 2.2(e) a 2.2(f) jsou zobrazeny kapoty vyrobené z hliníkové slitiny u modelů Audi a Hyundai.



(a) Ford Ka



(b) Volkswagen Passat



(c) BMW



(d) Škoda Octavia



(e) Audi A8



(f) Hyundai Genesis

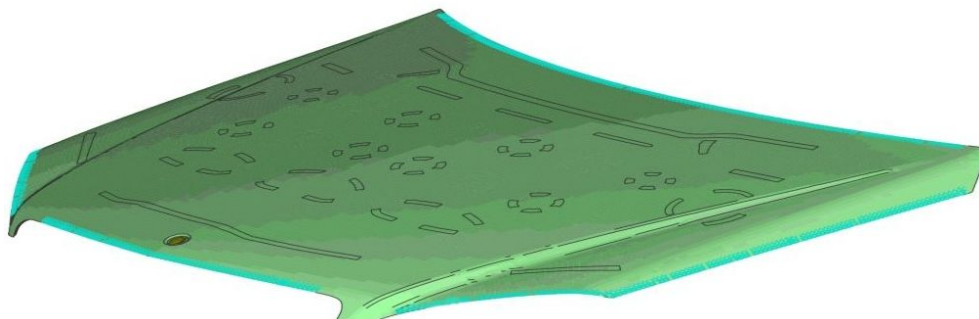
Obrázek 2.2: *Různé typy konstrukčních řešení předních kapot osobních automobilů*

Konstrukce kapoty modelu Audi (obr. 2.2(e)) má na rozdíl od ostatních uváděných modelů strukturu tvořenou rovnoměrně rozloženými konickými prolisy. Tuhost kapoty není soustředěna do jednotlivých výztuh, ale je rozprostřena po celé ploše kapoty. Rovnoměrně tvarovaný vnitřní díl také dostatečně podepírá pohledový plech. Kónické prvky navíc lépe absorbují energii při nárazu objektu do kapoty, což může redukovat rozsah zranění sražených chodců. Pouhé tvarování vnitřního plechu kapoty však nemá na bezpečnost zásadní vliv, tento problém je nutné řešit komplexně kombinací řady prvků aktivní i pasivní bezpečnosti [1]. Provedená řešení ukazuje, že převážná část automobilek využívá "klasickou konstrukci" tvořenou podélnými profily.

3 Původní ocelová kapota

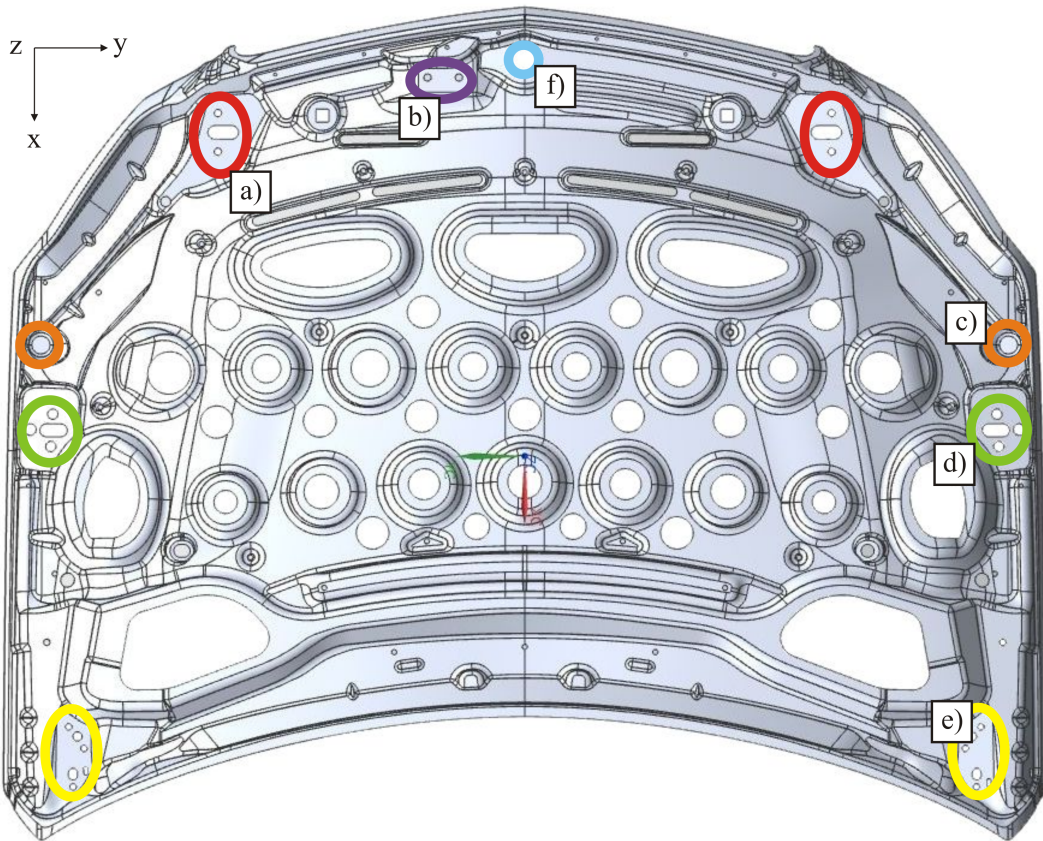
3.1 Popis konstrukce kapoty

Původní konstrukce přední kapoty o rozměrech $1,58 \times 1,09$ m je vyrobená z oceli s materiálovými parametry: hustota $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, modul pružnosti $E = 2,0601 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, Poissonova konstanta $\nu = 0,3$. Hlavní částí kapoty vozu tvoří hladký pohledový plech (obr. 3.1) a vnitřní tvarovaný plech (obr. 3.2). Pohledový plech o tloušťce $0,75 \text{ mm}$ je celistvý a hladký, nesmí mít žádné spoje, k vnitřnímu tvarovanému plechu je připevněn zarolováním hrany. V obvodové hraně je nanášeno tvrdé epoxidové lepidlo, jehož vlastnosti jsou popsány parametry: $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$, $E = 2 \cdot 10^3 \text{ MPa}$, $\nu = 0,4$. Použití lepidla je také jedinou možností pro připevnění pohledového plechu k vnitřnímu tvarovanému plechu. Rovnoměrná struktura vnitřního plechu je tvořena kruhovými a eliptickými otvory, po jejichž obvodu je ve střední části kapoty mezi pohledovým a vnitřním plechem nanášeno velice měkké kaučukové lepidlo ($\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$, $E = 7 \text{ MPa}$, $\nu = 0,49$) chránící navíc obě části od vzájemného dotyku a snižující vibrace a hluk. V přední části kapoty v blízkosti světlometů jsou symetricky od středu umístěny dva zámky kapoty (a). Proti samovolnému otevření kapoty během jízdy je v přední oblasti nesymetricky umístěn jistící hák (b).



Obrázek 3.1: Pohledový plech s vyznačením rozmístění lepidel

V okolí zámků je kapota zesílena přidáním plechem o tloušťce $0,75 \text{ mm}$. Na levé i pravé boční hraně se nachází gumové dorazy (c) a vztlakové podpěry (d) fixující kapotu v otevřené poloze. Tyto oblasti jsou opět lokálně zesíleny přidáním plechem o tloušťce $1,5 \text{ mm}$. Stejně tak jsou zesíleny i levá a pravá oblast pantů (e) umístěných v zadní části kapoty v blízkosti čelního skla a fungujících na principu čtyřkloubového mechanismu (tloušťka přidavných plechů je v tomto případě $1,35 \text{ mm}$). Spojení všech přidavných plechů s vnitřním plechem je realizováno pomocí bodových svarů. Po obvodu prostoru motoru je těsnění oddělující otvory pro nasávání vzduchu do kabiny řidiče. Uprostřed pomyslné linie mezi uchyceními zámků kapoty je umístěn otvor pro připevnění znaku vozu (f).



Obrázek 3.2: Geometrie vnitřního tvarovaného plechu

3.2 Kriteria hodnocení mechanických vlastností kapoty

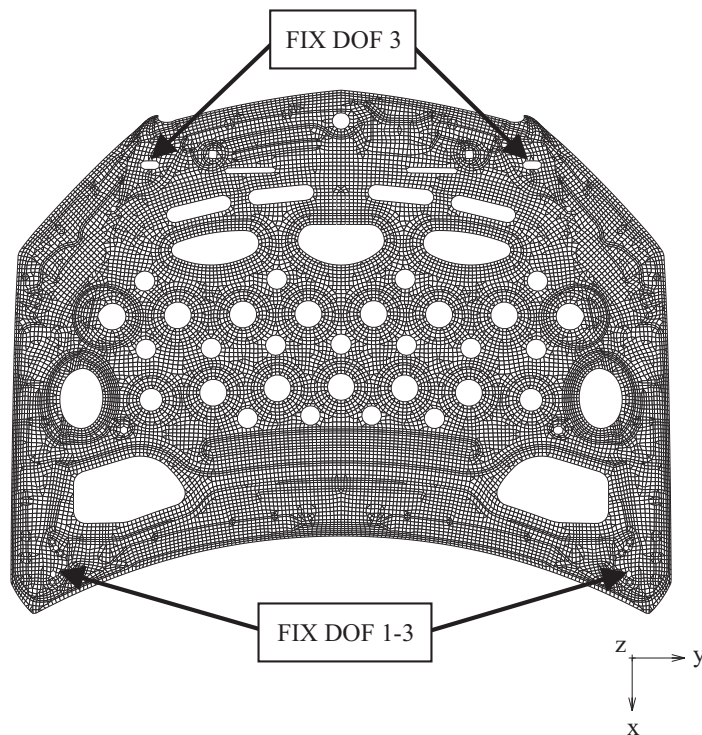
Konstrukce předních kapot automobilů jsou během vývoje podrobovány řadě analýz. Analýzy zaměřené na zkoumání různých vlastností kapoty určují kriteria, která musí nový návrh splňovat. Na základě doporučení odborného konzultanta byla pro návrh nové konstrukce kapoty použita tři základní kriteria:

- kritérium modálních vlastností
- kritérium tuhosti při ohybu
- kritérium tuhosti při torzi

Kritérium modálních vlastností

Kritérium pro posouzení modálních vlastností konstrukce kapoty stanovuje omezení kladená na hodnoty vlastních frekvencí při uvažování zadaných okrajových podmínek. V oblasti uchycení pantů (obr. 3.3) je zamezeno posuvu ve všech směrech

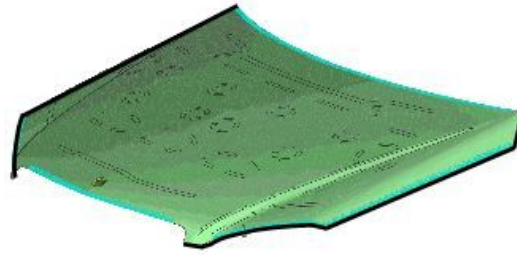
souřadnicových os, pro oblast zámků je dán nulový posuv ve směru osy z . V souvislosti s návrhem nové kapoty má význam uvažovat první tři vlastní frekvence $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$, přičemž je usilováno o zvýšení tuhosti konstrukce, tj. aby Ω_1 byla co nejvyšší.



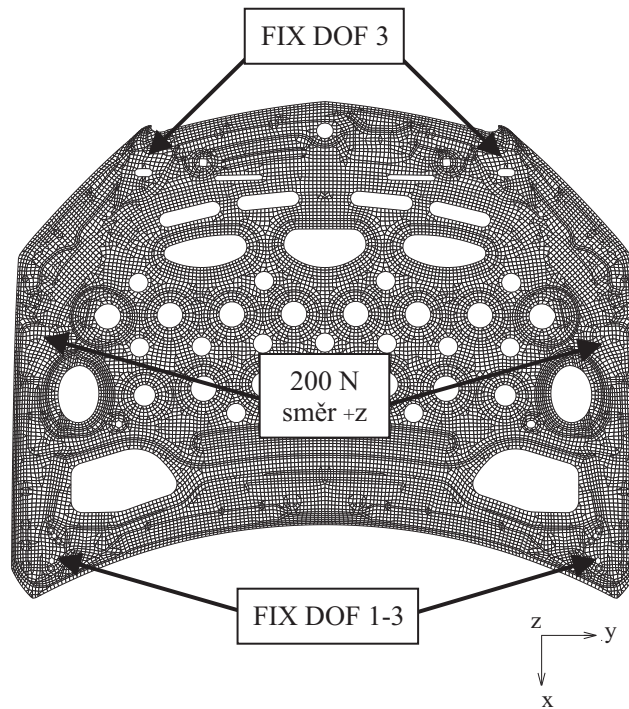
Obrázek 3.3: Znáznornění okrajových podmínek pro kritérium modálních vlastností

Kritérium tuhosti při ohybu

Druhé kritérium slouží k posouzení tuhostních vlastností konstrukce prostřednictvím stanovení přípustných hodnot deformace (posuvů) kapoty při namáhání ohybem. Posuvy ve směru osy z jsou vyhodnocovány podél obou bočních hran kapoty, jak je znázorněno na obr. 3.4(a). Okrajové podmínky v oblasti uchycení pantů a zámků odpovídají předchozímu případu. V oblasti zámků je zamezeno posuvu ve směru osy z a v oblasti pantů jsou povoleny pouze rotace kolem všech souřadnicových os (viz obr. 3.4(b)). Během analýzy deformace je zatěžována oblast držáků vzduchových podpěr dvěma osamělými silami o velikostech 200 N působících v kladném směru osy z . Hodnoty posuvů u_z podél celé hrany jsou v závislosti na x -ových souřadnicích, přičemž $x = 0$ odpovídá pozici přední nápravy automobilu.



(a) Oblasti vyhodnocování posuvů



(b) Okrajové podmínky a zatížení

Obrázek 3.4: Kriterium pro posouzení kapoty při namáhání ohybem

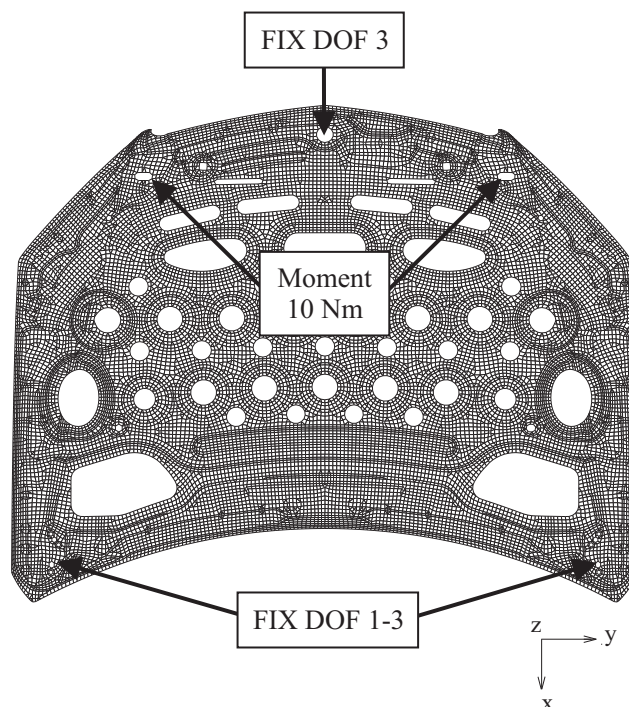
Kriterium tuhosti při torzi

K posouzení tuhosti kapoty slouží i poslední kritérium, v tomto případě pro namáhání konstrukce na torzi. V rámci tohoto kritéria jsou ve shodných vyhodnocovacích místech jako u předchozího kritéria sledovány velikosti normovaných posuvů \bar{u}_z , které jsou stanoveny pomocí vztahu

$$\bar{u}_z = \frac{u_z}{y} \cdot 1000 \text{ [mm/m]}, \quad (3.1)$$

kde u_z je posuv na bočních hranách ve směru osy z a y je souřadnice příslušného bodu. Souřadnice $x = 0$ opět definuje umístění přední nápravy. Stejně jako pro předešlá kritéria jsou i v tomto případě předepsané okrajové podmínky. V oblasti pantů

jsou opět zamezeny veškeré posuvy a ve středu symetrie kapoty v přední linii mezi zámky je v místě uchycení znaku zamezeno posunutí ve směru osy z . Konstrukce kapoty je namáhána momentem $M_x = 10 \text{ Nm}$ působícím v oblasti zámků, viz obr. 3.5.



Obrázek 3.5: Znárodnění okrajových podmínek a zatížení pro kritérium torzního namáhání

3.3 Popis výchozího konečnoprvkového modelu kapoty

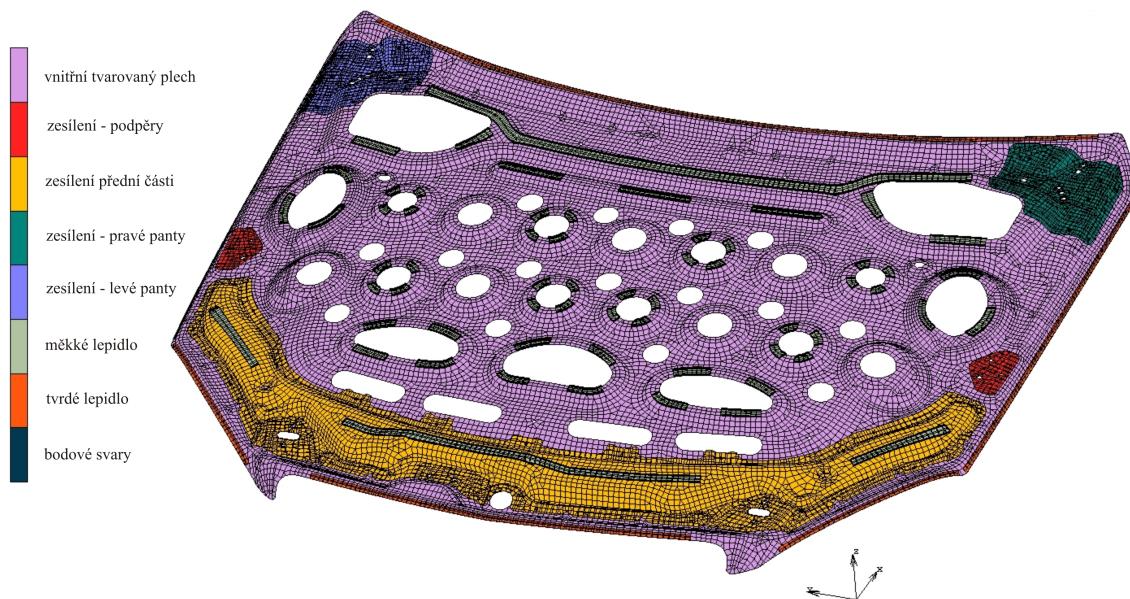
Původní konečnoprvkový model přední kapoty Mercedesu třídy C oficiálně poskytnutý společností MBtech vytvořený v softwaru vyvinutém společností Daimler obsahuje diskretizované plochy všech hlavních součástí konstrukce, což jsou pohledový plech, vnitřní tvarovaný díl, oblasti lokálního zesílení pro panty, zámky a boční podpěry a také prvky měkkého a tvrdého lepidla a bodových svarů. Model je organizován podle geometrických parametrů do skupin odpovídajících výše zmíněnému výčtu součástí, viz obr. 3.6 (pro názornost není plech pohledového plechu zobrazen). Plechy stávajícího návrhu jsou reprezentovány tenkými skořepinovými tříuzlovými a čtyřuzlovými prvky s lineární aproximací posuvů s průměrnou délkou hrany 9 mm. Měkké kaučukové lepidlo oddělující zejména ve střední části kapoty pohledový plech a vnitřní tvarovaný díl je ve výpočtovém modelu modelováno pomocí objemových šesti a osmiuzlových prvků. Uzly konečnoprvkové sítě pohledového plechu odpovídají

ve směru osy z poloze uzlů sítě vnitřního dílu, a je tedy možná přímá vazba solidových a skořepinových prvků. Obdobně reálné spojení plechů pomocí bodových svarů je v modelu simulováno objemovými prvky. V případě svarů však není možné použít přímou vazbu mezi uzly odpovídajících si prvků, protože se sítě v těchto místech neshodují. V tomto případě jsou proto použity prvky RBE3. Každý z osmi vrcholů solidového prvku svaru je provázán pomocí 4 vláken RBE3 na nejbližší čtyřuzlový prvek pohledového nebo vnitřního plechu. Správné rozložení sil ve vazbě zajišťují váhy přiřazené k jednotlivým vláknům, automaticky generované s ohledem na vzdálenost konkrétních uzlů. Pomocí kombinace prvků RBE3 a RBE2 je řešen i spoj pohledového plechu vnitřního dílu a prvků obvodového tvrdého lepidla. S využitím RBE2 prvků jsou síly a reakce přes řídicí uzel přenášeny vazbou rovnoměrně a děleny do všech závislých uzlů rovnocenně, oproti tomu vazba reprezentovaná prvky RBE3 umožňuje nerovnoměrnou distribuci sil. Při nestejně vzdálených závislých uzlech je síla přenášena s odpovídajícím váhovým koeficientem pro každý závislý uzel.

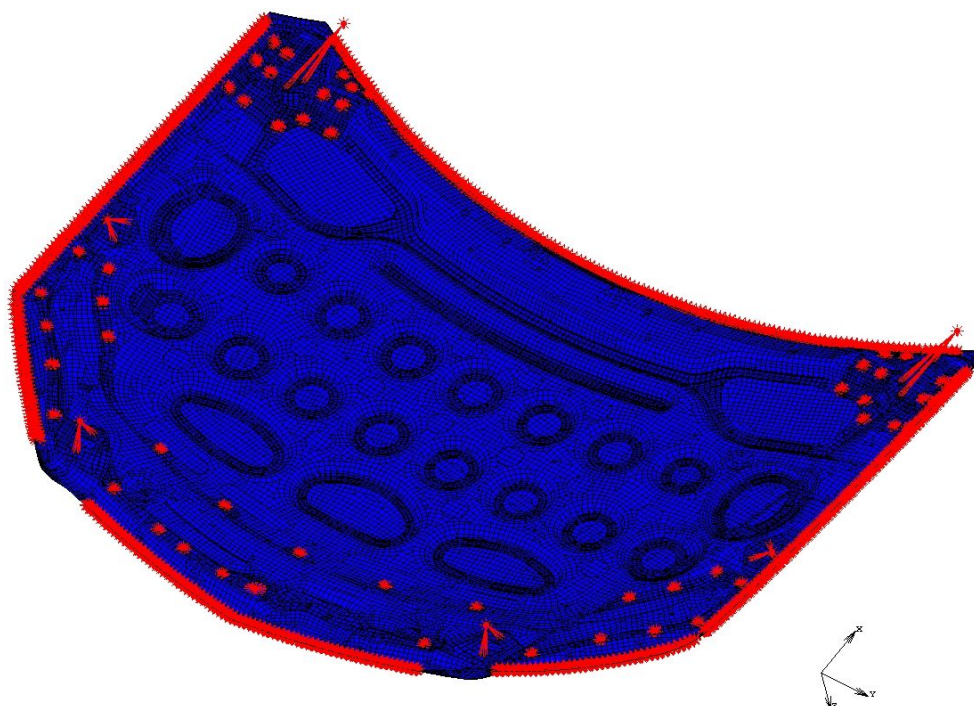
Okrajové podmínky jsou v modelu zadávány do řídicích uzlů RBE2 vazeb spojujících skupiny uzlů odpovídajících reálným otvorům pro připevnění pantů, zámků, vzduchových pístů podpěr a znaku. V řídicích uzlech prvků RBE2 použitých k modelování pantů byly zamezeny posuvy ve všech směrech. Okrajové podmínky v zámcích byly definovány pro případ posouzení modálních vlastností a pro kritérium tuhosti při ohybu zamezením posuvu u_z a obdobně v uzlu středového uchycení znaku byl fixován třetí stupeň volnosti pro kritérium tuhosti při torzi. RBE2 i RBE3 prvky jsou znázorněny červeně na obr. 3.7. Souhrnný přehled typů a počtů elementů jednotlivých výše uvedených částí modelu je uveden v tab. 3.1.

komponent	typ elementů	počet elementů
pohledový plech	3 a 4uzlové skořepinové	19814
vnitřní tvarovaný plech	3 a 4uzlové skořepinové	20286
zesílení v oblasti pantů	3 a 4uzlové skořepinové	1638
zesílení přední části	3 a 4uzlové skořepinové	3405
zesílení v oblasti podpěr	3 a 4uzlové skořepinové	200
měkké lepidlo	6 a 8uzlové objemové	3435
tvrdé lepidlo	6 a 8uzlové objemové	894
bodové svary	6 a 8uzlové objemové	54
	RBE2	2725
	RBE3	3150
celkem		55601

Tabulka 3.1: Shrnutí typů a počtů elementů v konečnoprvkovém modelu



Obrázek 3.6: Jednotlivé komponenty původní ocelové kapoty



Obrázek 3.7: RBE2 a RBE3 prvky v modelu původní ocelové kapoty

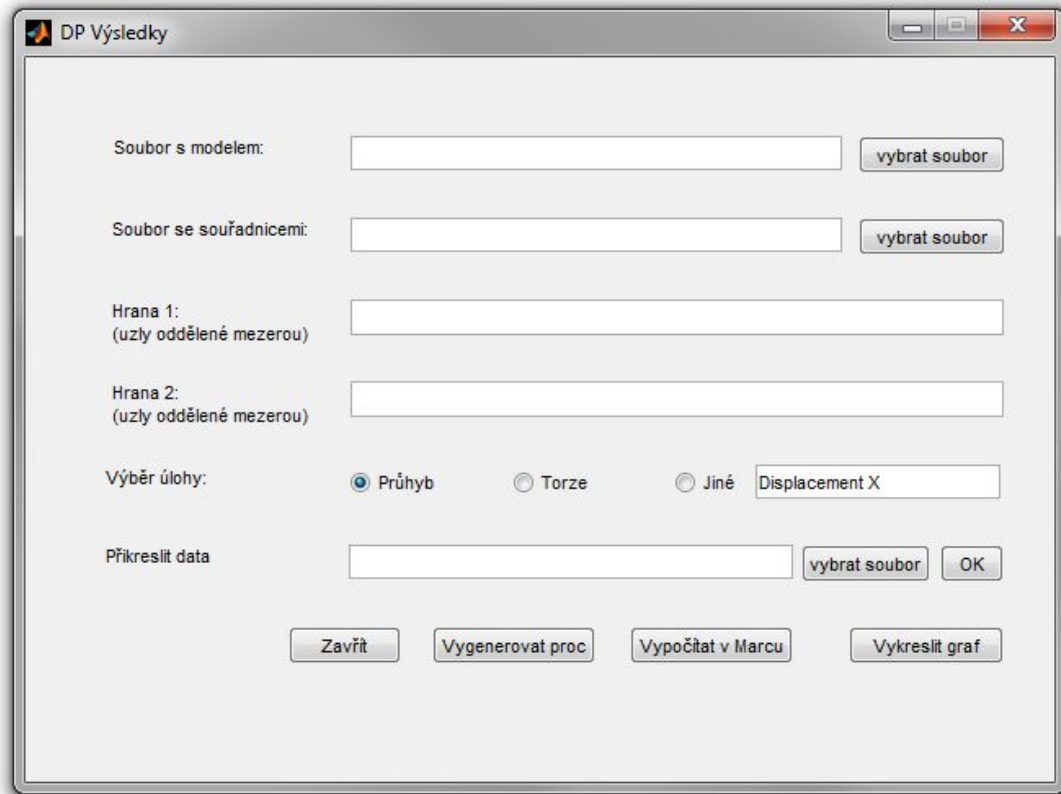
Pro potřeby diplomové práce bylo nutné provést import modelu stávající ocelové kapoty do systému dostupného na Katedře mechanika ZČU v Plzni. Jako vhodný byl zvolen konečnoprvkový software MSC.Marc. Po provedení importu prostřednictvím

formátu **.nas* podporovaným oběma softwary byly upraveny jednotky jednotlivých veličin a zadány okrajové podmínky v souladu se všemi výše formulovanými kritérii. Pro ověření správnosti importu byly provedeny testovací výpočty.

3.4 Analýza modálních a tuhostních vlastností původní kapoty

Tato podkapitola je věnována analýze a vyhodnocení kritérií pro posouzení mechanických vlastností původní ocelové kapoty a tím získání výchozích limitních hodnot pro návrh nové hliníkové konstrukce. V první fázi byla ověřována možnost využití při navrhování nové kapoty přístup spočívající v zachování tvaru konstrukce a nahrazení ocelových dílů hliníkovými plechy o větší tloušťce. Proto byla analyzována původní konstrukce s materiálovými parametry odpovídajícími hliníkovým slitinám používaným pro karoserie (AlMg0,5Si0,8: $\rho = 2850 \text{ kg/m}^3$, $E = 7 \cdot 10^4 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$).

Pro efektivnější získávání výsledků ze softwaru MSC.Marc/Mentat byl vytvořen v prostředí softwaru Matlab 2012 program na zpracování výsledných průběhů posuvu a normovaného posuvu. Vytvořené uživatelské prostředí umožňuje zvolit typ vyhodnocení pro požadované tuhostní kritérium, viz obr. 3.7. Pro vyhodnocování výsledných grafů kritérií jsou použity soubory se simulacemi úloh vypočtených v MSC.Marc. Uživatel zvolí soubor s konečnoprvkovým modelem **.mud*, ve druhém poli je zadáván soubor se souřadnicemi **.dat* vygenerovaný systémem MSC.Marc, ovšem pouze pokud se jedná o případ torzního namáhání. V případě druhého kritéria (volba *Průhyb*, viz obr. 3.8) zůstává druhé pole nevyplněné. Pole označené *Hrana 1* a *Hrana 2* slouží k zadávání čísel uzlů podél vyhodnocované hrany (není nutné vkládat všechny uzly hrany, pouze uzly důležité pro správné fungování funkce *pathplot* systému Mentat [10]). Po zadání všech potřebných vstupních údajů je možné přistoupit ke generování **.proc* souboru. Program pro vyhodnocení výsledků vytvoří na základě vložených dat proceduru předepisující preprocesoru Mentat sled úkonů. Po stisknutí tlačítka *Vypočítat v Marcu* procedura automaticky spustí MSC.Marc a bez nutnosti zásahu uživatele vytvoří "pathplot" v požadovaných uzlech. Data jsou z prostředí preprocesoru uložena do **.txt* souboru, který slouží jako vstupní data pro vykreslení výsledných grafů závislosti posuvu u_z a souřadnici x . Zdrojový kód programu je uveden v Příloze 1.

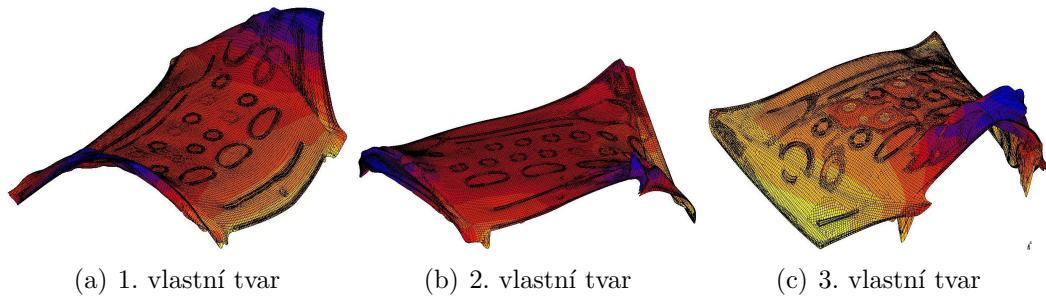


Obrázek 3.8: Program na zpracování výsledků

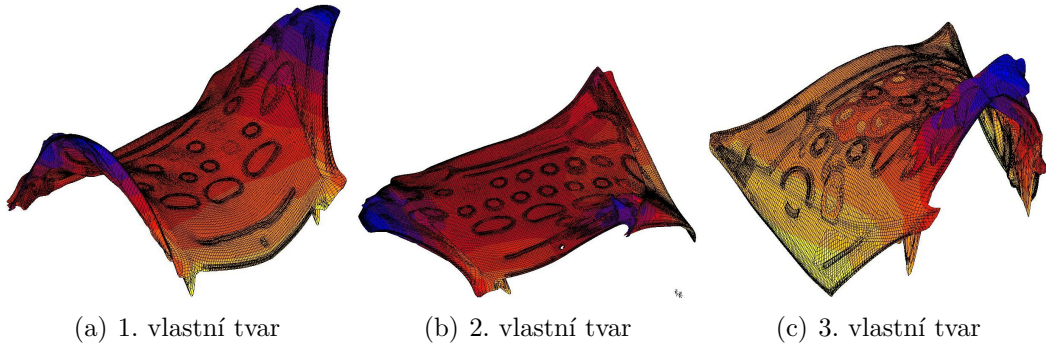
3.4.1 Modální analýza

V importovaném konečnoprvkovém modelu původní kapoty s materiálovými parametry oceli a následně s parametry hliníkové slitiny byly zadány okrajové podmínky odpovídající požadavkům pro kritérium posouzení modálních vlastností. Po provedení modální analýzy byly sledovány vždy první tři vlastní frekvence s využitím metod IPS (Inverse Power Sweep Method) a Lanczos. Z tab. 3.2 porovnání dynamických vlastností je zřejmé, že po změně materiálových parametrů odpovídajících hliníkové slitině nedochází k výraznému snížení prvních tří vlastních frekvencí. Metody IPS a Lanczos vedou k téměř shodným výsledkům. Dále tedy bude modální analýza prováděna pouze prostřednictvím metody Lanczos. Z obr. 3.9 a 3.10 je dále patrné, že vlastní tvary odpovídající jednotlivým vlastním frekvencím mají v případě ocelové a hliníkové kapoty podobný charakter.

	metoda	Ω_1	Ω_2	Ω_3
ocel	Lanczos	2.921e+001	3.027e+001	4.308e+001
ocel	IPS	2.922e+001	3.026e+001	4.308e+001
hliník	Lanczos	2.875e+001	2.973e+001	4.155e+001
hliník	IPS	2.875e+001	2.972e+001	4.155e+001

Tabulka 3.2: Porovnání Ω_1 , Ω_2 , Ω_3 hliníkové a ocelové konstrukce

Obrázek 3.9: Vlastní tvary ocelové konstrukce

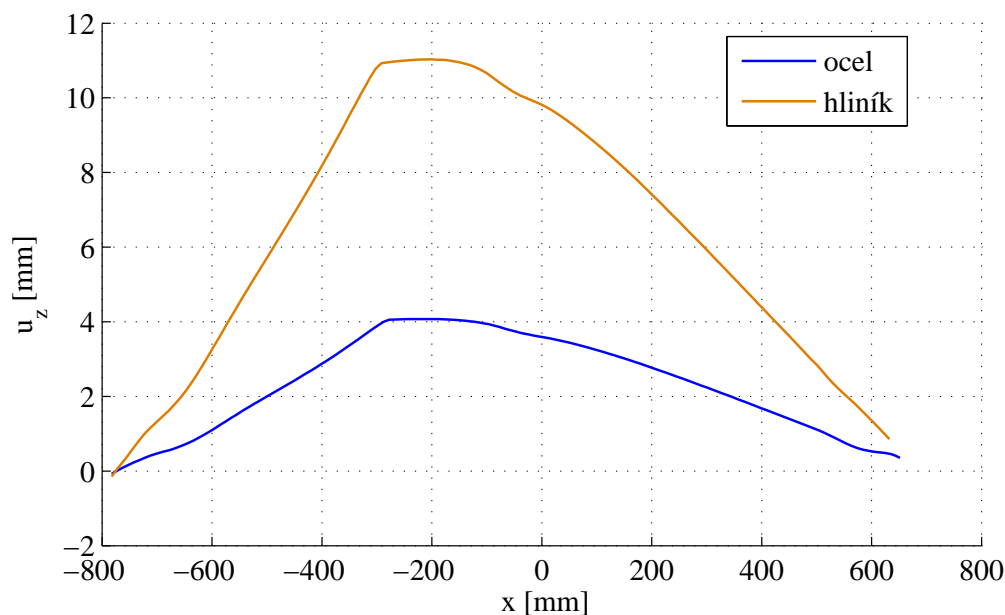


Obrázek 3.10: Vlastní tvary hliníkové konstrukce

3.4.2 Ohybové namáhání

Pro stávající ocelovou konstrukci i pro model se zadaným hliníkovým materiálem byla dále provedena analýza prohnutí bočních hran (obr. 3.4(a)). V souladu s popisem kritéria provedeným v podkapitole 3.4 byly zadány v konečnoprvkovém modelu okrajové podmínky. Po provedení výpočtů byl pomocí programu na zpracování výsledků vykreslen graf závislosti $u_z(x)$. Rozložení posuvů podél pravé vyhodnocovací hrany bylo vykresleno a porováno pro ocelovou i hliníkovou kapotu shodné konstrukce, viz obr. 3.11. Z výsledného grafu je jasně patrné, že změna materiálových parametrů má významně větší vliv na posuvy oproti vlastním frekvencím. Zatímco u původní ocelové kapoty se hodnota maximálního průhybu rovnala 4,033 mm, po změně materiálu bylo dosaženo téměř trojnásobného maximálního po-

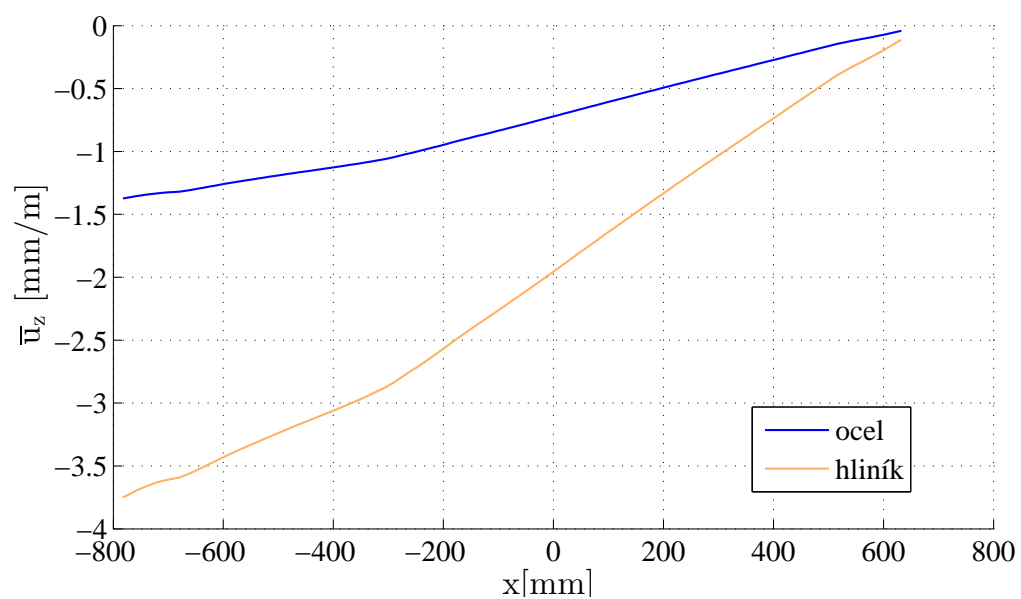
suvu u_z a to 11, 13 mm, což znamená nárůst deformace o 175 %. Rozložení posuvů bylo vyhodnocováno také na levé boční hraně konstrukce (obr. 3.4(a)), přičemž byly získány obdobné hodnoty posuvů. Z důvodu symetrie kapoty i okrajových podmínek budou dále výsledky uváděny pouze pro pravou boční linii kapoty.



Obrázek 3.11: Rozložení posuvů u_z ocelové a hliníkové kapoty

3.4.3 Torzní namáhání

U původní ocelové konstrukce a shodné konstrukce s materiálovými parametry hliníkové slitiny byly posuzovány tuhostní vlastnosti také při torzním namáhání. Okrajové podmínky byly zadány v souladu s popisem definujícím výše zmíněné kritérium (obr. 3.10(a)). Po zatížení konstrukce předepsaným momentem a vyhodnocení výsledků byl pomocí programu na zpracování výsledků opět vykreslen graf pro hliníkovou a ocelovou konstrukci (viz obr. 3.12). Výsledné hodnoty jsou stejně jako v případě druhého kritéria významně vyšší (o 173,8 %) u hliníkové kapoty ($\bar{u}_{z,Al} = -3,833$ mm/m a $\bar{u}_{z,Ocel} = 1,4$ mm/m). Z výše uvedených výsledků vyplývá, že stávající podoba kapoty není optimální pro pouhé nahrazení oceli hliníkem a bude proto zvolen přístup navržení zcela jiné geometrie hliníkové konstrukce.



Obrázek 3.12: Velikost normovaného posuvu \bar{u}_z ocelové a hliníkové kapoty

4 Návrh nové konstrukce z hliníkové slitiny

4.1 Konstrukční předpoklady

V rámci návrhu konstrukce hliníkové kapoty bylo nejprve nutné zvážit možnosti a praktická omezení nového návrhu. Z tohoto důvodu byl postup navrhování a možná úskalí odborně konzultována s pracovníky oddělení konstrukce ve společnosti MBtech, kteří se zabývají návrhem karoserií. Hmotnost hliníkového dílu odpovídá zhruba třetině hmotnosti ocelového dílu. Tento fakt se pozitivně odráží v požadovaném snížení hmotnosti vozů, je však nutné uvažovat i skutečnost výrazně nižší meze pevnosti u hliníkové slitiny oproti oceli. Pro prvotní návrh hliníkové konstrukce se v praxi využívá stanovení tloušťky hliníkových plechů jako 1,5 násobek tloušťky plechů ocelových.

Samotná konstrukce a tvarování vnitřního plechu kapoty se odvíjí od prostorových možností v oblasti motoru. Mezi tvarováním vnitřního plechu a zakrytím motoru je nutné zejména z důvodů zamezení přenosu vibrací vymezit vůli přibližně 2 cm. V tomto rozmezí je již zahrnut i prostor pro budoucí kobercový kryt vnitřního plechu (tzv. Tapezierung), plnící opět zejména funkci odhlučnění motoru a eliminaci vibrací. Základní rovně lisovaný plech nemá dostatečnou tuhost, proto je vhodné vnitřní plech tvarovat do U nebo L profilů. Čím větší výšky profilu je možné docílit, tím tužší je výsledný díl. V tomto konkrétním případě přední kapoty Mercedesu třídy C je celkový možný prostor pro tvarování profilů přibližně 2,5 cm. Na stávající ocelové kapotě jsou kruhové a eliptické prolisy vnitřního plechu, tvořící ve střední části kapoty rovnoměrnou strukturu výztuží podepírající pohledový plech přes vrstvu měkkých lepidel. Také u nového návrhu je žádoucí, aby konstrukce neobsahovala velké volné plochy nepodepřeného pohledového plechu. Vzhledem k tomu, že tloušťka pohledového plechu je 0,6 mm, může snadno dojít k promáčknutí karoserie, porušení laku a ke vzniku trvalých plastických deformací. K nejvíce namáhaným místům vnitřního tvarovaného plechu patří oblasti uchycení pantů a zámků, je tedy vhodné vést tvarový profil právě v této linii, jak už naznačuje prolis zpevňující v této přímce pohledový plech.

Obvodové partie konstrukce vnitřního dílu přední kapoty by měly dále tvořit uzavřený útvar, aby například při zavírání nedocházelo ke zkroucení a zkrřížení kapoty. Vzhledem k tomu, že se po obvodu stávající ocelové konstrukce nachází důležité prvky, jako jsou oblast uchycení pantů, zámků, bočních podpěr, jisticího háku, znaku atd., jejichž pozice je nutné zachovat, bylo po domluvě s odborným konzultantem z oddělení konstrukce zachováno obvodové řešení stávající konstrukce i pro nový hliníkový návrh a pro modifikaci tvaru stanovena jako stěžejní střední část vnitřního dílu kapoty.

V oblasti zpracování a výroby hliníkových prvků konstrukcí existuje několik tech-

nologických postupů (viz podkapitola 2.4), které byly uvažovány jako případně použitelné pro novou hliníkovou kapotu. Jako jedna z nejvhodnějších možností se jevila technologie lisování plechů (viz část 2.4.1) i přesto, že v rámci nového návrhu bude pravděpodobně nutné konstantní tloušťku výlisků doplnit o lokální zesílení. U ocelových konstrukcí, tzn. i v případě původní ocelové kapoty, bylo napojení přídavných výztužných plechů řešeno pomocí bodových svarů. Na rozdíl od ocelových plechů je ale svařování hliníkových plechů komplikované (viz odstavec 2.3.1), proto by bylo pro případ nového návrhu hliníkové konstrukce nutné použít pro připojení doplňkových lokálně zesilujících plechů technologii klinčování nebo nýtování (viz části 2.3.2 a 2.3.3). Využití technologie tlakového lití (viz odstavec 2.4.2) byla pro tento konkrétní případ vyloučena zejména z toho důvodu, že u odlitků není technologicky možné docílit tloušťky srovnatelné s plechy a tím pádem by nedošlo k požadovanému odlehčení konstrukce. Stejně jako lití se pro návrh nové hliníkové kapoty jevila nepřijatelná technologie tažených profilů z důvodu obtížně popsitelné geometrie pohledového plechu a případná nutnost prostorového zakřivení profilů. Použití tzv. taylored blanks nebylo uvažováno s přihlédnutím na ekonomický aspekt a pravděpodobnou nevyužitelnost v praxi.

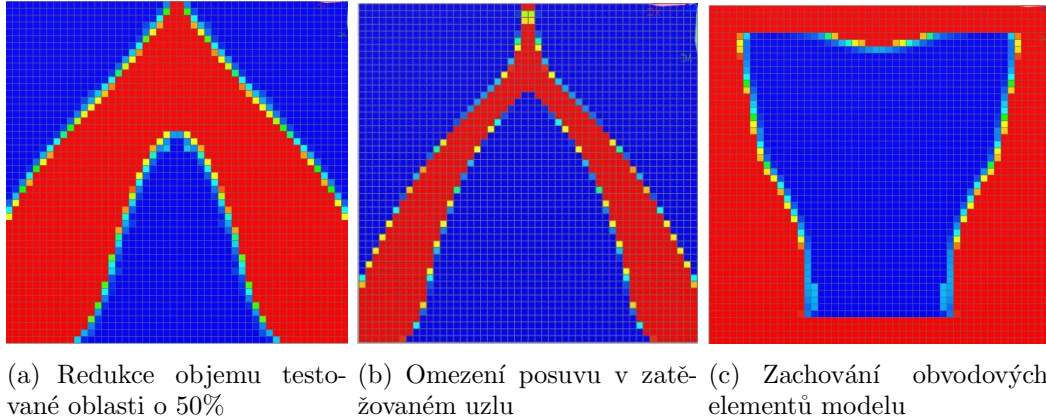
Pro potřeby tohoto návrhu přední kapoty bylo tedy jako technologicky i případně finančně nejvýhodnější lisování plechů. Odlišné tloušťky materiálu a nutnost lokálních zesílení by bylo v tomto případě možné vyřešit i s využitím několika různě silných částí vnitřního dílu kapoty, které se v kritických oblastech (panty, zámky, podpěry) budou překrývat, čímž může dojít k úspoře nýtovaných oblastí. Na hranicích kontaktu dvou plechů je vhodné nanést měkké lepidlo. Nová konstrukce musí dostatečně podepírat pohledový plech a otvory nesmí být příliš velké, aby nedocházelo k promačkávání či proklapnutí pohledového plechu.

4.2 Řešení optimalizační úlohy

4.2.1 Volba vhodného softwaru

Cílem optimalizační úlohy je nalézt funkční a kriteriím vyhovující tvar konstrukce hliníkové kapoty tak, aby její hmotnost byla minimální. Tvarování pohledového plechu zůstane pro kapotu z hliníkové slitiny zachováno a optimalizováno bude rozložení otvorů, výztuh, případně zdvojení vnitřního plechu. Vzhledem ke komplexnosti úlohy a složitosti konstrukce kapoty není možné řešit problém pomocí vlastního programu (kódu) a je nutné k nalezení optimálního tvaru nové kapoty využít profesionální software pro topologickou optimalizaci. Z počátku byla uvažována možnost využití softwaru MSC.Marc [10], následně se však ukázalo, že tento systému umožňuje provádět pouze citlivostní analýzu v případě parametrické optimalizace. Jako vhodnější nástroj se jevil externě dodávaný optimalizační modul konstrukčního balíku NX verze 8.0 společnosti Siemens [11]. Modul disponující mimo parametrické optimalizace možností využití i nástroje topologické optimalizace pomáhá nalézt

optimální tvar a rozložení materiálu v konstrukci, např. vzhledem k tuhosti nebo vlastním frekvencím. Pro ověření možností nastavení topologické optimalizace byly navrženy testovací úlohy odpovídající požadavkům optimalizace konstrukce kapoty.



Obrázek 4.1: Výsledky testovacích úloh topologické optimalizace v prostředí NX 8.0

Byl navržen jednoduchý testovací konečnoprvkový model čtvercové desky o rozměrech 100×100 cm a tloušťce 2 mm, tvořený čtyřuzlovými skořepinovými prvky, ve spodním pravém a levém dolním rohu bylo vždy pět krajních uzlů vetknuto. Ve středu protilehlé strany byla deska zatěžována osamělou silou 100 N. Na obr. 4.1(a) je zobrazen výsledek optimalizace při požadavku zmenšení objemu desky o 50 %. Obr. 4.1(b) znázorňuje výsledek topologické optimalizace pro shodný testovací model při definování limitní přípustné hodnoty posuvu 5 mm v působišti osamělé síly. Ve třetím případě bylo v testovacím modelu požadováno zachování čtyř elementů po obvodu celé desky a opět omezen posuv v zatěžovaném uzlu. Přestože optimalizační úloha zaměřená na redukci objemu testovaného modelu i zachování určitých elementů vedla k dobrým výsledkům, byly již během formulování optimalizační úlohy a následně po provedení testovacích výpočtů zaznamenány nedostatky v možnostech definování úloh. Optimalizační modul systému NX 8.0 například neumožňuje provést analýzu při zatížení modelu bodovou silou zadanou ve více uzlech současně. Dále lze definovat omezení posuvů pouze v zatěžovaných uzlech. Pro návrh nové hliníkové kapoty je však vzhledem k popisu tuhostních kritérií nutné vyhodnocovat rozložení posuvů ve všech uzlech podél celé boční hrany kapoty. Topologická optimalizace v prostředí systému NX 8.0 také nenabízí možnost řešení optimalizační úlohy pro několik zátěžných stavů současně (např. modální analýza, namáhání na ohyb, namáhání na torzi). V rámci návrhu nové hliníkové kapoty s ohledem na požadavek splnění výše zmíněných kritérií nebylo možné v prostředí modulu zadat odpovídající okrajové podmínky. Jak se posléze ukázalo, optimalizační modul se nachází ve fázi vývoje a mnohé funkce, byť uvedené v dostupném manuálu [11], nebyly pro verzi NX 8.0 dosud implementovány. S ohledem na tyto okolnosti nebylo možné optimalizační modul NX 8.0 pro potřeby této diplomové práce využít.

Bylo proto přistoupeno k využití alternativního optimalizačního softwaru OptiStruct, který je možné používat v rámci produktů HyperWorks společnosti Altair spolu s pre- a postprocesorem HyperMesh a řešičem Radioss [12]. Opět pomocí testovacích úloh bylo ověřeno, že tento software je schopen řešit požadovanou optimalizační úlohu hliníkové kapoty i s možností zadání více zátěžných stavů a současně bez omezení počtu působících sil. Pro správnou formulaci optimalizační úlohy byly určeny zásadní předpoklady, cíle a omezení nového návrhu prostřednictvím definování optimalizační oblasti, cílové funkce, stanovení hodnot vymezujících přípustný interval jednotlivých sledovaných parametrů. Optimalizační algoritmus softwaru OptiStruct mění v každé iteraci distribuci materiálu v optimalizované oblasti diskretizované konečnými prvky, dokud není dosaženo minima cílové funkce při zadaných omezeních. V rámci iteračního procesu je využívána metoda postupných lineárních aproximací [12]. Proces optimalizace lze shrnout v následujících krocích:

1. Konečnoprvkový výpočet.
2. Ověření konvergence řešení.
3. Vyšetření parametrů pro aktuální iteraci.
4. Citlivostní analýza optimalizačních parametrů.
5. Optimalizace parametrů s ohledem na výsledky citlivostní analýzy.
6. Opakování procesu s nově navrženými parametry.

V následující části bude popsán postup pro řešení optimalizační úlohy.

4.2.2 Vytvoření modelu v systému HyperMesh/OptiStruct

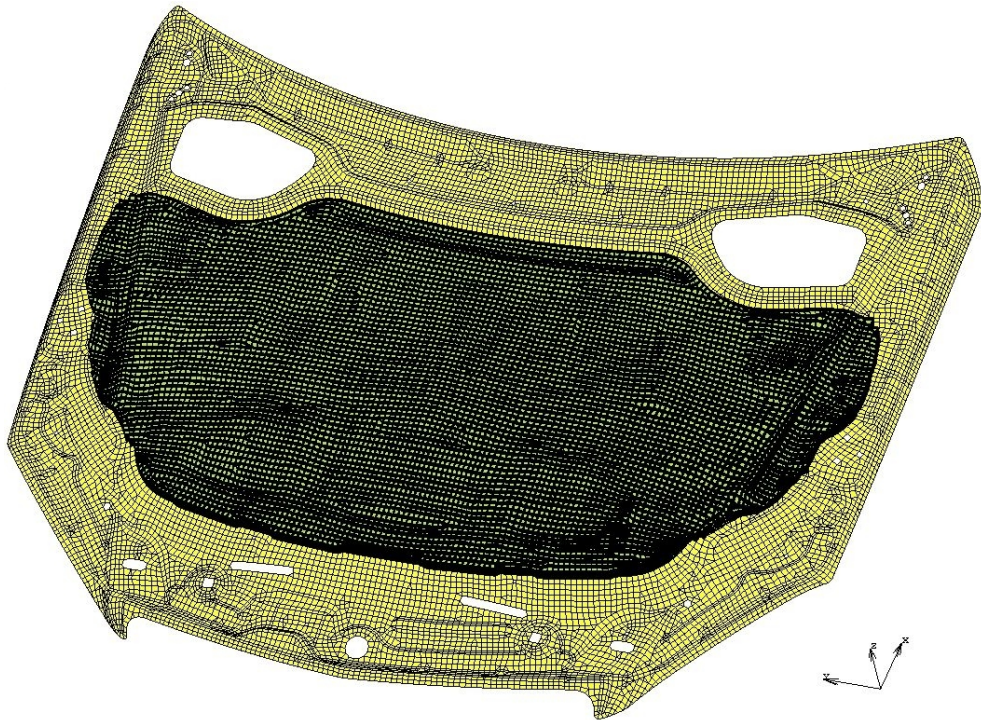
Optimalizovaná oblast

Topologická optimalizace může být provedena pro celou konstrukci nebo pouze pro vybranou část. Jako optimalizovaná oblast (tzv. design area) byla v případě optimalizace přední kapoty s ohledem na konstrukční předpoklady (podkapitola 4.1) zvolena střední část vnitřního dílu tmavě znázorněna na obr. 4.2. Obvodová konstrukce, oblasti uchycení pantů, zámků a podpěr, ve kterých jsou definovány okrajové podmínky pro jednotlivé zátěžné stavy, zůstaly zachovány ve stávající podobě a nebyly tudíž zahrnuty do design area.

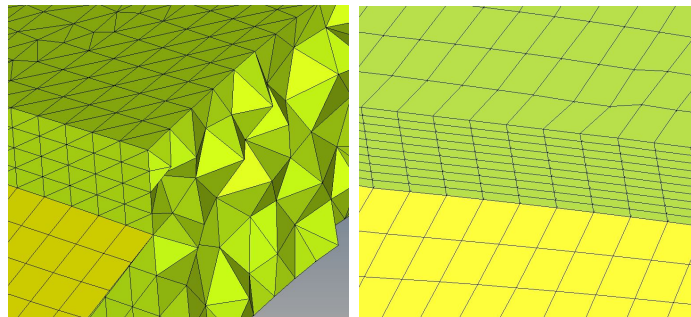
V prostředí konečnoprvkového systému Mentat byl proto původní výpočtový model ocelové kapoty modifikován a veškeré elementy střední části byly odstraněny. Dále bylo potřeba nově vytvořit oblast udávající prostor možné optimalizace. Pokud by byla optimalizovatelná oblast tvořena pouze skořepinovými prvky, jednalo by se o úlohu parametrické optimalizace, jejímž výsledkem by byl "plech" s proměnnou tloušťkou. To by však bylo v rozporu s uvedenými konstrukčními předpoklady (viz

podkapitola 4.1). Pro tvorbu trojrozměrné optimalizované oblasti byly použity dva přístupy. V prvním případě byly pomocí obvodových křivek vzniklého středového otvoru vytaženy hraniční elementy do vzdálenosti 2 cm nad i pod střednici vnitřního plechu. Vznikl tak pomyslný obal optimalizované oblasti tvořený čtyřuzlovými skořepinovými prvky typu 139. Takto modifikovaný model byl importován prostřednictvím formátu *.bdf do softwaru HyperMesh. Pomocí skořepinového povrchu optimalizační oblasti byla s využitím funkce *tetramesh* automaticky vygenerována síť čtyřuzlových prostorových prvků (viz obr. 4.3(a)). Druhý způsob modelování objemu optimalizované oblasti spočíval ve vyplnění vzniklého středového otvoru nově navrženou plochou tvořenou čtyřuzlovými skořepinovými elementy. Plocha čtyřuzlových prvků středu byla poté vytažena směrem k pohledovému plechu a vzniklá 3D oblast následně rozdělena ve směru osy z na 10 vrstev plochých osmiuzlových elementů za účelem simulace lisovaného plechu (viz obr. 4.3(a)).

V souvislosti s importem modelu byla kontrolována přenesená data a jejich shodnost s nastavením v systému MSC.Marc. Materiálové a geometrické parametry byly kontrolovány a zařazeny do odpovídajících skupin. Dále bylo zjištěno, že vlivem importu došlo ke ztrátě validních informací týkajících se definice okrajových podmínek. Oblasti uchycení a zatížení byly proto nově definovány přímo v prostředí HyperMesh a jednotlivým uzlům zadány odpovídající omezení stupňů volnosti a silové účinky. Nalezena byla také odlišnost v definici RBE3 prvků a jejich váhových koeficientů. Po sledu testovacích úloh včetně ověřování výsledků dynamických a tuhostních analýz modelu původní ocelové kapoty však bylo zjištěno, že odlišnosti v procesu zadávání RBE3 prvků nemají vliv a že výsledky analýz provedených v MSC.Marc a v HyperMesh/Radioss byly téměř shodné.



Obrázek 4.2: *Optimalizovaná oblast středu kapoty*



(a) Oblast tvořená 4 uzlo- (b) Oblast tvořená 8 uzlo-
vými prostorovými prvky vými prostorovými prvky

Obrázek 4.3: *Použité přístupy k modelování 3D optimalizované oblasti*

Návrhová proměnná

Řešič OptiStruct řeší problém topologické optimalizace pomocí tzv. hustotové metody SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) [12]. Jakási fiktivní hustota každého elementu konečnoprvkového modelu může nabývat hodnot z intervalu $(0; 1)$. Krajní hodnoty určují, ve kterých oblastech konstrukce je materiál nutně potřebný (1) a kde naopak vůbec nemusí být (0). Hodnoty hustot jednotlivých elementů představují návrhové proměnné měnící se během iteračního procesu ve snaze

nalézt optimální rozložení materiálu současně se splněním daných požadavků. Tuhost materiálu je lineárně závislá na hustotě, tzn. nulová hustota elementů definuje oblasti otvorů a hodnoty v konstrukci v intervalu $(0; 1)$ poukazují na oblasti hodné podpěr a výztuh, což ovlivňuje celkovou tuhost konstrukce.

Optimalizované a optimalizační omezující parametry

V rámci definování optimalizační úlohy se zavádí soubor optimalizačních a optimalizovaných parametrů (responses) dále využívaných k definování cílové funkce a omezujících kritérií. Pro případ optimalizace konstrukce přední kapoty bylo zadáno šest *responses*:

- Optimalizované parametry: objem.
- Omezující parametry: $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, u_z, \bar{u}_z$.

Cílová funkce

Za cílovou funkci, jejíž minimum hledáme, byl zvolen objem konstrukce.

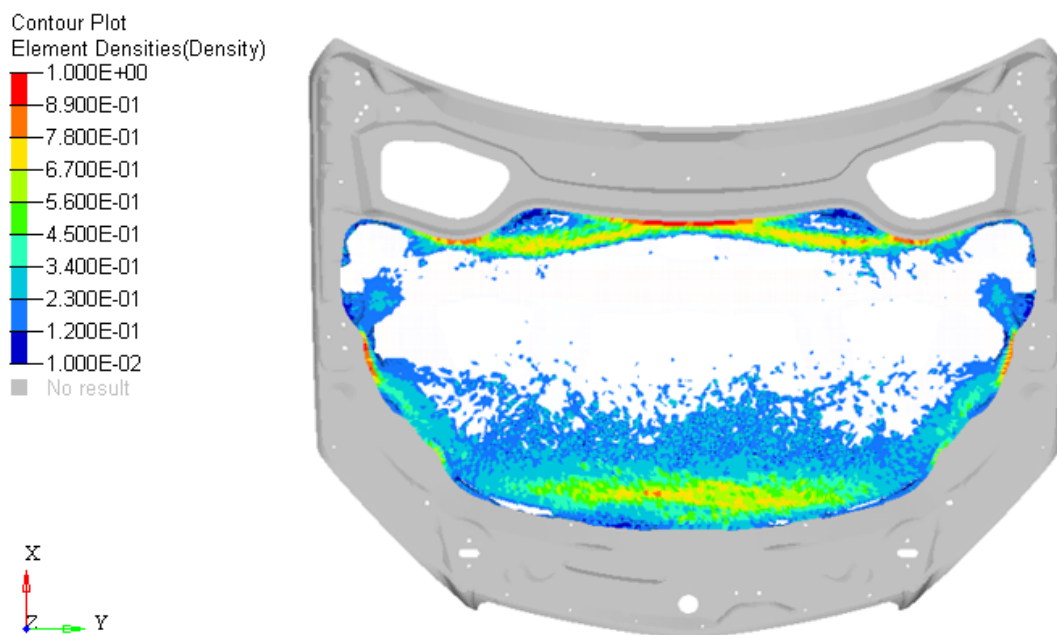
Omezení

Optimalizační omezení určují rozsah přípustných hodnot jednotlivých parametrů. Pro potřeby této diplomové práce vychází optimalizační omezení z požadavků stanovených v rámci charakteristik tří posuzovaných dynamických a tuhostních kritérií, tzn. velikost posuvu u_z , velikost posuvu \bar{u}_z způsobená torzí a hodnoty vlastních frekvencí $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$. S ohledem na požadavky kladené na návrh nové konstrukce byly jako dolní meze jednotlivých omezení stanoveny parametry ocelové kapoty. Se zřetelem na tuhostní kritéria nové konstrukce byla zadána omezení pro ohyb a torzi v liniích odpovídajících oblastem vykreslování křivek grafů, tzn. ve všech uzlech levé i pravé boční hrany. Postup zadání optimalizační úlohy v systému HyperMesh/OptiStruct je shrnut v Příloze 2.

4.3 Výsledky optimalizace

Úloha byla nejprve řešena pro každé kritérium zvlášť a analyzována míra vlivu každého z kritérií na tvarování nového návrhu. Po provedení samostatné optimalizace vzhledem k modálním vlastnostem, maximálním možným hodnotám průhybu a maximálním možným hodnotám torze byly výsledky porovnány a následně konstrukce kapoty optimalizována při zadání všech zátěžných stavů současně. Pro případ přístupu k modelování design area pomocí čtyřuzlových prostorových prvků bylo zjištěno, že tetraedrový tvar jednotlivých objemových prvků vede k výsledkům vhodným spíše pro konstrukci tvořenou odlitky. Jak je patrné na obr. 4.4, hmota konstrukce

je soustředěna po okrajích optimalizované oblasti a to v celcích výrazné tloušťky. Vzhledem ke konstrukčním předpokladům by měla být výsledná konstrukce tvořena tenkými plechy, a proto se ukázalo jako vhodnější využít pro vytvoření středového optimalizačního prostoru ploché osmiuzlové objemové prvky. Takto zadaná oblast napomáhá vhodněji simulovat plechový materiál a ubíráním jednotlivých plochých elementů v průběhu optimalizace je možné následně získat výslednou konstrukci i s potřebným prostorovým tvarováním nové střední části vnitřního plechu. Dále byl proto vyhodnocován pouze model s osmiuzlovými prvky.



Obrázek 4.4: Rozložení materiálu v konstrukci při použití tetraedrových prvků v optimalizované oblasti

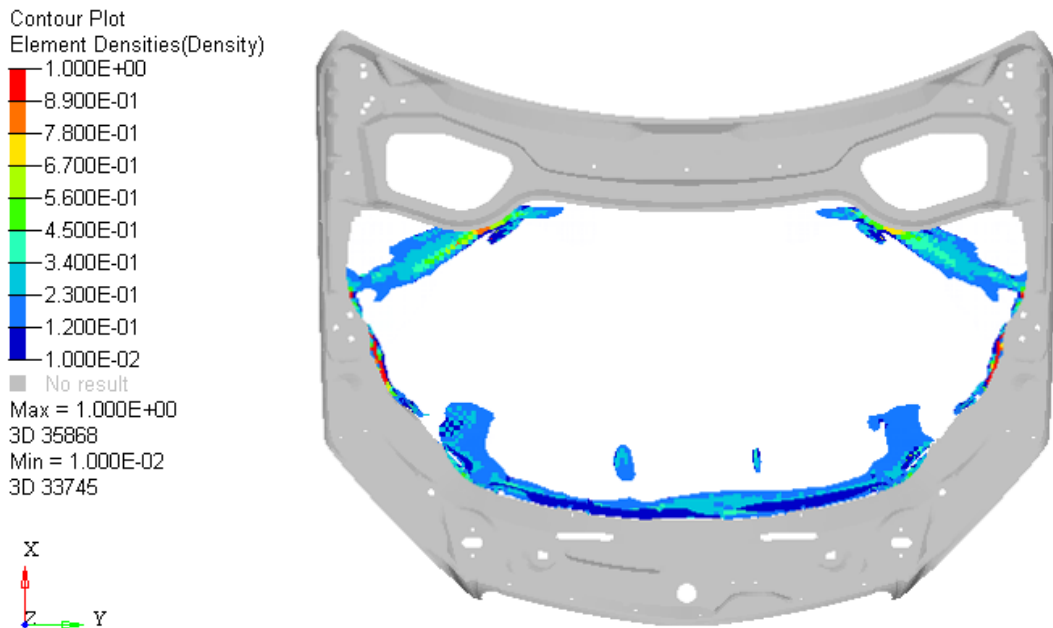
4.3.1 Výsledky optimalizace pro jednotlivé zátěžné stavy¹

Vlastní frekvence

V případě prvního kritéria pro posouzení modálních vlastností byly minimální přípustné hodnoty stanoveny jako $\Omega_1 = 29,21$ Hz, $\Omega_2 = 30,27$ Hz, $\Omega_3 = 43,08$ Hz. Horní mez byla zadána u všech tří vlastních frekvencí 1000 Hz. Okrajové podmínky byly zadány v souladu s definicí prvního kritéria. Po provedení výpočtu bylo vykresleno rozložení materiálu ve střední části kapoty odpovídající design area. Z výsledného obr. 4.5 je zřejmé, že obvodový pás vnitřního plechu je při namáhání značně tuhý a vyztužení by bylo vhodné umístit zejména do přední oblasti zámků a stře-

¹Doba optimalizačního výpočtu pro jeden zátěžný stav byla v průměru 1 hodina a 30 minut na počítači s procesorem Intel Core i5-2410M 2,3 GHz a s pamětí 4 GB RAM.

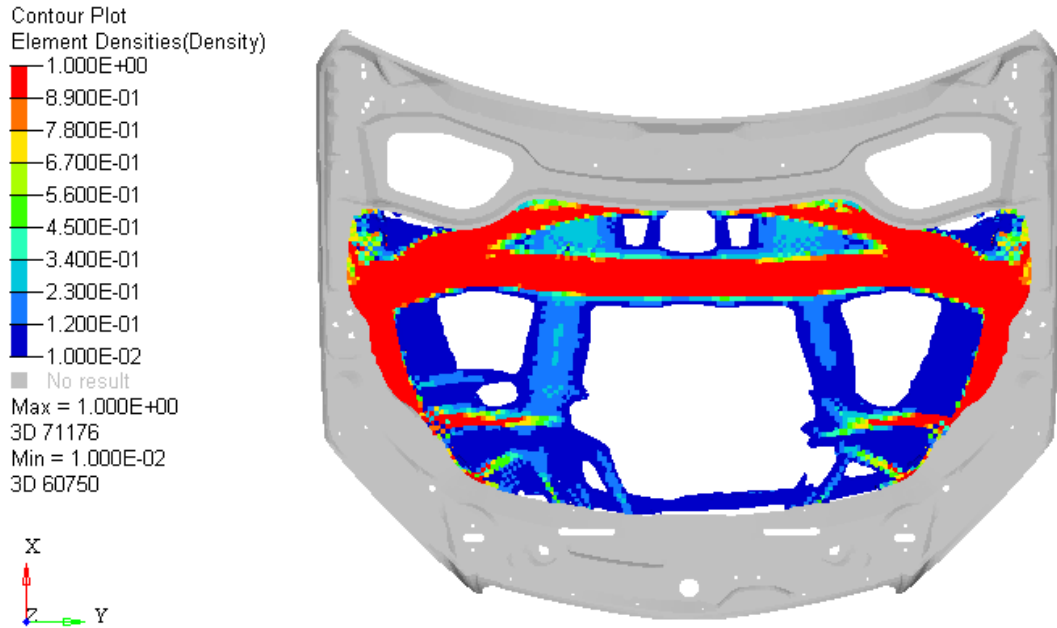
dového znaku. Dále pak doplnit levou i pravou oblast ve směru od uchycení podpěr k otvorům nasávání o symetrické výztuhy. Objem optimalizované oblasti byl výrazně snížen a elementy zejména ve střední části byly zcela eliminovány. V praxi by toto řešení nebylo použitelné z důvodu rozsáhlé nepodepřené oblasti pohledového plechu. Nepodepřený pohledový plech by byl velmi náchylný k promáčknutí.



Obrázek 4.5: Rozložení materiálu v konstrukci po optimalizaci modálních vlastností

Ohybové namáhání

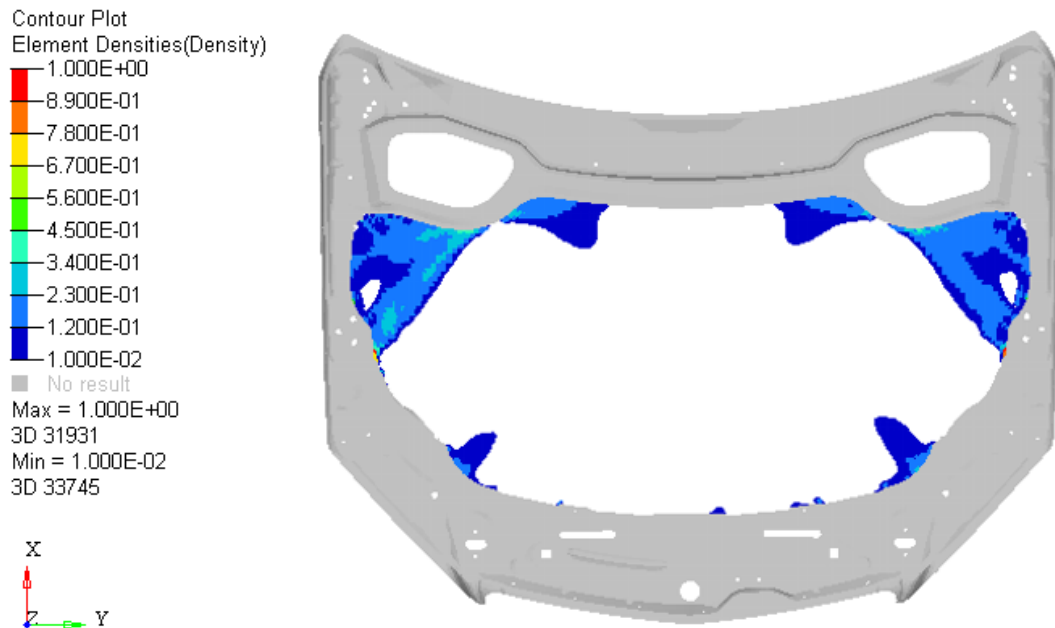
Optimalizační parametry v případě druhého kriteriá byly zadány v souladu s částí 4.2.2 a okrajové podmínky definovány viz obr. 3.2. Horní omezení bylo rovno maximální hodnotě průhybu získané analýzou původní ocelové kapoty, tj. $u_{z,max} = 4,033$ mm, a dolní pak $u_{z,min} = 0$ mm. Přípustná oblast hodnot posuvu u_z byla definována pro všechny body pravé i levé boční hrany. Řešením bylo zjištěno, že toto tuhostní kriterium vyžaduje významně větší podíl materiálu. Z obr. 4.6 je jasně patrná dominantní výztuha táhnoucí se symetricky od oblasti podpěr, kde je zadána zátěžná síla 200 N. Při optimalizaci na ohyb je také možné pozorovat výztuhy symetricky vybíhající do střední části konstrukce. Tento fakt by snížil riziko promáčknutí, avšak objem nebyl redukován tak výrazně jako v případě modálního kriteriá. Převážně v přední části optimalizované oblasti v blízkosti uchycení zámků je patrná stranová nesymetrie v rozložení materiálu. Nesymetrii způsobuje nestředové uložení jisticího háku a mírné odlišnosti ve tvarování levé a pravé přední části původní kapoty.



Obrázek 4.6: Rozložení materiálu v konstrukci po optimalizaci průhybu při ohybovém namáhání

Torzní namáhání

Pro třetí samostatnou optimalizační úlohu byly okrajové podmínky zadány v souladu se specifikacemi tuhostního kriteriá pro namáhání na torzi, viz podkapitola 3.2. Optimalizační omezení byla opět definována ve všech bodech obou bočních hran. Výsledné rozložení materiálu při optimalizaci pro zatížení momentem vykazuje opět značné snížení objemu konstrukce (obr. 4.7), podobně jako při optimalizaci s ohledem na modální vlastnosti. V rozložení materiálu nejsou zcela jasně patrné příčky nebo výztuhy, střední část konstrukce je volná a tvoří nežádoucí rozsáhlou nepodepřenou plochu pohledového plechu. V přední části není v případě torze potřebné zesílení. Významnější oblasti z hlediska fiktivní hustoty elementů se nacházejí symetricky v oblastech od uchycení podpěr k otvorům pro nasávání v neoptimalizované oblasti konstrukce. Z výsledků a přiložené škály hodnot fiktivní hustoty na obr. 4.7 lze usuzovat nevýznamný vliv torze na výsledný tvar optimalizované konstrukce při uvažování všech tří zátěžných stavů.

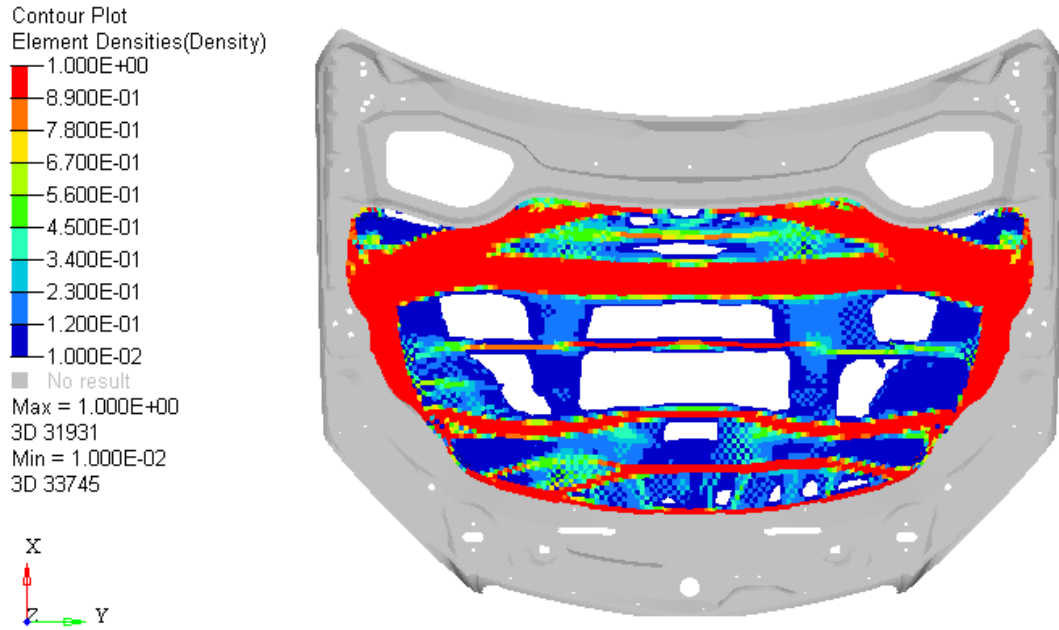


Obrázek 4.7: Rozložení materiálu v konstrukci po optimalizaci při torzním namáhání

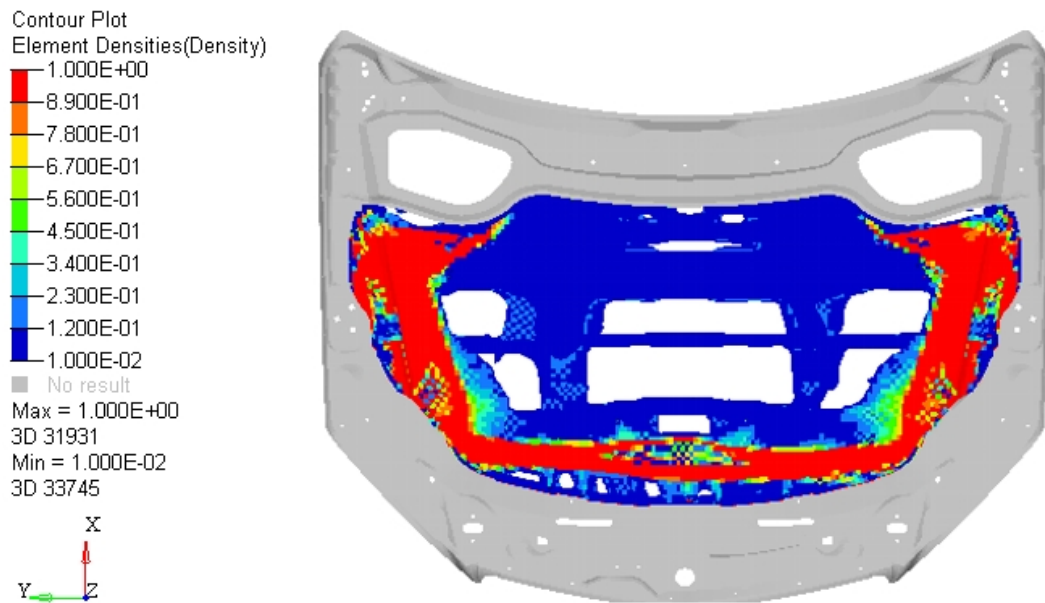
4.3.2 Výsledky řešení pro všechny zátěžné stavy současně²

V případě výpočtu se všemi zátěžnými stavy byl každému ze tří kritérií přiřazen stejný váhový koeficient. Výsledky optimalizace jsou v pohledu zdola znázorněny na obr. 4.8 a v pohledu shora pak na obr. 4.9. Rozložení fiktivní hustoty při pohledu zdola naznačuje významnou příčnou výztuhu mezi oblastmi uchycení podpěr, obdobně jako tomu bylo u optimalizace pro ohybové namáhání. Při současném uvažování všech omezení je výsledné rozložení materiálu rovnoměrnější. Nevzniká nevhodný prázdný prostor ve středu a pohledový plech může být tedy dvěma podélnými a čtyřmi příčnými výztuhami dostatečně podepřen. Maximálních hodnot dosahuje fiktivní hustota elementů také podél bočních stran, zejména v oblasti uchycení podpěr. Jak je patrné i v pohledu shora, boční partie optimalizované oblasti vyžadují materiál i ve vrstvě blíže k pohledovému plechu. Naopak je možné vysledovat absenci materiálu ve střední části ve vrstvách těsně pod pohledovým plechem, což se může negativně projevit na zvýšení rizika promáčknutí kapoty. Vzhledem k tomu, že byla optimalizovaná oblast tvořena plochými solidovými prvky, je možné po vykreslení 3D výsledků odhadovat i potřebné prostorové tvarování plechů.

²Doba optimalizačního výpočtu pro všechny zátěžné stavy současně byla 5 hodin a 7 minut na počítači s procesorem Intel Core i5-2410M 2,3 GHz a s pamětí 4 GB RAM.



Obrázek 4.8: Rozložení materiálu v konstrukci po optimalizaci pro všechny zátěžné stavy (pohled zdola)



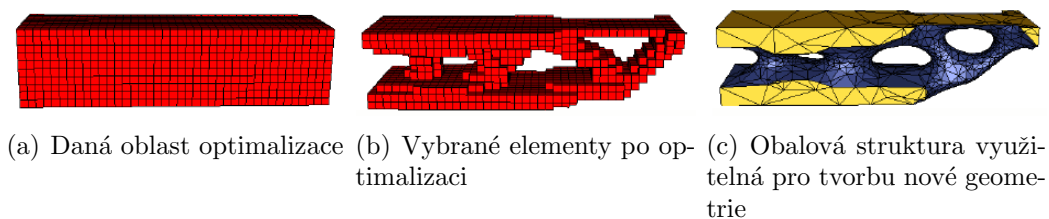
Obrázek 4.9: Rozložení materiálu v konstrukci po optimalizaci pro všechny zátěžné stavy (pohled shora)

4.4 Vytvoření nové konstrukce na základě výsledků optimalizace

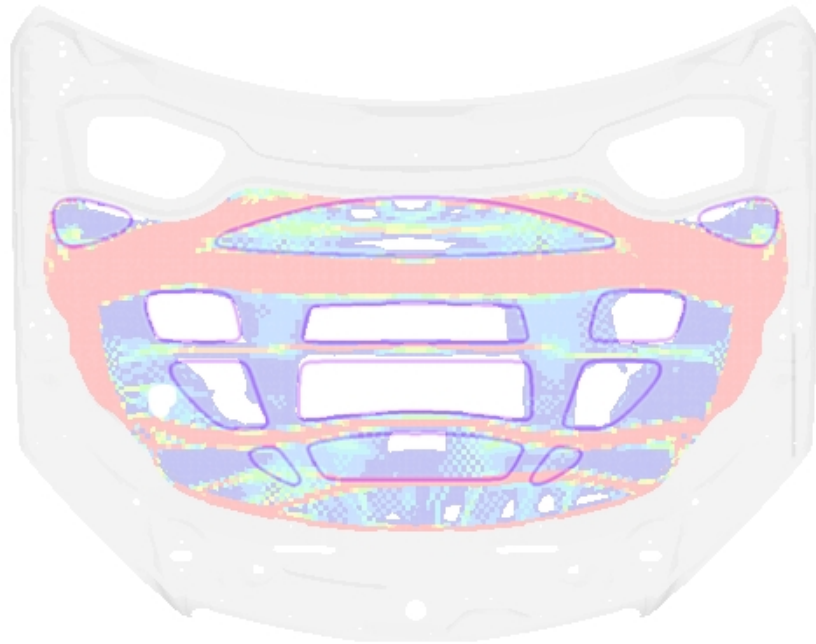
Výsledky optimalizačních úloh jsou zobrazovány v prostředí modulu HyperView. Tento software umožňuje použitím funkce *smooth* [12] vytvořit obalovou plochu optimalizovaných elementů s fiktivní hustotou nad zvolenou mezí. Je tak možné získat základ pro modelování nového tvaru konstrukce importováním obalové plochy do některého CAD systému a modelovat s její pomocí již reálnou geometrii, jak je ukázáno na obr. 4.10. Jak již bylo uvedeno, optimalizovaná oblast byla reprezentována poměrně úzkými 3D prvky, i přesto však nebylo možné výslednou obálku ploch využít přímo pro návrh konstrukce. Proto byly analyzovány výsledky optimalizační úlohy pro všechna posuzovaná kritéria současně a s ohledem na to zvolen postup pro návrh prvotního tvaru nové hliníkové kapoty.

4.4.1 Popis postupu vytváření modelu

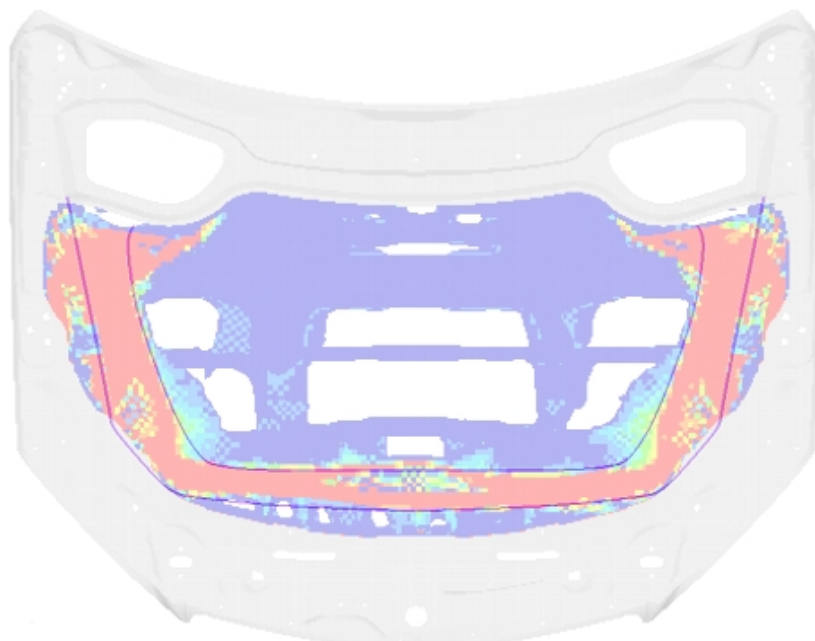
Vyhodnocení topologické optimalizace v barevné škále rozložení fiktivních hodnot hustoty bylo importováno ze softwaru HyperMesh do prostředí 3D modelovacího programu Rhinoceros 4.0. S využitím dat z optimalizace byly vytvořeny křivky definující tvar výztuh a otvorů pro novou konstrukci, viz obr. 4.11. Drobné nesymetrie, zejména ve spodní části optimalizované oblasti způsobené uchycením jistícího háku apod. nebyly uvažovány. Nový návrh byl vytvořen pro pravou a levou stranu symetricky s 9 otvory ve střední části kapoty, jedním výraznějším otvorem v horní části optimalizované oblasti a se dvěma symetricky umístěnými otvory kapkovitého tvaru na bocích, jak je zřejmé z obr. 4.11. V pohledu shora je materiál potřebný převážně na bočních stranách a v přední části optimalizované oblasti, proto byly vytvořeny křivky prolisu vnitřního plechu ve tvaru písmene "U" (viz obr. 4.12). Křivky vymezující budoucí výztuhy kapoty byly následně importovány do konečnoprvkového systému MSC.Marc/Mentat.



Obrázek 4.10: Ukázka použití funkce *smooth* při zpracování výsledků topologické optimalizace [12]

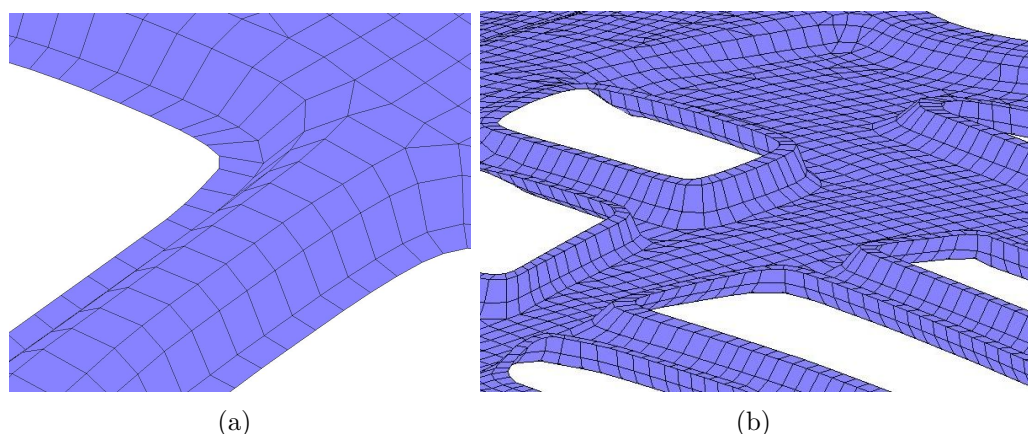


Obrázek 4.11: *Pomocné křivky pro tvorbu nové konstrukce (pohled zdola)*



Obrázek 4.12: *Pomocné křivky pro tvorbu nové konstrukce (pohled shora)*

V dalším kroku byla v prostředí systému MSC.Marc/Mentat vytvořena pomocí geometrie pohledového plechu v otvoru vnitřního plechu základní konečnoprvková síť reprezentovaná lineárními skořepinovými prvky. Poté, co byly do modelu importovány křivky připravené v programu Rhinoceros, byla s jejich využitím konečnoprvková síť střední části tvarována do prostoru. Vytažením elementů k ploše pohledového plechu vznikly prostorově tvarované profily ve tvaru písmene U, jak je patrné na detailech v obr. 4.13.

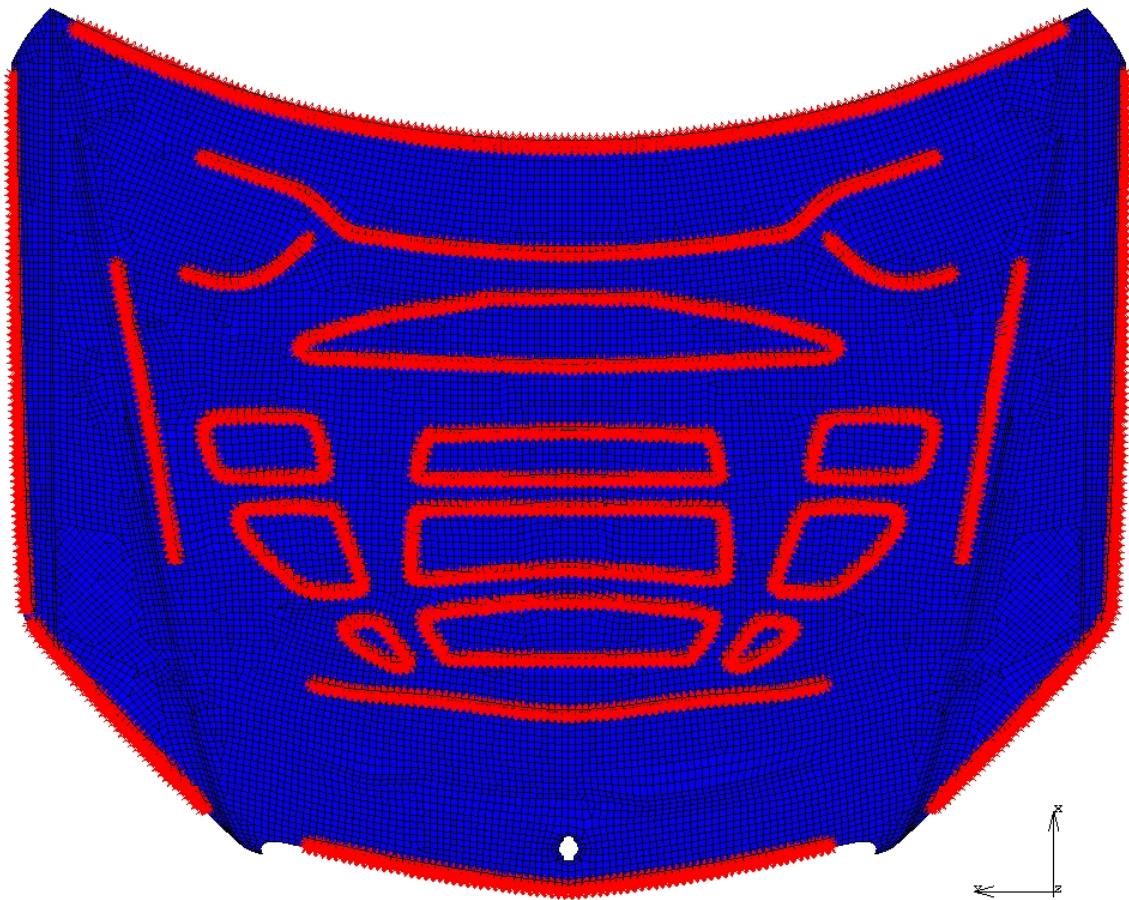


Obrázek 4.13: *Detail tvarování vnitřního plechu*

Na hranách nově vzniklých otvorů kopírujících tvar křivek byly vytvořeny plošky pro plánované vytvoření solidových prvků měkkých lepidel. Vzdálenost těchto plošek a pohledového plechu odpovídá výšce solidových elementů měkkého lepidla použitého u původní ocelové kapoty. Elementy měkkých lepidel byly v původním konečnoprvkovém modelu ocelové kapoty modelovány umístěním prostorových prvků přímo mezi uzly vnitřního dílu a pohledového plechu. V případě nově navržené hliníkové kapoty se konečnoprvková síť vnitřního dílu již liší od sítě pohledového plechu. Proto bylo nutné použít spojení jednotlivých částí pomocí RBE3 prvků podobně, jako je modelováno spojení tvrdším lepidlem po obvodu kapoty. Z důvodu obtížného stanovení váhových koeficientů u nových RBE3 vazeb v systému MSC.Marc/Mentat byl pro tento úkon využit software vyvinutý společností Daimler. Připravený konečnoprvkový model byl importován do tohoto programu a kolem všech nově vzniklých otvorů na střednici vytvořených plošek automaticky vygenerovány prvky měkkého lepidla i s provázáním uzlů lepidla s uzly pohledového a vnitřního plechu. Váhové koeficienty RBE3 vazeb byly automaticky dopočteny s ohledem na vzájemné vzdálenosti uzlů jednotlivých sítí. Pomocí výše uvedeného postupu byl vytvořen prvotní návrh nové konstrukce hliníkové kapoty.

V tomto konečnoprvkovém modelu prvotní konstrukce hliníkové kapoty byla definována konstantní tloušťka skořepinových elementů vnitřního dílu a provedeny analýzy pro zátěžné stavy jednotlivých posuzovaných modálních a tuhostních vlastností. V souvislosti s tím, že v původním modelu jsou elementy měkkého lepidla

modelovány pouze v určitých segmentech na okraji otvorů (viz obr. 3.6), byl analyzován vliv množství lepidla podél nově vzniklých otvorů. Výpočet byl proveden s uvažováním elementů lepidel umístěných kontinuálně kolem celého obvodu otvorů a následně 50 % prvků lepidel odebráno a ponechány pouze segmenty lepidla odpovídající rozmístění lepidla v původním ocelovém návrhu. Analyzována byla také varianta neobsahující žádná měkká lepidla. Při komparaci výsledků s uvažováním 100 % lepidel (obr. 4.14) a zcela bez lepidel, bylo zjištěno, že varianta kapoty bez lepidel vykazuje o 12 % horší výsledky pro tuhostní kritéria. Porovnáním modelu s uvažováním 50 % a 100 % měkkých lepidel se výsledné hodnoty posuvů po odebrání poloviny lepidel zhorší pouze o 1,5 %. Protože jsou plošky pro nanesení lepidla na hranách vnitřního dílu nového návrhu užší, bylo uvažováno 100 % množství lepidla tzn. podél celého obvodu otvorů. Tím bylo celkem použito přibližně stejného objemu měkkých lepidel jako u původní ocelové kapoty. Následně byly výsledky porovnány s hodnotami odpovídajícími původní ocelové konstrukci. Z tab. 4.1 získaných výsledků je patrné, že prvotní návrh konstrukce dosahuje vyšších prvních tří vlastních frekvencí, ale tuhostní kritéria splněna nejsou. Tento návrh hliníkové kapoty je proto třeba dále ještě modifikovat.



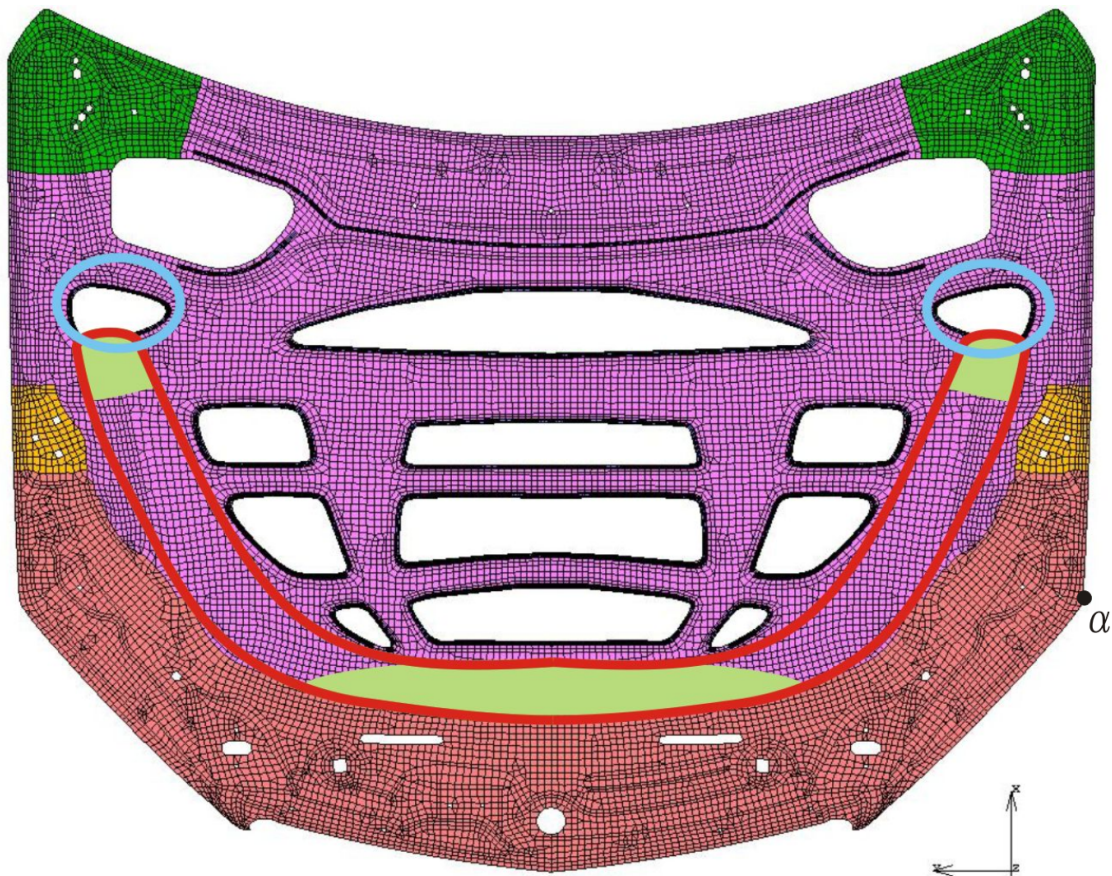
Obrázek 4.14: Umístění měkkých a tvrdých lepidel u nového návrhu kapoty

konstrukce	Vlastní frekvence [Hz]			u_z [mm]	\bar{u}_z [mm/m]	m [kg]
	Ω_1	Ω_2	Ω_3			
ocel	29.21	30.27	43.08	4.033	-1.370	20.56
prvotní návrh	33.04	38.14	59.59	5.021	-1.656	12.52

Tabulka 4.1: Porovnání výsledků pro všechny sledované veličiny

4.4.2 Modifikace prvotního návrhu, výsledná konstrukce

Nejprve byla provedena modifikace prvotního návrhu se záměrem vyztužit namáhané oblasti uchycení důležitých prvků jako jsou panty, zámky a boční podpěry. S ohledem na výše uvedené konstrukční předpoklady a technologické možnosti materiálu nebylo možné uvažovat plechy lokálního zesílení připevněné k vnitřnímu dílu bodovými svary. Byl tedy učiněn předpoklad, že vnitřní díl bude tvořen z několika dílčích hliníkových plechů rozdílne tloušťky vzájemně spojených nýty.



Obrázek 4.15: Modifikované oblasti prvotního návrhu

Tyto vyztužující plechy vnitřního dílu nebyly modelovány jako samostatné ge-

ometrie vzájemně propojené objemovými a RBE3 prvky představujícími skutečná spojení nýty a lepidly. Konečnoprvkový model kapoty byl tedy zjednodušen oproti reálné konstrukci. V rámci tohoto zjednodušení bylo pouze provedeno lokální zesílení prvků vnitřního plechu v příslušných oblastech, které odpovídalo překrytí dvou plechů. Zóny elementů představujících lokální překrytí plechů jsou vyznačeny v obr. 4.15. Tmavě zelenou barvou jsou znázorněny zesílené oblasti uchycení pantů, žlutě boční zesílení v oblasti uchycení podpěr a vyztužení přední části je vyznačeno oranžově.

Kromě doplnění lokálních zesílení konstrukce byl prvotní návrh modifikován i tvarově. Čtyři varianty tvarování konstrukce včetně prvotního návrhu byly označeny písmeny A (prvotní návrh), B, C, D. Pro tvarovou variantu B byl vnitřní plech v souladu s výsledky optimalizační úlohy v oblasti na obr. 4.12 prolisován do prostoru blíže k pohledovému plechu v oblasti červeně označené na obr. 4.15. Tato úprava zlepšila odolnost kapoty proti možnosti promáčknutí pohledového plechu. Pohledový plech je v tomto případě rovnoměrněji podepřen. Jak se však po vyhodnocení výsledků z jednotlivých kritérií ukázalo, došlo touto modifikací ke zhoršení vlastností při namáhání konstrukce dle třetího kritéria. Proto bylo v další variantě C přistoupeno k zaslepení kapkovitých otvorů na bočních stranách označených modře. Byl tak vytvořen nepřerušovaný profil táhnoucí se od oblasti uchycení zámků až k uchycení pantů. Touto úpravou došlo ke zlepšení zejména tuhostních vlastností, ale výsledky analýz při namáhání kapoty na ohyb a torzi stále nedosahovaly požadovaných hodnot srovnatelných s původní ocelovou konstrukcí. Se zřetelem na výsledné rozložení fiktivní hustoty v optimalizované oblasti v pohledu zdola (obr. 4.11) a shora (obr. 4.12) lze zaznamenat, že v partiích označených na obr. 4.15 světle zelenou barvou vyžaduje nová konstrukce materiál v horní i spodní vrstvě současně. Proto byla u varianty D vytvořena lokální zdvojení oblastí. Pomocí skořepinových prvků byly namodelovány prostorové profily v úrovni prolisů blíže k pohledovému plechu a v úrovni vnitřního plechu. Navázání lokálních zdvojení by bylo vhodné simulovat opět namodelováním samostatných dílů a jejich navázání k vnitřnímu plechu řešit využitím lepidla a RBE3 prvků.

Pro potřeby této diplomové práce bylo navázání lokálních zdvojení a vnitřního plechu řešeno přímým napojením konečnoprvkových sítí. Pro každou z variant byla provedena analýza s uvažováním lokálních zesílení a varianta s konstantní tloušťkou vnitřního plechu.

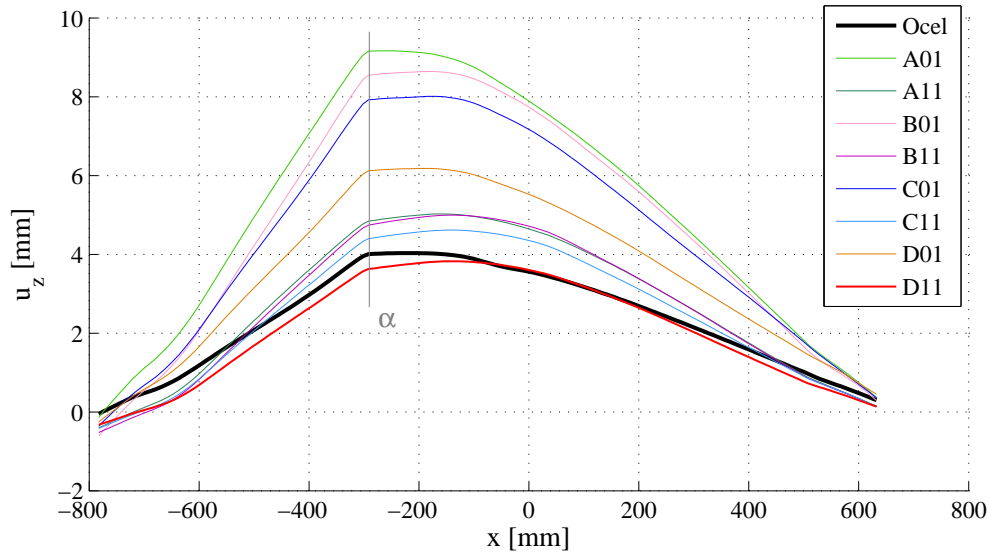
Varianta konstrukce		Vlastní frekvence [Hz]			u_z [mm]	\bar{u}_z [mm/m]	m [kg]
		Ω_1	Ω_2	Ω_3			
původní ocelová		29.21	30.27	43.08	4.033	-1.370	20.56
A	00	24.01	28.08	35.22	12.95	-4.513	9.71
	01	28.60	29.62	39.14	9.155	-2.527	9.71
	10	31.71	37.34	46.16	5.4	-2.703	12.52
	11	33.04	38.14	59.59	5.021	-1.656	12.52
B	00	24.91	29.52	32.31	12.93	-6.203	9.69
	01	30.18	32.81	43.43	8.64	-3.500	9.69
	10	31.96	37.37	38.02	5.44	-3.406	12.51
	11	33.76	39.31	58.97	4.99	-2.252	12.51
C	00	24.60	28.41	28.88	12.3	-5.277	9.74
	01	30.46	32.67	44.55	8.01	-2.770	9.74
	10	30.64	33.48	36.65	5.13	-3.056	12.55
	11	34.56	39.94	60.28	4.61	-1.875	12.55
D	00	26.99	30.95	35.70	10.2	-3.664	10.03
	01	33.06	33.87	46.14	6.18	-2.159	10.03
	10	33.67	40.35	48.73	4.7	-2.196	12.85
	11	38.34	41.95	60.70	3.82	-1.40	12.85

Tabulka 4.2: Výsledné hodnoty sledovaných veličin pro jednotlivé varianty konstrukce

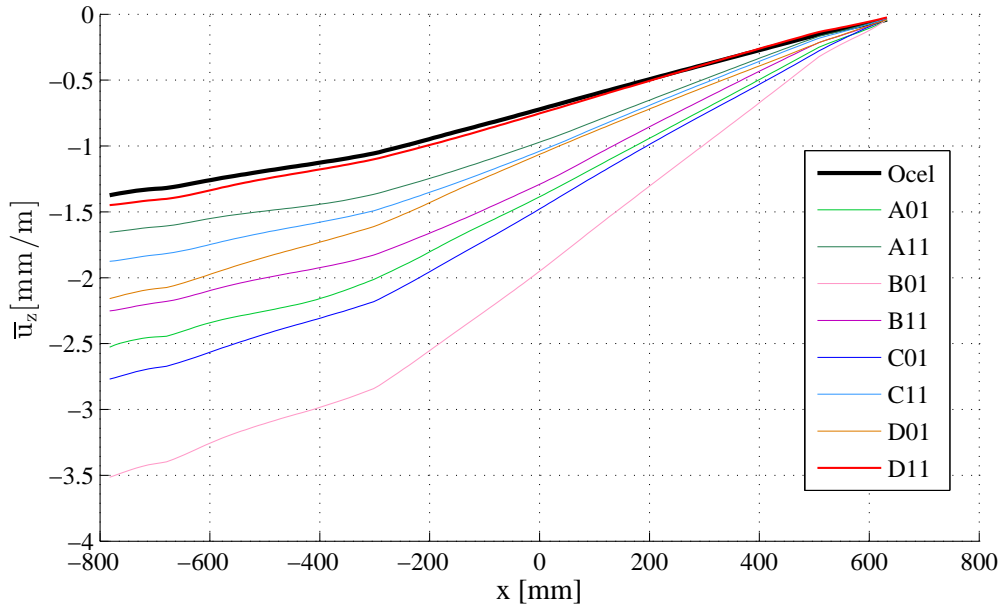
Výsledné hodnoty analýz všech čtyř tvarově odlišných variant pro každou variantu ve 4 dalších modifikacích jsou uvedeny v tab. 4.2. Každá z celkem 16 variant je pro přehlednost označena trojmístným kódem, kde první pozice představuje označení tvarové varianty (A, B, C, D), hodnotou na druhé pozici je definováno lokální zesílení konstrukce (0 = bez lokálních zesílení, 1 = lokální zesílení v oblastech pantů, zámků a podpěr) a na třetí pozici je kódováno uvažování měkkých lepidel (0 = konstrukce bez uvažování měkkých lepidel, 1 = s lepidly dle obr. 4.14). Z výsledků prezentovaných v tab. 4.2 je možné stanovit, jak se mění celková hmotnost kapoty pro rozdílné tvarování vnitřního plechu a učinit také některé dílčí závěry:

- Varianty konstrukce obsahující lokální zesílení dosahují výrazně nižších hodnot deformace (až o 50 %). Hmotnost se ale po zesílení konstrukce zvýší jen o 28 %.
- U varianty D11 byla splněna obě tuhostní kriteria, došlo k výraznému zvýšení vlastních frekvencí a hmotnost konstrukce byla zároveň snížena o 37,5 % oproti původní ocelové kapotě. Tato varianta byla zvolena jako nejvhodnější.

Na obr. 4.16 je vykresleno rozložení posuvů u_z pro varianty A, B, C, D s uvažováním lepidel v porovnání s původní ocelovou kapotou. V linii α je patrný zlom křivek závislosti u_z na souřadnici x , který odpovídá bodu lomení geometrie kapoty znázorněnému na obr. 4.15. Normovaný posuv \bar{u}_z v závislosti na souřadnici x při torzním namáhání je pak pro jednotlivé varianty zobrazen na obr. 4.17.



Obrázek 4.16: Závislost posuvu u_z na souřadnici x pro jednotlivé varianty

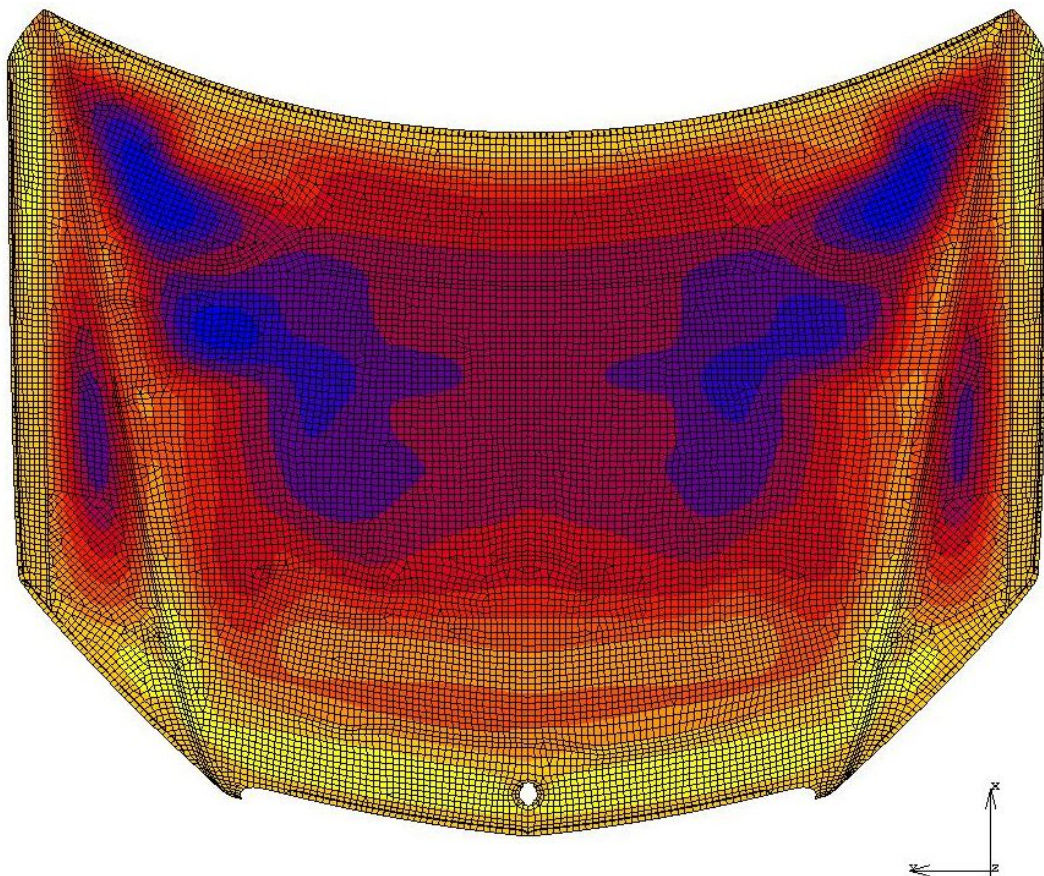


Obrázek 4.17: Závislost normovaného posuvu \bar{u}_z na souřadnici x pro jednotlivé varianty

4.4.3 Analýza proklapnutí nové kapoty

Při běžném užívání automobilu může v praxi dojít k promáčknutí pohledového plechu při manipulaci s přední kapotou. Pokud není pohledový plech dostatečně

a rovnoměrně podepřen konstrukcí vnitřního dílu, může při lokálním působení větší síly na plochu pohledového plechu dokonce nastat tzv. proklapnutí plechu, které způsobí porušení laku a vznik nežádoucích trvalých deformací. Obnažený materiál je také velmi náchylný ke korozi. Proto je, mimo řady jiných analýz, vhodné posuzovat i náchylnost nové kapoty k proklapnutí. Cílem této analýzy je nalézt kritické oblasti konstrukce kapoty, ve kterých je riziko proklapnutí a vzniku plastických deformací vyšší.

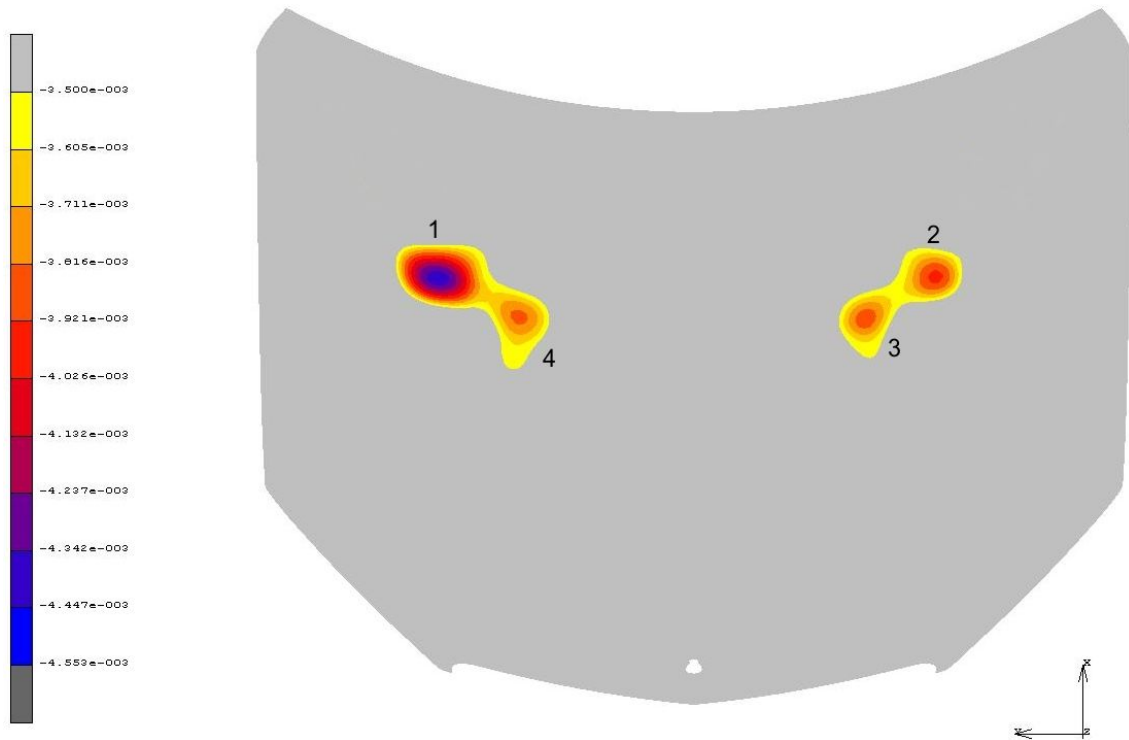


Obrázek 4.18: Rozložení posuvu u_z při zatížení pohledového plechu jednotkovým tlakem

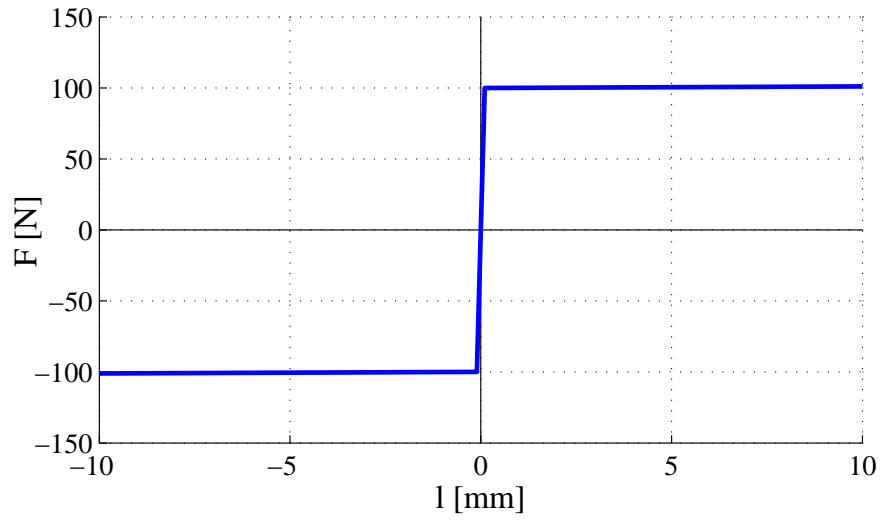
Po domluvě s odborným konzultantem byl pro potřeby této diplomové práce navržen zjednodušený postup analýzy promačkávání. Tento postup lze rozdělit do 2 kroků. V první fázi byl proveden lineární výpočet a konečnoprvkový model nové kapoty z hliníkové slitiny podepřen po obvodu a zatížen jednotkovým tlakem působícím ve směru osy $-z$ na všechny elementy pohledového plechu. Byly tak nalezeny kritické oblasti (viz obr. 4.18) podezřelé z vyšší náchylnosti na proklapnutí. Pro tento konkrétní případ nové hliníkové kapoty byla vyhodnocena 4 kritická místa (obr. 4.19). Výraznější deformace se objevily v oblasti 1. Kvůli mírné nesymetrii celkové konstrukce dosahovala v oblasti 2 deformace nepatrně nižších hodnot. Rozdíl

v oblastech 3 a 4 byl již zcela zanedbatelný. Proto byla pro další postup vybrána jako nejrizikovější místa 1, 2 a 3.

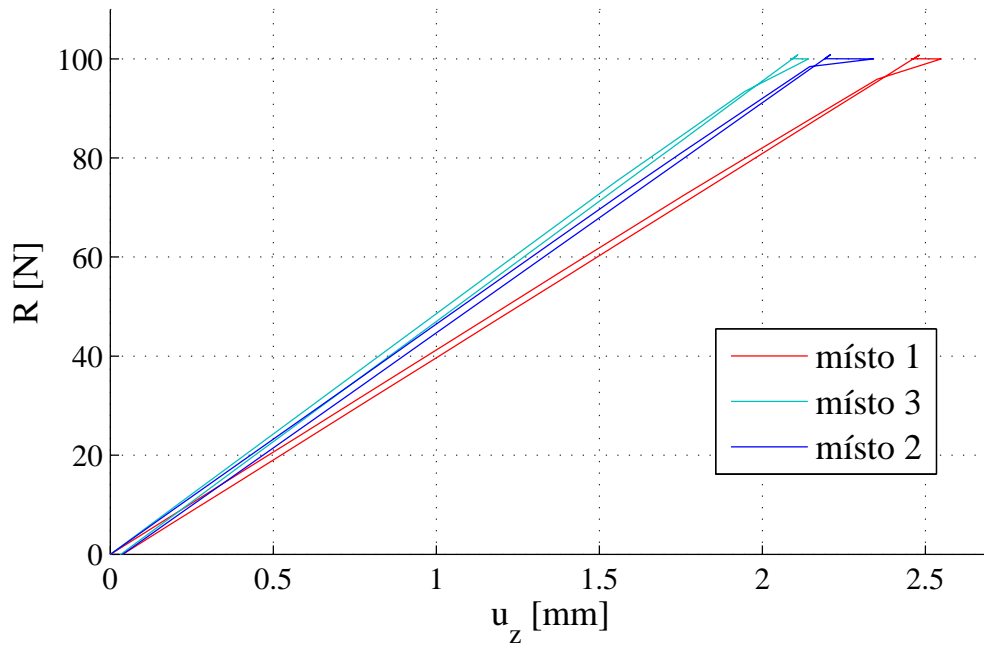
V následujícím kroku byl v každé ze tří oblastí nalezen uzel konečnoprvkové sítě pohledového plechu s největší hodnotou posuvu u_z . Každému takto vybranému uzlu byla ve směru $-z$ předepsána deformace, jejíž účinek byl přenášen na příslušný uzel prostřednictvím pružiny s proměnnou tuhostí popsanou závislostí síly F na prodloužení l na obr. 4.20. V koncových bodech pružin byl předepsán posuv ve směru z . Pro takto zadanou úlohu byl proveden nelineární výpočet za účelem prověření vzniku plastických deformací v kritických uzlech. Pohledový plech byl v uzlech nejprve deformován pomocí předepsaného posuvu na hodnotu 10,2 mm a následně opět odlehčován do původní polohy. Průběh analýzy byl zaznamenáván do grafu závislosti reakční síly R v koncovém uzlu pružiny na posuvu u_z v uzlu pohledového plechu. Existence inflexního bodu na vyhodnocované křivce by naznačovala, že v kritickém místě zřejmě dojde k proklapnutí pohledového plechu. Výsledky všech tří analyzovaných oblastí (obr. 4.21) vykazují lineární monotónní charakter až do maximální hodnoty zatížení, lze tedy usuzovat, že s největší pravděpodobností v těchto oblastech nedojde k proklapnutí, tj. navržený vnitřní díl kapoty dostatečně podepírá pohledový plech.



Obrázek 4.19: Nalezení kritických míst podezřelých z proklapnutí



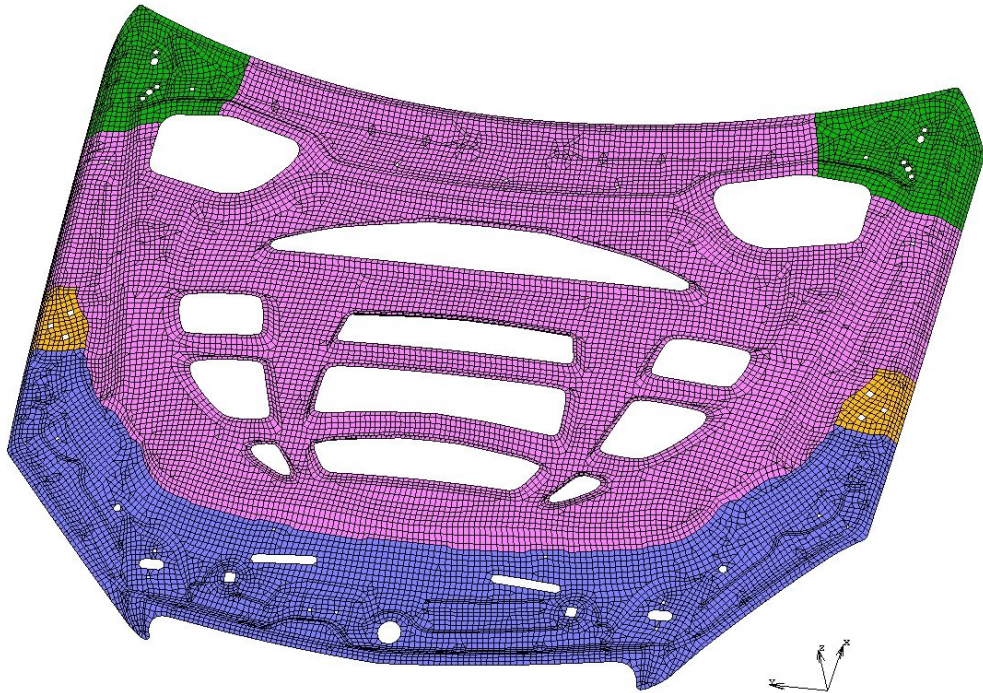
Obrázek 4.20: Tuhostní charakteristika pružiny



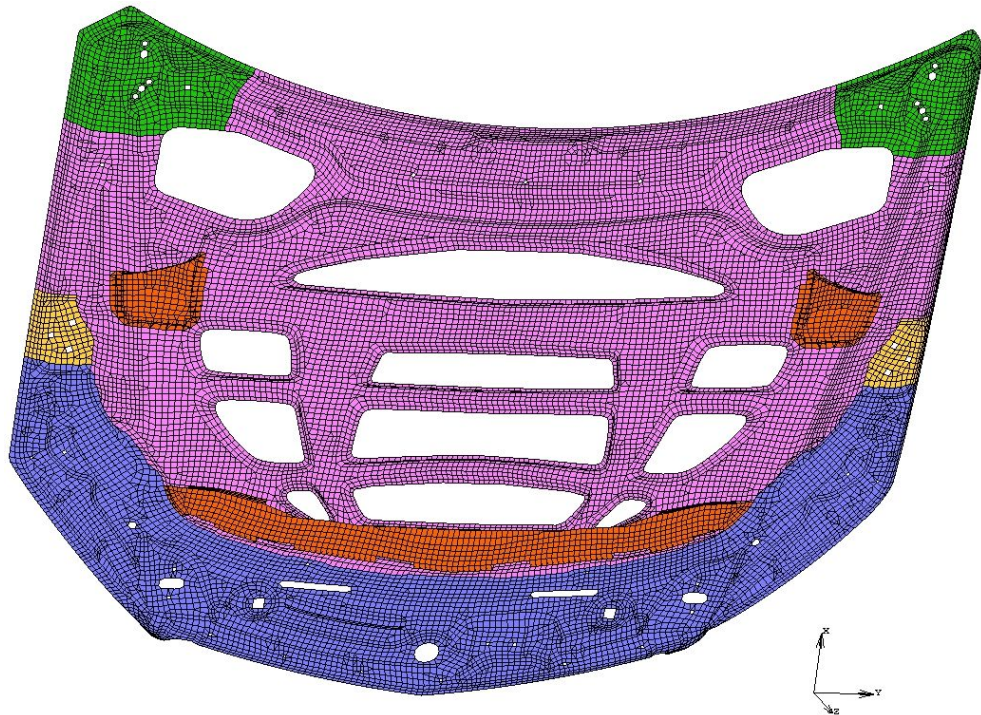
Obrázek 4.21: Závislost reakční síly R na posuvu u_z v kritických místech

4.5 Porovnání vlastností hliníkové a ocelové kapoty

Hodnoty prvních tří vlastních frekvencí jsou v případě nového návrhu kapoty výrazně vyšší. Z původních hodnot $\Omega_1 = 29,21$ Hz, $\Omega_2 = 30,27$ Hz, $\Omega_3 = 43,08$ Hz se vlastní frekvence pro hliníkovou konstrukci zvýšily na hodnoty $\Omega_1 = 38,34$ Hz, $\Omega_2 = 41,95$ Hz, $\Omega_3 = 60,70$ Hz. Vyšší tuhost nové kapoty poskytuje potenciální možnost odlehčení konstrukce kapoty dalšími otvory. Maximální posuv u_z na bočních hranách kapoty při zatěžování na ohyb dosahuje u nového návrhu hodnoty $u_{z,max} = 3,82$ mm. Vzhledem k tomu, že maximální hodnota posuvu u_z v případě původní ocelové kapoty byla 4,033 mm, nový návrh splňuje toto tuhostní kritérium. Při torzním namáhání dosahují obě konstrukce srovnatelných hodnot normovaného posuvu \bar{u}_z na boční hraně (-1,4 [mm/m] v případě nového návrhu a -1,37 [mm/m] v případě původní ocelové kapoty). Současně se splněním všech kritérií dosahuje nově navržená kapota (obr. 4.22 a 4.23) z hliníkové slitiny hmotnosti 12,85 kg oproti 20,56 kg původní ocelové kapoty. Hmotnost byla tudíž snížena o 37,5 %.



Obrázek 4.22: Vnitřní část nově navržené hliníkové kapoty (pohled shora)



Obrázek 4.23: Vnitřní část nově navržené hliníkové kapoty (pohled zdola)

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala návrhem přední kapoty Mercedesu třídy C. Cílem bylo vytvořit novou konstrukci z hliníkové slitiny za účelem snížení hmotnosti tak, aby modální a tuhostní vlastnosti nové kapoty dosahovaly shodných nebo lepších hodnot.

V první kapitole byly nejprve shrnuty současné trendy v oblasti návrhu karoserií a posouzeny vhodné technologické postupy a možnosti vzájemného spojování jednotlivých komponentů u nové konstrukce kapoty. V rámci rešerše současného stavu v tomto oboru byly vybrány ukázky stávajících konstrukčních řešení předních kapot automobilů různých značek.

V další kapitole byly využity podklady poskytnuté výpočtovým oddělením společnosti MBtech v Sindelfingenu. Poskytnutý konečnoprvkový model původní ocelové kapoty byl importován do systému MSC.Marc/Mentat a následně ověřena validita přenesených dat. Po domluvě s odborným konzultantem byla formulována 3 kritéria pro posouzení vlastností kapoty. Modální kritérium pro posouzení prvních tří vlastních frekvencí, přičemž důraz byl kladen zejména na první z nich. Dále byla stanovena dvě tuhostní kritéria pro vyhodnocení maximálního průhybu a hodnoty normovaného posuvu na bočních hranách kapoty. Pro efektivnější vyhodnocování kritérií byl vytvořen vlastní program v prostředí Matlab 2012. Následně byla provedena analýza původní ocelové kapoty a vyhodnoceny výsledky pro jednotlivá kritéria. Získané hodnoty sloužily poté jako výchozí podklady pro návrh nové konstrukce. V dalším kroku byla dále ověřena možnost nahrazení oceli hliníkovou slitinou při zachování původní konstrukce. Výsledky numerických simulací ukázaly, že pouhým nahrazením materiálu není dosaženo optimálních výsledků. Proto byla následující kapitola věnována návrhu nové konstrukce s využitím topologické optimalizace.

Nejprve byl pro výpočet optimalizace zvolen software NX 8.0 a jeho optimalizační modul. Po provedení testovacích úloh se však ukázalo, že možnosti nastavení optimalizační úlohy nejsou použitelné pro případ této diplomové práce. Dále byly ověřeny možnosti optimalizace s využitím MSC.Marc, ale jako nejvhodnější se nakonec jevilo využití optimalizačního softwaru OptiStruct využívajícího řešič Radioss a preprocessor HyperMesh od společnosti Altair. Konečnoprvkový model kapoty byl v prostředí MSC.Marc modifikován pro potřeby optimalizační úlohy a importován do HyperMesh. V rámci zadávání optimalizační úlohy byla definována optimalizační oblast, formulována cílová funkce a nerovnostní omezení odpovídající požadavkům pro splnění výše zmíněných kritérií. Optimalizační úloha byla řešena nejprve pro každé kritérium zvlášť a posouzen vliv jednotlivých typů zatížení. Následně byl proveden výpočet pro všechna tři kritéria současně se zadáním rovnocenných váhových koeficientů. Na základě výsledků optimalizace byl pomocí systému MSC.Marc/Mentat a programu Rhinoceros 4.0 vytvořen prvotní návrh hliníkové kapoty. Všechny tři sledované vlastní frekvence byly u tohoto návrhu vyšší než u původní konstrukce, avšak tuhostní kritéria splněna nebyla. Proto bylo nutné přistoupit k dalším modifikacím

tvaru konstrukce.

S ohledem na výsledky optimalizační úlohy byly vytvořeny 4 tvarově rozdílné varianty s uvažováním lokálních zesílení vnitřního plechu. Pro celkem 16 variant konstrukce byly provedeny analýzy v souladu se zadanými kritérii. Ze všech variant byl pak vybrán optimální design kapoty, který splňoval všechna požadovaná omezení. Hmotnost finálního návrhu konstrukce je 12.85 kg, což znamená snížení váhy konstrukce o 37,5 % oproti původní ocelové kapotě. V závěru této práce byla provedena analýza promačkávání pohledového plechu pro nově navrženou hliníkovou konstrukci. Výsledky ukázaly, že pohledový plech je dostatečně podepřen a i v nejvíce kritických oblastech pravděpodobně nedojde k nežádoucímu proklapnutí.

Přestože nový návrh splňuje všechna požadovaná kritéria, jedná se pouze o zjednodušený model reálné kapoty, zejména v oblastech lokálního zesílení, zdvojení a spojení plechů. Pro případné reálné využití tohoto návrhu by bylo nutné podrobnější zpracování odborníky z oblasti konstrukce a následné provedení dalších analýz zahrnujících kromě tří základních kritérií uvažovaných v této diplomové práci další požadavky, které musí konstrukce před uvedením do sériové výroby splňovat.

Literatura

- [1] VLK, F. *Karosérie motorových vozidel* Nakladatelství a vydavatelství Vlk, Brno, 2000.
- [2] MM Průmyslové spektrum - technický měsíčník specializovaný na strojírenství. *Nové tvářecí technologie pro výrobu karoserií.*
Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-tvareci-technologie-pro-vyrobu-karoserii.html>>, cit. 25.5.2013.
- [3] MM Průmyslové spektrum - technický měsíčník specializovaný na strojírenství. *Tvářecí a výrobní procesy ve stavbě lehkých karoserií.*
Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/tvareci-a-vyrobní-procesy-ve-stavbe-lehkych-karoserii.html>>, cit. 25.5.2013.
- [4] MICHNA, Š. a kol. *Hliníkové materiály a technologie od A do Z* Adin, Prešov, 2007.
- [5] MM Průmyslové spektrum - technický měsíčník specializovaný na strojírenství. *Plasty v automobilovém průmyslu.*
Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-v-automobilovem-prumyslu.html>>, cit. 20.4.2013.
- [6] MM Průmyslové spektrum - technický měsíčník specializovaný na strojírenství. *Povrchové úpravy v automobilovém průmyslu.*
Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-v-automobilovem-prumyslu.html>>, cit. 25.5.2013.
- [7] WELDING JOURNAL - February 2013. *Automobile manufacturing using laser beam welding.*
- [8] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost - hliník a jeho slitiny.*
Svářečské nakladatelství Ostrava, 2001.
- [9] TOP OBRÁBĚNÍ - portál z oblasti obrábění a strojírenství. *Klinčování plechů.*
Dostupné z: <<http://www.topobrabeni.cz/582/>>, cit. 25.5.2013.
- [10] *Uživatelský manuál systému MSC.Marc/Mentat.*
- [11] *Uživatelský manuál systému NX Siemens.*
- [12] *Uživatelský manuál systému HyperMesh, OptiStruct.*

Přílohy

Seznam příloh

Příloha 1

Vlastní program pro zpracování a vyhodnocování výsledků (generování procedur a zpracování dat).

Příloha 2

Postup zadání optimalizační úlohy v systému HyperMesh/OptiStruct.

Příloha 1

```

function f=generovani(uzly1 , uzly2 ,procsoubor ,model, variable , resfile1 ,
    resfile2)
    body1=num2str(uzly1 , '%d\n');

    str=['*prog_option compatibility:prog_version:ment2010.2\n*open_model '
        model '\n*post_open_default\n'];

    str=[str , '*set_pathplot_path\n' body1 '\n# | End of List\n*
        pathplot_add\nArc Length\n' variable '\n*post_skip_to_last\n'];
    str=[str , '*pathplot_write ' resfile1 ' yes\n*pathplot_clear\n'];

    if isempty(uzly2)==false
        body2=num2str(uzly2 , '%d\n');
        str=[str , '*set_pathplot_pathn' body2 'n# | End of List\n*
            pathplot_add\nArc Length\n' variable '\n*post_skip_to_last\n'];
        str=[str , '*pathplot_write ' resfile2 ' yes\n*pathplot_clear\n'];
    end
    str=[str , '*show_model\n*post_close\n*quit yes'];

    s=fopen(procsoubor , 'wt');
    fprintf(s , str);
    fclose(s);
    f=[resfile1 ; resfile2 ];
end

function zpracovani(soubory ,popisy ,gtitle ,souradnice)
    souboru=size(soubory);
    for asoubor=1:souboru(1)
        soubor=soubory(asoubor ,:)
        if isempty(soubor)
            break;
        end
        cx=[];
        cy=[];
        node=[]
        s=fopen(soubor , 'r');
        a=fgets(s);
        while a(1)~= '-'
            a=fgets(s);
            if feof(s)==1
                disp('Soubor neobsahuje pozadovana data');
                return
            end
        end
        c=fscanf(s , '%g %g %g');
        fclose(s);

        for i=1 : size(c) / 3
            node(i)=c(3*i -2);

```

```

        cx(i)=c(3*i-1);
        cy(i)=c(3*i);
    end

    cx=cx.*1000 -782.4 ;
    cy=cy.*1000;
    figure(1)
    hold all
    lomena=strfind(soubor, '\\');
    nazev=soubor(lomena(length(lomena))+2:length(soubor)-8);
    nazev=strrep(nazev, '-', ' ');

    if (~isempty(souradnice))
        sy=zeros(1,length(node));
        for i=1:length(node)
            for j=flipr(1:node(i))
                if souradnice(1,j)==node(i)

                    sy(i)=-souradnice(4,j) * 10 ^ -souradnice(5,j);
                    break
                end
            end
        end
        cy=cy./sy;
    end

    plot(cx,cy, 'DisplayName', nazev)
    xlabel('delka [mm]');
    ylabel('popisy');
    title(['gtitle ' (hrana ' num2str(asoubor) ')']);

end
end

```

Příloha 2

Parametry optimalizace	Menu	Popis zadání
návrhová proměnná (design variable)	- Optimization - Create - Topology Desvar	- pojmenovat proměnnou - definovat typ elementů - vybrat oblast optimalizace (design area)
optimalizované a omezující parametry (responses)	- Optimization - Create - Responses	- pojmenovat parametr - zvolit typ (volume, displacement, frequency...) - vybrat oblast, na kterou se parametr vztahuje (např. displacement - uzly boční hrany kapoty)
cílová funkce (objective)	- Optimization - Create - Objective	- vybrat z Responses požadovaný parametr - zvolit min/max
omezení (constraints)	- Optimization - Create - Constraints	- vybrat z Responses požadovaný parametr - zadat horní a dolní meze přípustnosti
spuštění výpočtu	- Optimization - OptiStruct	- nastavit parametry výpočtu (export, memory, run options) - spustit výpočet zeleným tlačítkem OptiStruct
zobrazení výsledků	- Optimization - OptiStruct - Hyperview	- Results (vizualizace) - Plot - Iso (Element Densities)