

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta strojní

Ústav technické matematiky Ú 12101

Modelování ploch pro automobilové karosérie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Student:

Komkov Valentin

Vedoucí práce:

doc. Ing. Ivana Linkeová, Ph.D.

Rok:

2016

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta strojní, Ústav technické matematiky

Technická 4, 166 07 Praha 6

Akademický rok 2015–2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: Valentina Komkova

studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Název tématu: **Modelování ploch pro automobilové karosérie**

Zásady pro vypracování:

1. Základní principy modelování ploch obecného tvaru vhodných pro automobilové karosérie.
2. Způsoby napojení ploch obecného tvaru a analýza kvality napojení.
3. Ve vhodně zvoleném software aplikovat získané poznatky při návrhu karosérie automobilu.

Rozsah grafických prací: obrazová dokumentace procesu návrhu karosérie automobilu

Rozsah bakalářské práce: do 20 - 40 stran včetně obrázků

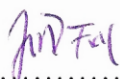
Seznam odborné literatury:

1. G. Farin, J. Hoschek and M. S. Kim, editors: Handbook of Computer-Aided Geometry Design. Elsevier, 2002.
2. Linkeová, I.: Základy počítačového modelování křivek a ploch, skripta ČVUT, FS.

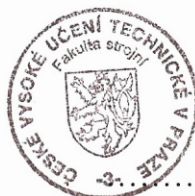
Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ivana Linkeová, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 25. 4. 2016

Datum odevzdání bakalářské práce: 17. 6. 2016



Prof. Ing. Jaroslav Fořt, CSc.
vedoucí Ú12101



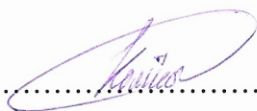
Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan FS, ČVUT v Praze

V Praze dne 25. 4. 2016

Neodevzdá-li student bakalářskou práci včas, je povinen tuto skutečnost předem písemně zdůvodnit, pokud bude omluva (předaná prostřednictvím studijního oddělení děkanovi) děkanem uznána, určí děkan studentovi náhradní termín konání státní závěrečné zkoušky (zůstávají dva termíny SZZ). Pokud tuto skutečnost student řádně neomluví nebo omluva nebude děkanem uznána, určí děkan studentovi termín pro opakování státní závěrečné zkoušky. SZZ je možné opakovat pouze jednou (SZŘ čl. 22, odst. 3, 4).

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne:



student

TÉMA PRÁCE: Modelování ploch pro automobilové karosérie

ABSTRAKT

Práce se zabývá základními principy modelování a napojování NURBS (neuniformní racionální B-spline) ploch obecného tvaru vhodných pro aplikaci v automobilovém průmyslu. Teoretická část obsahuje jak potřebné definice z oblasti počítačové grafiky a geometrie (NURBS křivky a plochy, geometrická a parametrická spojitost napojení křivek a ploch obecného tvaru), tak také vysvětlení důležitých pojmů používaných v automobilového průmyslu (A-Class modelování, plocha vysoké kvality, plynulý přechod mezi plochami, statická a dynamická kontrola kvality přechodů mezi plochami). Dále jsou uvedena pravidla kvalitního plošného modelování vyvinutá v automobilovém průmyslu a inženýrské požadavky na výsledný model. V praktické části práce jsou tato pravidla a inženýrské požadavky aplikovány při vytvoření 3D modelu karosérie automobilu v systému Autodesk Alias Automotive.

KLÍČOVÁ SLOVA

NURBS křivka, NURBS plocha, tečnost, křivost, torze, parametrická spojitost, geometrická spojitost, A-Class modelování (A-Class plocha, B-Class plocha, C-Class plocha).

BACHELOR THESIS TOPIC: Surfaces for car bodies modelling

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the basic principles of modeling and connecting freeform NURBS (non-uniform rational B-spline) surfaces suitable for application in automotive industry. The theoretical part contains both the necessary definitions of computer graphics and geometry (NURBS curves and surfaces, geometric and parametric continuity of freeform curves and surfaces) and an explanation of important terms used in the automotive industry (A-Class modeling, high quality surface, smooth connection between surfaces, static and dynamic connection quality control between surfaces). The rules for quality surface modeling developed in the automotive industry and engineering requirements for the final model are here listed, too. In the practical part these rules and engineering requirements are applied and 3D model of a car body in Autodesk Alias Automotive is created.

KEY WORDS

NURBS curve, NURBS surface, tangency, curvature, torsion, parametric continuity, geometric continuity, A-Class modeling (A-Class surface, B-Class surface, C-Class surface).

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Modelování ploch pro automobilové karosérie“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ivany Linkeové, Ph.D. a s použitím zdrojů, uvedených na konci mé bakalářské práce.

V Praze dne

Komkov Valentin

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí této práce doc. Ing. Ivaně Linkeové, Ph.D. za poskytnutí potřebné literatury, informací a podkladů k věcnému ale i k formálnímu provedení této práce, zejména však za poskytnutý čas, připomínky, rady a v neposlední řadě za korekci. Toto vše pro mne bylo velkým přínosem k dokončení této práce.

Obsah

Obsah	7
1. Úvod a cíle práce	8
1.1 Součásti práce	8
2. NURBS křivky a plochy	9
3. Spojitost napojení křivek a ploch	11
3.1 Parametrická spojitost	13
3.2 Geometrická spojitost	13
3.3 Geometrická spojitost vyšších řádů	14
3.4 Analýza kvality napojení	14
4. A-Class modelování	17
4.1 A-Class plochy	17
4.2 Výrobní požadavky	18
4.3 Základní principy kvalitního plošného modelování	19
5. Software v automobilovém průmyslu	22
5.1 Rhinocerus	22
5.2 CATIA	22
5.3 ICEM Surf	23
5.4 Autodesk Alias	23
6. Vytvoření modelu karosérie automobilu	25
6.1 Proces návrhu karosérie	25
6.2 Vlastní návrh	27
6.3 Popis nejdůležitějších funkcí	29
6.4 Praktická aplikace znalostí	29
6.5 Analýza ploch	35
6.6 Vizualizace	37
7. Závěr	38
8. Zdroje	39

1. Úvod a cíle práce

Teoretické cíle práce jsou rozbor metod použití plošného modelování v automobilovém průmyslu, uvedení do problematiky A-Class modelování (modelování hladkých ploch nejvyšší kvality používaných v procesu vývoje automobilové karosérie) a seznámení se softwarem používaným v plošném modelování.

Praktickým cílem je aplikace získaných poznatků při vlastním návrhu 3D modelu karosérie automobilu pomocí NURBS ploch.

1.1 Součásti práce

Vlastní náplň práce je rozdělena do 5 kapitol. První tři kapitoly jsou teoretické, další dvě se týkají praktické části.

Kapitola „NURBS křivky a plochy“ je věnována teorii reprezentace NURBS křivek a ploch. Je zde zahrnut úvod do plošného modelování, uvedena stručná teorie NURBS křivek a ploch a jejich vlastnosti.

V kapitole „Spojitost napojení křivek a ploch“ jsou uvedeny definice jednotlivých typů napojení křivek a ploch obecného tvaru. Je zde rozebrána parametrická a geometrická spojitost včetně způsobů analýzy používaných pro kvalitní plošné modelování.

Kapitola je věnována termínu „A-Class modelování“, používanému v počítačem podporovaném automobilovém průmyslu. Jsou zde uvedena „Zlatá pravidla“ modelování ploch obecného tvaru vhodných pro automobilové karosérie, která byla vyvinuta společností Autodesk, a která je třeba během modelování dodržovat. Stejně tak jsou zde uvedené inženýrské požadavky, které je třeba splnit pro dosažení požadované kvality konečného modelu.

V kapitole „Software v automobilovém průmyslu“ je uveden výčet a stručná charakteristika počítačových systémů nejčastěji používaných při modelování ploch v automobilovém průmyslu. 3D model karosérie je realizován v systému Autodesk Alias.

Postup vytváření 3D modelu je dokumentován v kapitole „Vytvoření modelu karosérie automobilu“. Zde je vytvořený 3D model analyzován a vizualizován. 3D Model ve formátu step je dostupný na přiloženém CD.

2. NURBS křivky a plochy

NURBS je zkratka pro neuniformní racionální B-spline. Většina současných počítačem podporovaných technologií, jako např. CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering) je založena na NURBS reprezentaci. Hlavní výhodou NURBS reprezentace je schopnost přesně matematicky popsat analytické tvary (přímka, rovina, kružnice, kuželosečky, rotační plochy...), jakož i křivky a plochy obecného tvaru [1].

B-spline křivky jsou polynomiální segmentované křivky stupně p určené posloupností řídicích bodů (řídicím polygonem), které splňují podmínky C^{p-1} spojitosti (viz dále). Racionální B-spline křivky se od polynomiálních liší v tom, že každému řídicímu bodu je přiřazen parametr vypovídající o jeho vlivu na tvar křivky. Parametru říkáme váha a nabývá nezáporných reálných hodnot. Čím větší je váha jednoho bodu oproti váhám ostatních bodů, tím větší vliv má bod na tvar křivky (tím více je křivka přitahována k tomuto bodu), viz obrázek 1. Racionální B-spline jsou parametrizovány pomocí racionálních funkcí. O neuniformních racionálních B-spline hovoříme, když vzdálenosti mezi body, ve kterých dojde k napojení segmentů (těmto bodům říkáme uzly; posloupnosti, kterou tvoří, pak uzlový vektor), nejsou stejné. Vzdáleností uzlů zde myslíme rozdíl hodnot parametru u křivky $\mathbf{C}(u)$ v uzlech. Když jsou vzdálenosti uzlu stejné, jedná se o uniformní racionální B-spline [2].

Definice NURBS křivky:

Křivka je definována jako každá souvislá podmnožina k prostoru R^n , která je spojitým obrazem intervalu $I \subset R$. V případě, že $n = 2$, resp. $n = 3$, označujeme křivku jako rovinnou, resp. prostorovou. Je-li analytickou reprezentací rovinné, resp. prostorové křivky vektorová funkce, která je definovaná, spojitá a alespoň jedenkrát diferencovatelná na intervalu I , říkáme, že je *rovinná*, resp. *prostorová křivka* dána vektorovou rovnicí

$$\mathbf{C}(u) = [x(u), y(u)], u \in I, \text{ resp. } \mathbf{C}(u) = [x(u), y(u), z(u)], u \in I. \quad (1)$$

Nechť jsou dány řídicí body $(\mathbf{P}_i = (x_i, y, z_i))_{i=0}^n$ a váhy řídicích bodů $W = (w_i)_{i=0}^n$. Nechť je dále dán stupeň p , uzlový vektor $U = (u_i)_{i=0}^m, u_0 = a, u_m = b, a, b \in R, m = n + p + 1$. Potom je *NURBS křivka* $\mathbf{C}(u)$ stupně p dána následující vektorovou rovnicí

$$\mathbf{C}(u) = \sum_{i=0}^n \mathbf{P}_i R_{i,p}(u), u \in [u_p, u_{m-p}], \quad (2)$$

kde

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u)w_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u)w_j} \quad (3)$$

jsou racionální B-spline bázové funkce $N_{i,p}(u), i = 0, \dots, n, u \in [a, b]$, stupně p definovány rekurentním vzorcem [3]:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u \in [u_i, u_{i+1}), \\ 0, & u \notin [u_i, u_{i+1}) \text{ nebo na uzlové rozteči nulové délky} \end{cases} \quad (4)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u), k = 1, \dots, p.$$

Definice NURBS plochy:

Plocha je definována jako souvislá podmnožina κ prostoru R^3 , která je spojitým obrazem souvislé oblasti $I \subset R^2$. Je-li analytickou reprezentací plochy vektorová funkce dvou proměnných,

kteřá je definovaná, spojitá a alespoň jedenkrát diferencovatelná na oblasti I , říkáme, že je *plocha* dána vektorovou rovnicí

$$\mathbf{S}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)), (u, v) \in I, \quad (5)$$

Nechť je dána síť řídicích bodů $(\mathbf{P}_{i,j})_{i=0,j=0}^{m,n}$ a váhy řídicích bodů $W = (w_{i,j})_{i=0,j=0}^{m,n}$. Nechť je dále dán stupeň p a q a uzlové vektory $U = (u_i)_{i=0}^r, u_0 = a, u_r = b, a, b \in R, r = m + p + 1$ a $V = (v_j)_{j=0}^s, v_0 = c, v_s = d, c, d \in R, s = n + q + 1$. Potom je *NURBS plocha* $\mathbf{S}(u, v)$ stupně (p, q) dána následující vektorovou rovnicí

$$\mathbf{S}(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n R_{i,j}(u, v) \mathbf{P}_{i,j}, u \in [u_p, u_{r-p}], v \in [v_q, v_{s-q}], \quad (6)$$

kde

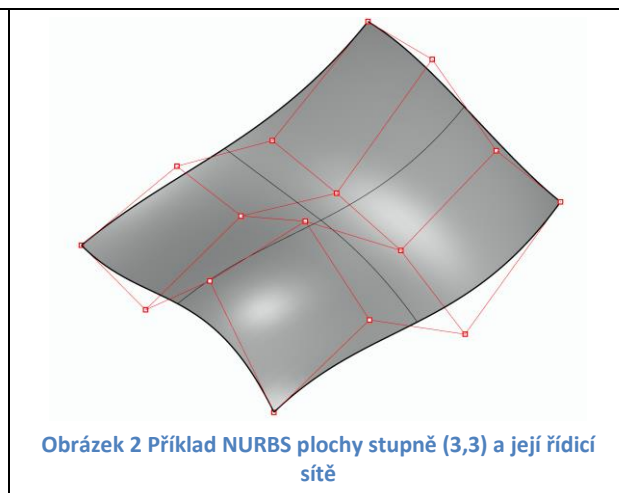
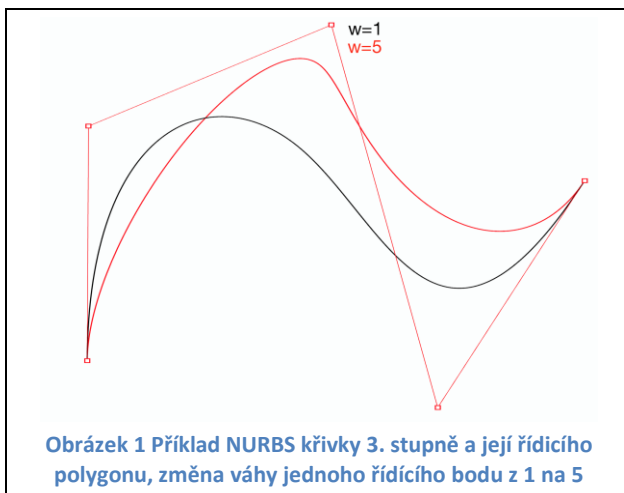
$$R_{i,j}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}} \quad (7)$$

jsou racionální B-spline bázové funkce $N_{i,p}(u), i = 0, \dots, m, u \in [a, b]$, stupně p definovány (3) a $N_{j,q}(v), j = 0, \dots, n, v \in [c, d]$, stupně q definovány rekurentním vzorcem [3]:

$$N_{j,0}(v) = \begin{cases} 1, & v \in [v_j, v_{j+1}), \\ 0, & v \notin [v_j, v_{j+1}) \text{ nebo na uzlové rozteči nulové délky} \end{cases} \quad (8)$$

$$N_{j,l}(v) = \frac{v - v_j}{v_{j+l} - v_j} N_{j,l-1}(v) + \frac{v_{j+l+1} - v}{v_{j+l+1} - v_{i+1}} N_{j+1,l-1}(v), l = 1, \dots, q.$$

Příklad NURBS plochy stupně (3,3) a její řídicí síť je uveden na obrázku 2.



Důležité vlastnosti NURBS křivek a ploch [4, 5]:

- Ukotvená NURBS křivka prochází prvním a posledním bodem řídicího polygonu, ukotvená NURBS plocha prochází rohy řídicí sítě.
- Změna polohy nebo váhy jednoho bodu má vliv jen na část NURBS křivky/plochy.
- NURBS křivky/plochy jsou invariantní vůči geometrickým transformacím a vůči rovnoběžnému a středovému promítání.
- NURBS křivka se nachází v konvexním obalu svého řídicího polygonu, NURBS plocha se nachází v konvexním obalu své řídicí sítě.

3. Spojitost napojení křivek a ploch

Při napojování křivek a ploch je významným faktorem spjitost. Dále jsou uvedené definice a potřebné termíny [3].

Tečný vektor křivky $\mathbf{C}(u)$ je dán rovnicí

$$\mathbf{C}'(u) = \left(\frac{dx'(u)}{du}, \frac{dy'(u)}{du}, \frac{dz'(u)}{du} \right) = (x'(u), y'(u), z'(u)), u \in [a, b]. \quad (9)$$

Potom tečný vektor v bodě $\mathbf{C}(\alpha)$, $\alpha \in [a, b]$ je dán

$$\mathbf{C}'(\alpha) = (x'(\alpha), y'(\alpha), z'(\alpha)). \quad (10)$$

Orientace tečného vektoru je shodná s orientací křivky. Jednotkový tečný vektor $\mathbf{t}(\alpha)$ v regulárním bodě $\mathbf{C}(\alpha)$ křivky $\mathbf{C}(u)$ je dán

$$\mathbf{t}(\alpha) = \frac{\mathbf{C}'(\alpha)}{|\mathbf{C}'(\alpha)|}. \quad (11)$$

kde $|\mathbf{C}'(\alpha)|$ je velikost tečného vektoru křivky v bodě $\mathbf{C}(\alpha)$.

Přímka určená bodem $\mathbf{C}(\alpha)$ a směrovým vektorem $\mathbf{t}(\alpha)$ se nazývá *tečna* t_α křivky $\mathbf{C}(u)$ v jejím bodě $\mathbf{C}(\alpha)$.

Vektorový součin první a druhé derivace vektorové funkce křivky $\mathbf{C}(u)$, $u \in [a, b]$ v bodě $\mathbf{C}(\alpha)$, $\alpha \in [a, b]$, se nazývá *vektor binormály*. Jednotkový vektor binormály $\mathbf{b}(\alpha)$ je dán

$$\mathbf{b}(\alpha) = \frac{\mathbf{C}'(\alpha) \times \mathbf{C}''(\alpha)}{|\mathbf{C}'(\alpha) \times \mathbf{C}''(\alpha)|}. \quad (12)$$

Přímka určená bodem $\mathbf{C}(\alpha)$ a směrovým vektorem $\mathbf{b}(\alpha)$ se nazývá *binormála* b_α křivky $\mathbf{C}(u)$ v bodě $\mathbf{C}(\alpha)$.

Vektorový součin vektoru binormály a tečného vektoru křivky $\mathbf{C}(u)$, $u \in [a, b]$, v bodě $\mathbf{C}(\alpha)$, $\alpha \in [a, b]$, se nazývá *vektor hlavní normály*. Jednotkový vektor hlavní normály $\mathbf{n}(\alpha)$ je dán

$$\mathbf{n}(\alpha) = \mathbf{b}(\alpha) \times \mathbf{t}(\alpha). \quad (13)$$

Přímka určená bodem $\mathbf{C}(\alpha)$ a směrovým vektorem $\mathbf{n}(\alpha)$ se nazývá *hlavní normála* n_α křivky $\mathbf{C}(u)$ v bodě $\mathbf{C}(\alpha)$.

Rovina určená hlavní normálou a binormálou v regulárním bodě $\mathbf{C}(\alpha)$, $\alpha \in [a, b]$ křivky $\mathbf{C}(u)$, $u \in [a, b]$, se nazývá *normálová rovina* v_α . Rovina určená binormálou a tečnou v regulárním bodě $\mathbf{C}(\alpha)$, $\alpha \in I$ křivky $\mathbf{C}(u)$, $u \in [a, b]$, se nazývá *rektifikační rovina* ρ_α . Rovina určená tečnou a hlavní normálou v regulárním bodě $\mathbf{C}(\alpha)$, $\alpha \in [a, b]$ křivky $\mathbf{C}(u)$, $u \in [a, b]$, se nazývá *oskulační rovina* ω_α .

Rozlišujeme první a druhou křivost křivky v okolí bodu $\mathbf{C}(\alpha)$, $\alpha \in [a, b]$.

První křivost- flexe, která charakterizuje míru odchylky křivky od tečny.

$${}^1k(\alpha) = \frac{|\mathbf{C}'(\alpha) \times \mathbf{C}''(\alpha)|}{|\mathbf{C}'(\alpha)|^3}, \quad (14)$$

kde $|\mathbf{C}'(\alpha) \times \mathbf{C}''(\alpha)|$ je velikost vektorového součinu první a druhé derivace křivky. Pro přímku platí, že první křivost je rovna nule. Číslo

$$r(\alpha) = \frac{1}{{}^1k(\alpha)} \quad (15)$$

nazýváme *poloměrem křivosti* v bodě $\mathbf{C}(\alpha)$. Bod $\mathbf{S}(\alpha) = \mathbf{C}(\alpha) + r(\alpha)\mathbf{n}(\alpha)$ ležící v oskulační rovině ω_α na polopřímce určené bodem $\mathbf{C}(\alpha)$ a vektorem $\mathbf{n}(\alpha)$ ve vzdálenosti $r(\alpha)$ od bodu $\mathbf{C}(\alpha)$ se nazývá *střed křivosti* v bodě $\mathbf{C}(\alpha)$. Kružnice se středem v bodě $\mathbf{S}(\alpha)$ a poloměrem $r(\alpha)$ se nazývá *oskulační kružnice* v bodě $\mathbf{C}(\alpha)$.

Druhá křivost- torze, která charakterizuje míru odchylky křivky od oskulační roviny.

$${}^2k(\alpha) = \frac{[\mathbf{C}'(\alpha)\mathbf{C}''(\alpha)\mathbf{C}'''(\alpha)]}{|\mathbf{C}'(\alpha) \times \mathbf{C}''(\alpha)|^2}, \quad (16)$$

kde $[\mathbf{C}'(\alpha)\mathbf{C}''(\alpha)\mathbf{C}'''(\alpha)]$ je smíšený součin vektorů první, druhé a třetí derivace křivky v bodě $\mathbf{C}(\alpha)$. Je-li druhá křivost rovna nule, je křivka rovinná.

Tečné vektory parametrických křivek plochy jsou určeny

$$\mathbf{S}^u(u, v) = \frac{\partial \mathbf{P}(u, v)}{\partial u} = (x^u(u, v), y^u(u, v), z^u(u, v)), \quad (u, v) \in I$$

a

$$\mathbf{S}^v(u, v) = \frac{\partial \mathbf{P}(u, v)}{\partial v} = (x^v(u, v), y^v(u, v), z^v(u, v)), \quad (u, v) \in I$$

Potom *tečné vektory parametrických křivek* $\mathbf{S}^u(u, v)$ resp. $\mathbf{S}^v(u, v)$ v bodě $\mathbf{S}(\alpha, \beta)$ jsou dány

$$\mathbf{S}^u(\alpha, \beta) = (x^u(\alpha, \beta), y^u(\alpha, \beta), z^u(\alpha, \beta))$$

a

$$\mathbf{S}^v(\alpha, \beta) = (x^v(\alpha, \beta), y^v(\alpha, \beta), z^v(\alpha, \beta)).$$

Tečná rovina v bodě plochy $\mathbf{S}(\alpha, \beta)$, $(\alpha, \beta) \in I$ je určena tečnými vektory parametrických křivek $\mathbf{S}^u(\alpha, \beta)$ a $\mathbf{S}^v(\alpha, \beta)$. Vektor

$$\mathbf{n}(\alpha, \beta) = \mathbf{S}^u(\alpha, \beta) \times \mathbf{S}^v(\alpha, \beta) \quad (19)$$

v regulárním bodě $\mathbf{S}(\alpha, \beta)$ se nazývá *vektor normály plochy v bodě* $\mathbf{S}(\alpha, \beta)$. Přímka určená bodem $\mathbf{S}(\alpha, \beta)$ a vektorem normály $\mathbf{n}(\alpha, \beta)$ se nazývá *normála plochy v bodě* $\mathbf{S}(\alpha, \beta)$.

Tečná rovina obsahuje nekonečně mnoho tečen ke křivkám ležícím na ploše. Každá tečna společně s normálou tvoří rovinu normálového řezu, jejímž průnikem s plochou je křivka normálového řezu. Každá křivka normálového řezu má v regulárním bodě \mathbf{A} určitou první křivost, která se nazývá *normálová křivost*. Směry, ve kterých nabývá normálová křivost svého minima, resp. maxima, jsou hlavní směry plochy a jim příslušné hodnoty normálové křivosti jsou hlavní křivosti plochy, které označíme k_{1A} a k_{2A} . Odpovídající oskulační kružnice v bodě \mathbf{A} označíme c_{1A} , c_{2A} .

Gaussova křivost v regulárním bodě \mathbf{A} je dána

$$G = k_{1A} \cdot k_{2A}, \quad (20)$$

kde k_{1A} , resp. k_{2A} je minimální, resp. maximální normálová křivost v daném bodě. Gaussova křivost je kladná, jestliže vektor $\overline{\mathbf{AS}}$, kde \mathbf{S} je střed oskulační kružnice, je shodně orientovaný jako vektor normály n_A . V opačném případě je Gaussova křivost záporná.

Vektor zkrutu v bodě plochy $\mathbf{S}(\alpha, \beta)$ je určen smíšenou druhou parciální derivací vektorové funkce plochy

$$\begin{aligned} \mathbf{S}^{uv}(u, v) &= \frac{\partial^2 \mathbf{S}(u, v)}{\partial u \partial v} = \frac{\partial^2 \mathbf{S}(u, v)}{\partial v \partial u} = (x^{uv}(u, v), y^{uv}(u, v), z^{uv}(u, v)) \\ &= (x^{vu}(u, v), y^{vu}(u, v), z^{vu}(u, v)), \quad (u, v) \in I \end{aligned} \quad (21)$$

Křivka, resp. plocha je spojitá, pokud je spojitá ve všech svých bodech. Křivka, resp. plocha je hladká, pokud jsou ve všech jejích bodech spojitě i její první, resp. parciální první derivace. V případě spojitosti vyšších derivací má křivka, resp. plocha spojitost druhého, třetího a obecně k -tého řádu.

Spojitosť je rozdělena na dva typy: parametrická (označována C) a geometrická (označována G) spojitost.

3.1 Parametrická spojitost

Definice parametrické spojitosti napojení dvou křivek:

Nechť je dána křivka $\mathbf{C}(u)$ vektorovou rovnicí (1), jejíž souřadnicové funkce jsou nejméně C^k spojitě na $[a, b]$. Nechť je dále dána křivka $\mathbf{D}(s)$ vektorovou rovnicí $\mathbf{D}(s) = (\tilde{x}(s), \tilde{y}(s), \tilde{z}(s))$, $s \in [c, d]$, jejíž souřadnicové funkce jsou nejméně C^k spojitě na $[c, d]$. Říkáme, že křivka $\mathbf{D}(s)$ je napojena svým počátečním bodem na koncový bod křivky $\mathbf{C}(u)$ s C^k parametrickou spojitostí, popř. že jsou tyto křivky C^k spojitě napojeny, jestliže platí

$$\mathbf{C}^{(i)}(b) = \mathbf{D}^{(i)}(c), i = 0, 1, \dots, k. \quad (22)$$

Definice parametrické spojitosti napojení dvou ploch:

Nechť je dána plocha $\mathbf{S}(u, v)$ vektorovou rovnicí (5), jejíž souřadnicové funkce jsou nejméně C^k spojitě na I . Nechť je dále dána plocha $\mathbf{R}(s, t) = (\tilde{x}(s, t), \tilde{y}(s, t), \tilde{z}(s, t))$, $(s, t) \in I$, jejíž souřadnicové funkce jsou nejméně C^k spojitě na I . Uvažujeme-li normalizovaný obor parametrizace $I = [0, 1]^2$, říkáme, že plocha $\mathbf{R}(s, t)$ je napojena svým okrajem $\mathbf{R}(0, t)$ na okraj $\mathbf{S}(1, v)$ plochy $\mathbf{S}(u, v)$ s C^k parametrickou spojitostí, popř. že jsou tyto plochy C^k spojitě napojeny, jestliže jsou si rovny vektory prvních k parciálních derivací vektorových funkcí plochy $\mathbf{S}(u, v)$ a plochy $\mathbf{R}(s, t)$ podél okrajů $\mathbf{S}(1, v)$ a $\mathbf{R}(0, t)$ [3].

3.2 Geometrická spojitost

Definice geometrické spojitosti napojení dvou křivek:

Nechť je dána křivka $\mathbf{C}(u)$ vektorovou rovnicí (1), jejíž souřadnicové funkce jsou nejméně C^1 , resp. C^2 spojitě na $[a, b]$. Nechť je dále dána křivka $\mathbf{D}(s)$ vektorovou rovnicí $\mathbf{D}(s) = (\tilde{x}(s), \tilde{y}(s), \tilde{z}(s))$, $s \in [c, d]$, jejíž souřadnicové funkce jsou nejméně C^1 , resp. C^2 spojitě na $[c, d]$. Říkáme, že křivka $\mathbf{D}(s)$ je napojena svým počátečním bodem na koncový bod křivky $\mathbf{C}(u)$ s G^1 , resp. s G^2 geometrickou spojitostí, popř. že jsou tyto křivky G^1 , resp. G^2 spojitě napojeny, jestliže platí

$$\mathbf{C}'(b) = \lambda \cdot \mathbf{D}'(c), \quad \lambda \in \mathbb{R}, \quad (23)$$

resp.

$${}^1k_{\mathbf{C}}(b) = {}^1k_{\mathbf{D}}(c), \quad (24)$$

kde ${}^1k_{\mathbf{C}}(b)$, resp. ${}^1k_{\mathbf{D}}(c)$ je první křivost křivky $\mathbf{C}(u)$, resp. $\mathbf{D}(s)$ v bodě napojení. Takto definovaná spojitost napojení dvou křivek se označuje jako *geometrická spojitost 1.*, resp. *2. řádu* [3].

Vzhledem k tomu, že tečný vektor $\mathbf{R}'(c)$ je λ -násobkem tečného vektoru $\mathbf{P}'(b)$, mají G^1 spojitě napojené křivky totožnou tečnu v bodě napojení. G^2 spojitě napojené křivky mají v bodě napojení totožnou první křivost, tj. totožnou oskulační kružnici, viz obrázky 3, 5, 7.

Definice geometrické spojitosti napojení dvou ploch:

Nechť je dána plocha $\mathbf{S}(u, v)$ vektorovou rovnicí (5), jejíž souřadnicové funkce jsou nejméně C^1 , resp. C^2 spojitě na $[0,1]^2$. Nechť je dále dána plocha $\mathbf{R}(s, t)$ vektorovou rovnicí $\mathbf{R}(s, t) = (\tilde{x}(s, t), \tilde{y}(s, t), \tilde{z}(s, t), (s, t) \in [0,1]^2$, jejíž souřadnicové funkce jsou nejméně C^1 , resp. C^2 spojitě na $[0,1]^2$.

Říkáme, že plocha $\mathbf{R}(s, t)$ je napojena svým okrajem $\mathbf{R}(0, t)$ na okraj $\mathbf{S}(1, v)$ plochy $\mathbf{S}(u, v)$ s G^1 , resp. G^2 geometrickou spojitostí, popř. že jsou tyto plochy G^1 , resp. G^2 *spojitě napojeny*, jestliže jsou totožné tečné roviny obou ploch, resp. jsou si rovny první křivosti parametrických křivek obou ploch podél okrajů $\mathbf{S}(1, v)$ a $\mathbf{R}(0, t)$, viz obrázky 4, 6, 8.

3.3 Geometrická spojitost vyšších řádů

Spojitosti vyšších řádů jsou používány zejména v automobilovém průmyslu, jelikož tím lze dosáhnout výjimečné kvality napojení křivek a ploch. U křivek se G^3 spojitosti dosahuje buď stejnou rychlostí změny křivosti, nebo stejnou druhou křivostí v bodě napojení. Druhý způsob lze použít pouze pro zajištění spojitosti u prostorových křivek. Na obrázku 9 je ukázáno G^3 spojitě napojení dvou křivek 3. stupně. Jelikož G^2 spojitost není od G^3 spojitosti vizuálně odlišná, G^3 spojitosti se používají výjimečně u případů, kde potřebujeme zajistit stabilitu napojení dvou křivek, resp. ploch.

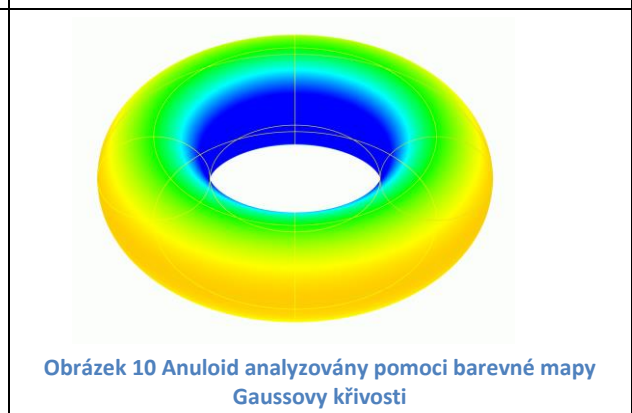
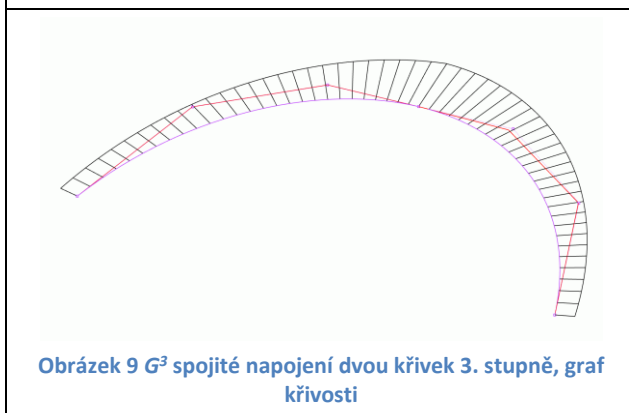
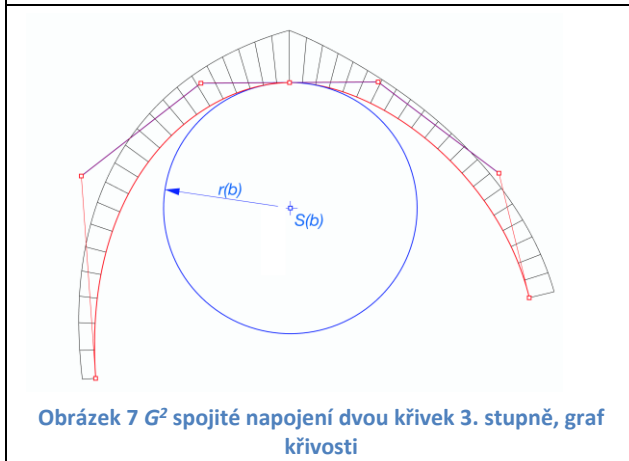
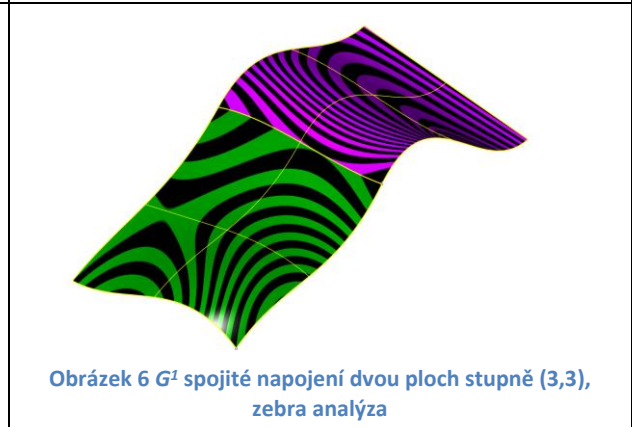
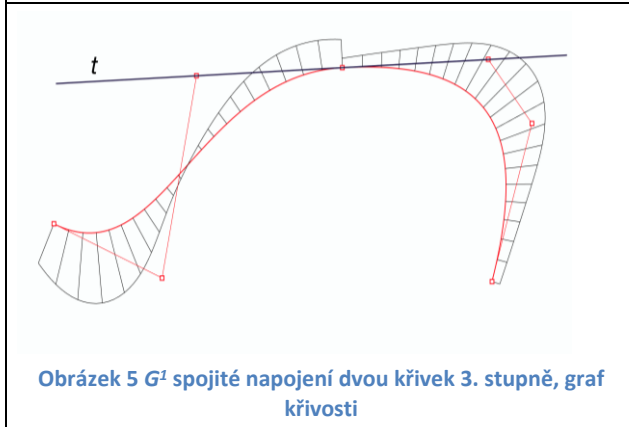
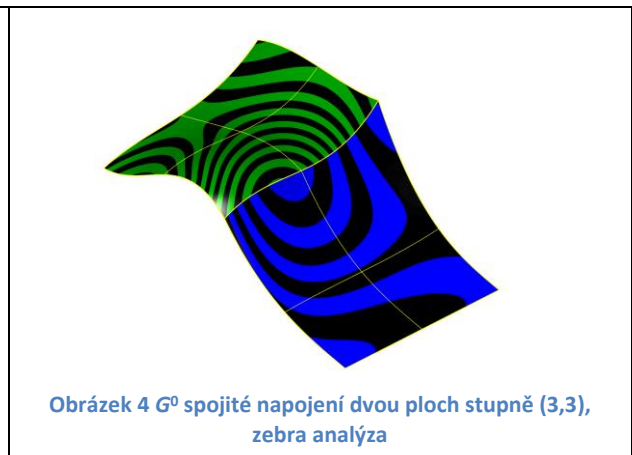
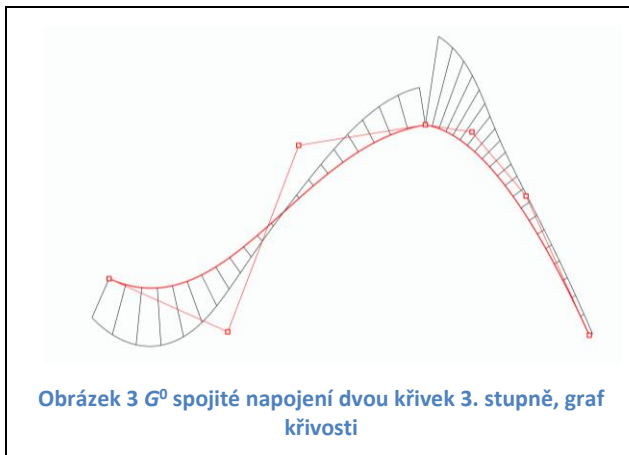
3.4 Analýza kvality napojení

Křivost křivek je možné analyzovat pomocí tzv. *grafu křivosti*. Graf křivosti se zobrazí jako spojnice koncových bodů „normálových úseček“ křivky, jejichž počáteční body leží na křivce. Délka normálové úsečky je úměrná první křivosti křivky v průsečíku normálové úsečky s křivkou. Křivky jsou napojeny minimálně s G^1 spojitostí, jestliže grafy spojitosti na sebe navazují se skokem, viz obrázek 5. Při minimálně G^2 spojení křivek grafy křivosti na sebe navazují se zlomem, viz obrázek 7. Z obrázku 9 je vidět, že při G^3 spojení křivek grafy křivosti se na sebe navazují spojitě a plynule.

Nejpoužívanější analýza ploch je analýza zebřími pruhy. Používá se nejenom při modelování ploch, ale i při výrobě. Při počítačovém modelování se spojitost ploch analyzuje promítáním rovnoběžných pruhů na povrch tělesa. Zde pro snadnější zobrazení je možné nastavit různou hustotu i tloušťku pruhů, směr promítání a další parametry. Analýzu zebřími pruhy lze rozdělit na statickou a dynamickou. Při statické kontrole se pruhy promítají na analyzovaný objekt ve stále stejném zvoleném směru. Při dynamické kontrole se směr promítání pruhů mění v souladu s pohybem analyzovaného objektu, viz obrázek 11. Často se při modelování karosérie automobilu používá statická analýza zebřími pruhy v duhových barvách, viz obrázek 12. Pomocí této analýzy lze jednoduše odhalit nevhodně tvarované části karosérie a zkontrolovat spojitost ploch (např. na středové ose). Tato metoda byla vyvinuta jako počítačová analogie kontrolní linky používané při výrobě automobilových karosérií. Tato speciální linka má speciálně uspořádané světelné zdroje a napojení jednotlivých částí karosérie lze kontrolovat vizuálně, viz obrázky 13, 14, 15, 16.

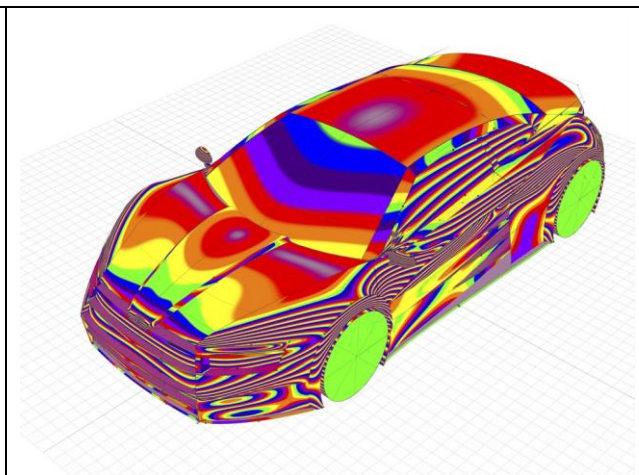
Plochy jsou napojené minimálně s G^0 spojitostí, jestliže jejich pruhy zebry na sebe vůbec nenavazují, viz obrázek 4, minimálně s G^1 spojitostí, jestliže pruhy zebry na sebe navazují se zlomem, viz obrázek 6. Při minimálně G^2 spojení ploch se směr pruhů zebry mění plynule a podél společné hranice ploch nevznikne žádné zlomení pruhů, viz obrázek 8. G^3 spojení ploch není možné rozeznat pomocí analýzy zebřími pruhy (zobrazuje se stejně jako G^2 spojitost).

Další používaný typ analýzy je *barevná mapa Gaussovy křivosti*. V závislosti na nastavení se různými barvami zobrazí pozitivní křivost, negativní křivost a nulová křivost [3]. Na obrázku 10 je ukázán anuloid analyzovaný pomocí barevné mapy Gaussovy křivosti. Modrou barvou je zvýrazněna negativní křivost, oranžovou barvou pozitivní křivost. Nulová křivost podél kráterové kružnice je zobrazena zelenou barvou.





Obrázek 11 Analýza zebřími pruhy



Obrázek 12 Analýza zebřími pruhy v duhových barvách



Obrázek 13 Výrobní kontrola povrchu karosérie [15]



Obrázek 14 Výrobní kontrola povrchu karosérie [16]



Obrázek 15 Výrobní kontrola povrchu karosérie [17]

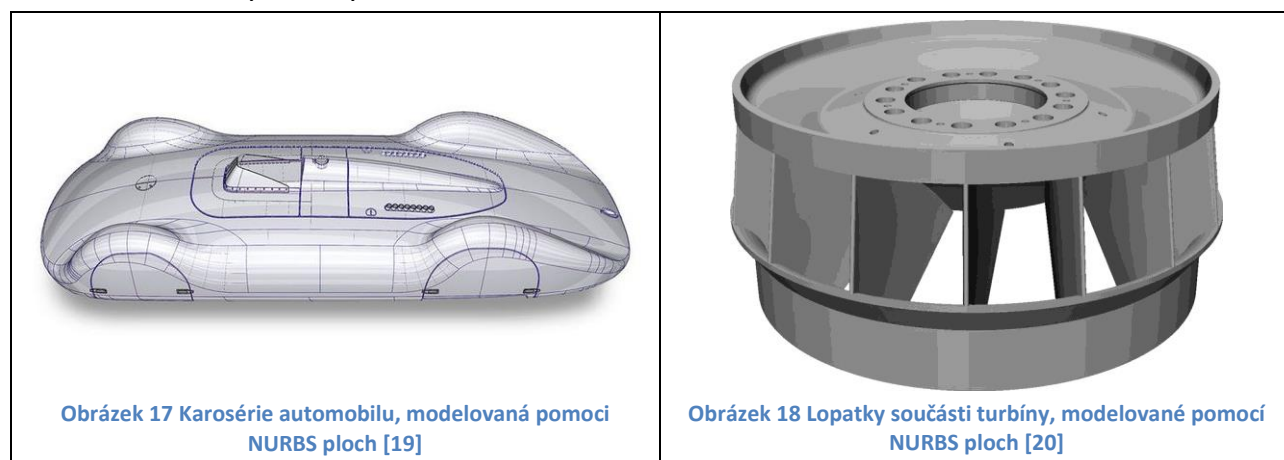


Obrázek 16 Výrobní kontrola povrchu karosérie [18]

4. A-Class modelování

Ve strojírenství se při počítačem podporovaném konstruování v CAD nebo CAID (Computer Aided Industrial Design) systémech používá metoda volného plošného modelování, která spočívá v tom, že pomocí polohy řídicích bodů plochy dosáhneme co nejpřesnějšího popisu povrchů 3D geometrických prvků. Původně byla tato metoda vyvinuta pro automobilový a letecký průmysl, nyní se plošné modelování široce používá ve všech technických a konstrukčních oborech od spotřebního zboží až po technicky složité tvary.

Tato metoda zahrnuje dvě hlavní oblasti. Jedna je vytvoření nejenom esteticky dokonalých a zároveň funkčních ploch (například karosérie automobilu nebo motocyklu, viz obrázek 17). Druhá je vytvoření technických povrchů pro strojírenské komponenty, jejichž vlastnosti ovlivňují dynamické procesy (například lopatky plynových turbín). U takových komponentů jsou důležité jejich technické vlastnosti, nikoliv pohledové. Jako příklad je na obrázku 18 uvedena ukázka 3D plošného modelu součástí Francisovy turbíny.



4.1 A-Class plochy

A-Class modelování je termín používaný pro závěrečnou fázi plošného modelování karosérie automobilu. Výstupem je model, který je tvořen tzv. *A-Class plochami*, jinak také označovanými jako *plochy vysoké kvality*. Termín plochy vysoké kvality v automobilovém průmyslu znamená plochy s plynulými (tečnými, křivostními, torzními) přechody mezi plochami s kontrolovaným dopadem světla a stínů za účelem estetické kvality [6]. V aplikacích jde především o vnitřní nebo vnější plochy, které při běžném používání výrobku vidíme, a u kterých je důležitý estetický dojem a vysoká kvalita povrchu [6]. Plochy, na které nejsou kladené tak vysoké nároky, se označují jako *B-Class plochy* a *C-Class plochy*. B-Class plocha je viditelná při běžném použití, ale velmi zřídka, je to například plocha profilu karosérie, kde dosedají dveře. C-Class plochy jsou plochy, které při běžném použití automobilu nejsou vidět, například plocha součásti na uchycení sedadla.

A-Class plocha může být definována jako jakýkoliv povrch se stylistickým záměrem. Při tvorbě hlavních ploch by měla být zachována jednoduchost a stabilita tzn., že jednotlivé plochy by měly mít co nejméně řídicích bodů a při zpětném zásahu do tvaru plochy (např. extrapolace) by plocha měla zůstat stabilní - nesmí se nekontrolovatelně deformovat [6].

Napojení se realizují příslušnými funkcemi k napojení křivek/ploch či pohybem řídicích bodů v požadovaném směru. Příslušné přechody se poté kontrolují křivostní analýzou a kontrolou dopadu světla. Promítnuté pruhy světla nesmějí být podél společné hranice ploch nijakým způsobem deformovány (přerušeny), musí vyvolávat dojem jednotlivosti plochy.

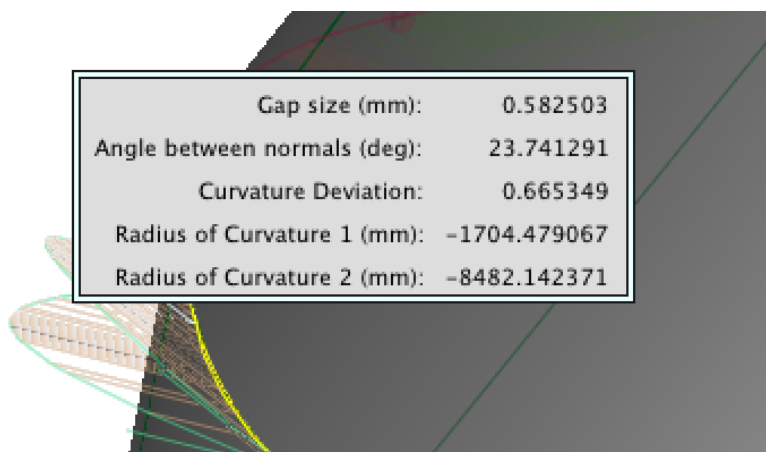
4.2 Výrobní požadavky

Model třídy A vytvořený v příslušném software musí splňovat nejenom estetické a geometrické požadavky na strukturu ploch, ale i určité inženýrské požadavky. Jelikož tyto modely slouží pro výrobu, a to hlavně pro lisování a formování karosérie, musejí mít náležitá zkosení. S ohledem na dosažitelnou výrobu musí být definována i tolerance napojení (při napojení ploch software automaticky minimalizuje odchylku napojení, avšak je vždy třeba zkontrolovat, jestli odchylka souhlasí s normami).

Tolerance, které je třeba kontrolovat při modelování jsou obecně určené požadavky jednotlivých výrobců. Tyto požadavky lze roztřídit následovně [7]:

- Tolerance specifické pro A-Class, B-Class, C-Class plochy.
- Tolerance specifické pro exteriéry a interiéry.
- Tolerance dane pro mezery mezi jednotlivými plochami (maximální hodnota 0,01mm pro A-Class 0,01mm, 0,02 mm. pro B-Class, 0,05mm pro C-Class).
- Tolerance úhlu mezi normálami (maximální hodnota 6' (0.1°) pro A-Class, 12' (0.2°) pro B-Class, 30' (0.5°) pro C-Class).

Na obrázku 19 je ukázána kontrola napojení dvou ploch v software Autodesk Alias, které posuzuje takové parametry napojení, jako je mezera, úhel mezi normálami, odchylka křivosti a poloměry zakřivení.



Obrázek 19 Posouzení kvality napojení. Parametry napojení (mezera, úhel mezi normálami, odchylka křivosti, poloměry zakřivení)

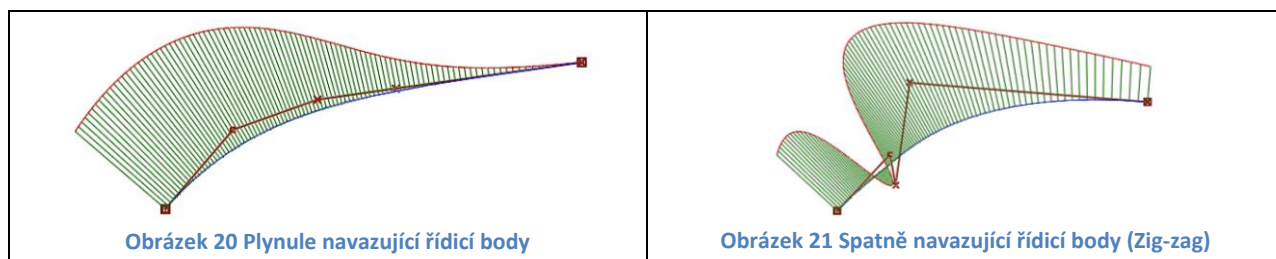
4.3 Základní principy kvalitního plošného modelování

Společnost Autodesk vyvinula následující pravidla, která je vhodné dodržovat při modelování [8].

- **Řídící body musejí plynule navazovat**

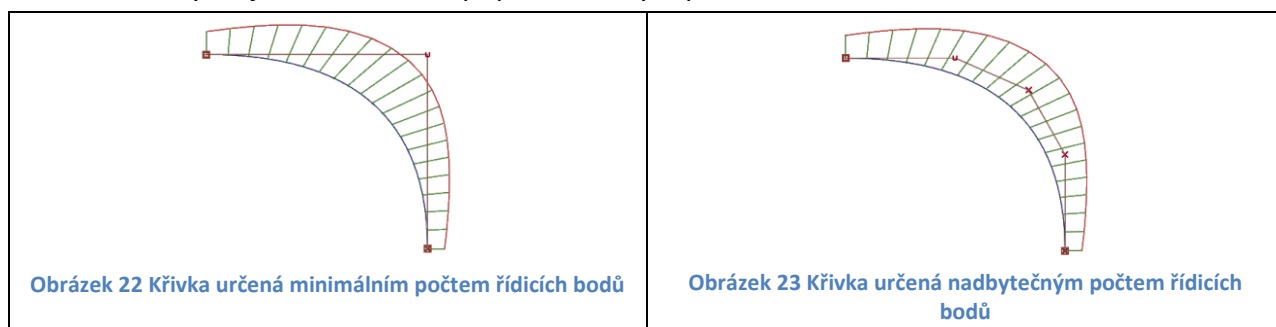
Hladký a pravidelný „tok“ řídicích bodů zajistíme:

1. Použitím hladkých křivek bez nežádoucích „smyček“. Nejlepší cesta je začít modelovat křivkou určenou třemi resp. čtyřmi řídicími body a postupně přidávat další řídicí body a modifikovat jejich polohu tak, aby křivka vhodně vystihla požadovaný tvar.
2. Pomocí rovnoměrného rozmístění řídicích bodů, viz obrázky 20, 21.



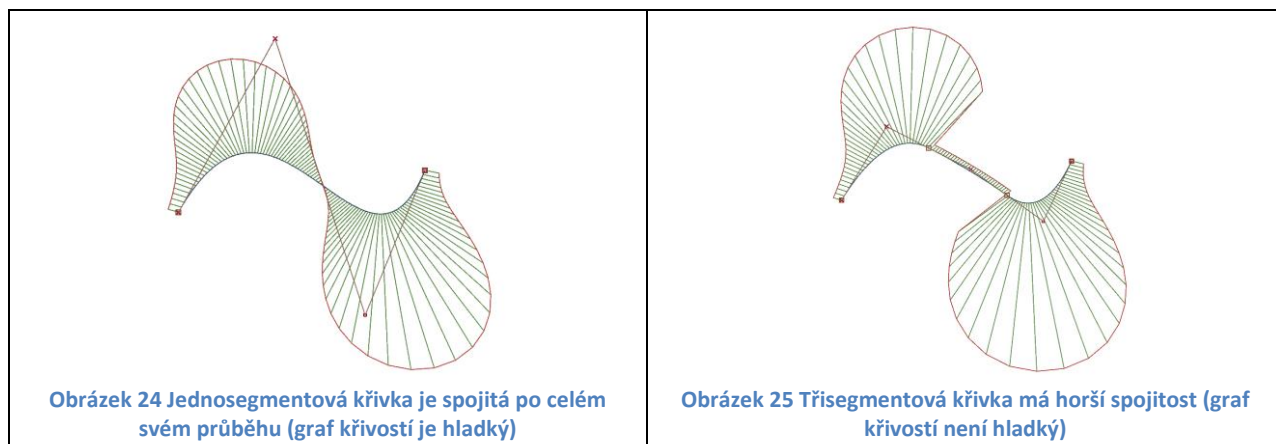
- **Použití minimálního počtu řídicích bodů**

Při vytvoření křivek a ploch se musíme vyhnout vytvoření nadbytečného množství řídicích bodů, a to z důvodu lepší hladkosti povrchu a jednodušší kontroly jeho tvaru, viz obrázky 22, 23, kde jsou uvedené křivky stejného tvaru, ale popsané různým počtem řídicích bodů.



- **Použití jednosegmentových křivek pro hladké navazování**

Pro vytvoření kvalitního povrchu je třeba pokud možno používat jednosegmentové křivky/plochy, jelikož použití vícesegmentových útvarů porušuje kvalitu a celistvost ploch. Na obrázcích 24, 25 jsou uvedené podobné křivky, popsané různými metodami. Křivka na obrázku 20 je 3. stupně a je tvořena jediným segmentem. Na obrázku 24 je znázorněna křivka 2. stupně tvořená třemi segmenty. Z grafu křivosti je vidět, že spojitost křivky na obrázku 25 je výrazně horší. Pro lepší spojitost při použití vícesegmentových křivek musíme použít dostatečný stupeň křivky.



- **Zajistit požadovanou spojitost v rovině souměrnosti**

Karosérie automobilu je ve většině případů souměrná podle podélné roviny. Při vytváření symetrických částí karosérie musíme uvažovat jejich spojitost na středových osách, přičemž spojitosti G^0 a G^1 ve většině případů nejsou dostačující. Na obrázku 26 je uveden příklad plochy čelního skla analyzované zebřímí pruhy a grafem křivostí. Na středové ose je zajištěna G^2 spojitost. Na obrázku 27 jsou plochy napojeny s G^1 spojitostí a z analýzy je zřejmé, že tato spojitost není dostačující.

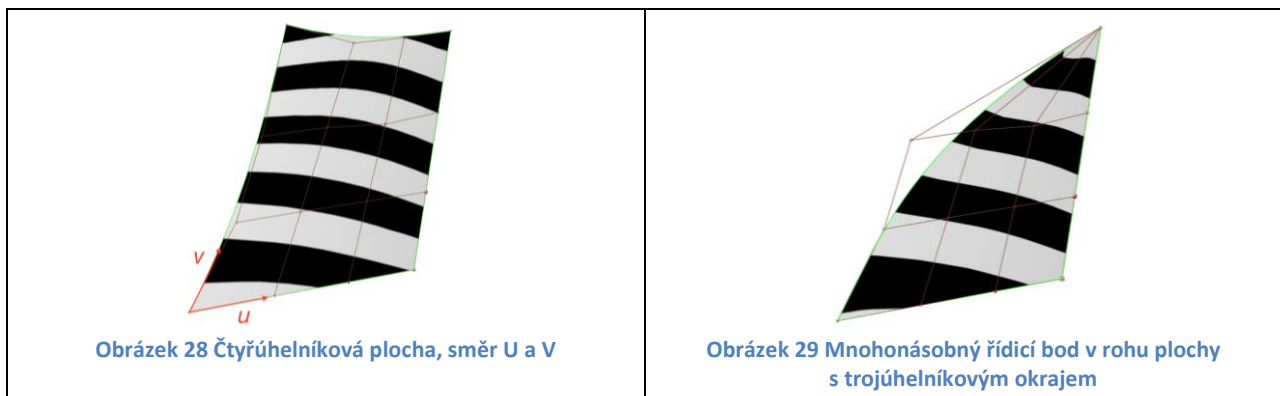


Obrázek 26 Napojení symetrických součástí (čelní sklo)

Obrázek 27 Špatné napojení symetrického objektu

- **Používat čtyřúhelníkové povrchy**

Vzhledem ke dvěma parametrickým směrům u a v , jsou NURBS plochy jsou čtyřúhelníkové. Proto pro vytvoření perfektních povrchů se musíme vyhnout trojúhelníkovým okrajům. Toho můžeme docílit buď oříznutím plochy, nebo vytvořením dalšího okraje. Na obrázku 28 je uvedena čtyřúhelníková plocha a její parametrické směry. Na obrázku 29 je uveden mnohonásobný řídicí bod v rohu plochy s trojúhelníkovým okrajem.

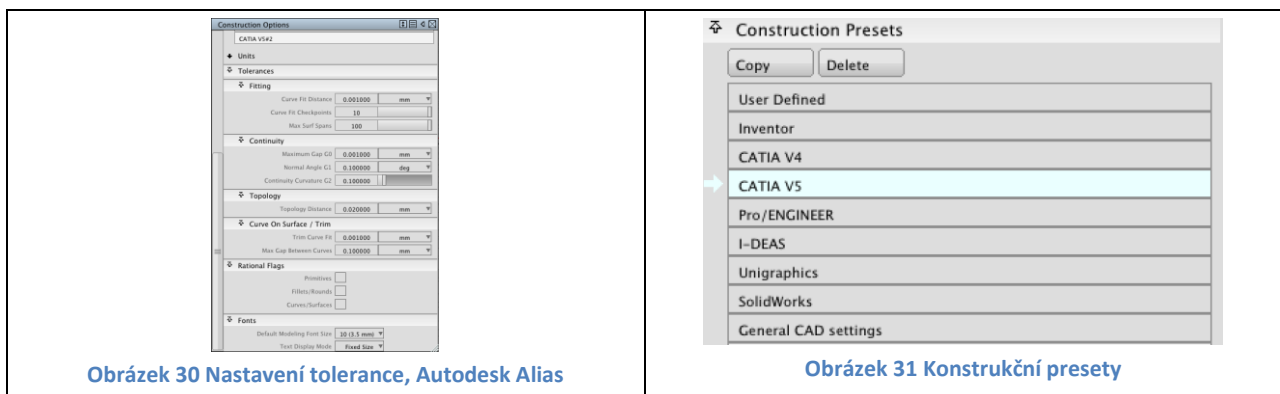


Obrázek 28 Čtyřúhelníková plocha, směr U a V

Obrázek 29 Mnohonásobný řídicí bod v rohu plochy s trojúhelníkovým okrajem

- **Nastavit tolerance před konstruováním**

Pro dosažení požadované kvality napojení ploch je třeba nastavit tolerance před tím, než začneme modelovat. Většina software nabízí buď vybrat tolerance z konstrukčních presetů, viz obrázek 30, nebo možnost zvolit hodnoty tolerance ručně, viz obrázek 31.

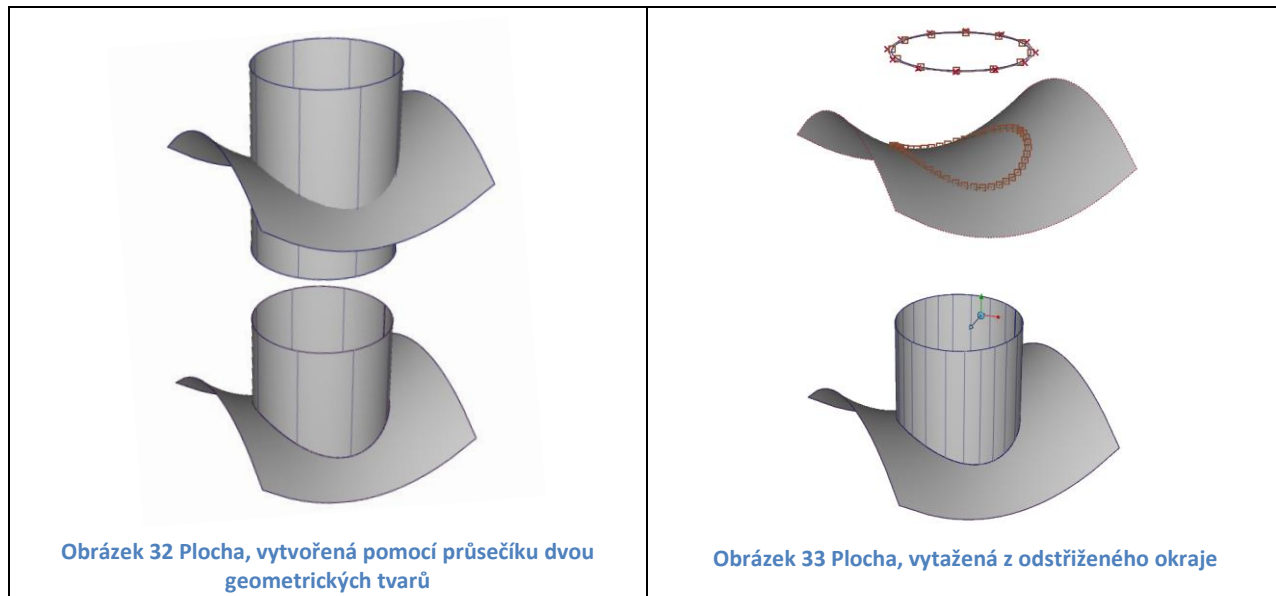


Obrázek 30 Nastavení tolerance, Autodesk Alias

Obrázek 31 Konstrukční presety

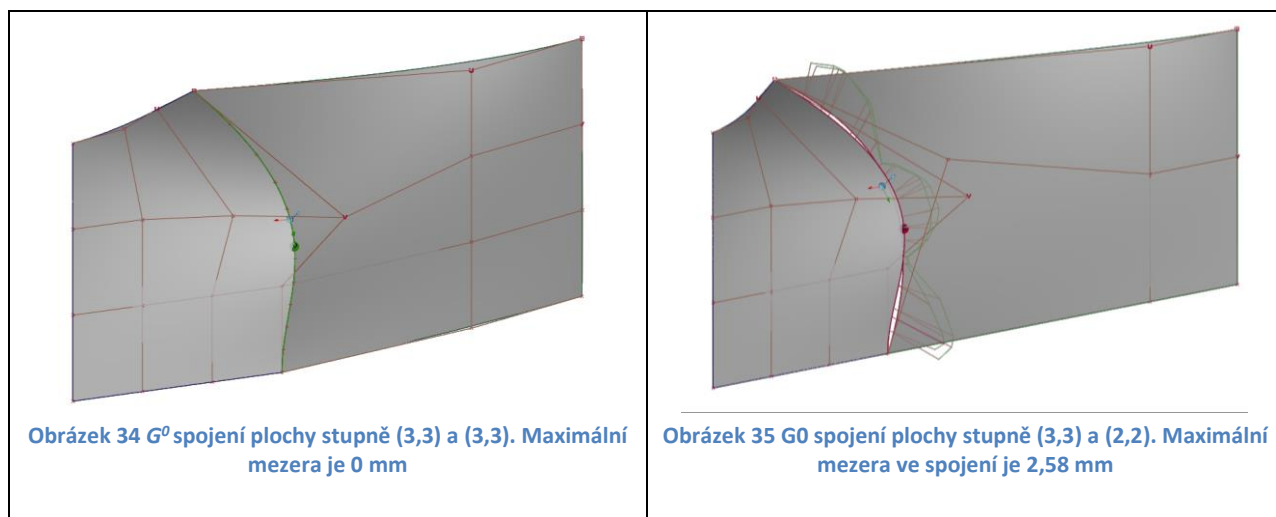
- **Vyhnut se konstrukci ploch na základě křivek promítnutých na plochu**

Kvůli snaze software při promítání křivky dodržovat nastavenou toleranci, má promítnutá křivka na plochu mnohem více segmentů než křivka vytvořená průsečíkem dvou ploch. Proto plocha vytažená z promítnuté křivky není kvalitní. Na obrázku 32 je ukázán správný způsob vytvoření požadovaného tvaru průsečíkem dvou ploch. Na obrázku 33 je vidět křivka, která byla promítnuta na plochu a od promítnutého okraje byla vytažena plocha.



- **Dodržovat stejný stupeň a stejný počet segmentů okrajové křivky**

Pro vytvoření perfektně spojitých ploch je potřeba dodržovat stejný stupeň okrajových křivek. Na obrázku 34 je ukázáno G^0 spojení ploch stejného stupně (3,3). Toto spojení je perfektní, jelikož maximální mezera na styku je 0 mm. Na obrázku 35 je ukázáno G^0 spojení plochy stupně (3,3) a plochy stupně (2,2). Maximální mezera ve spojení je 2,58 mm.



5. Software v automobilovém průmyslu

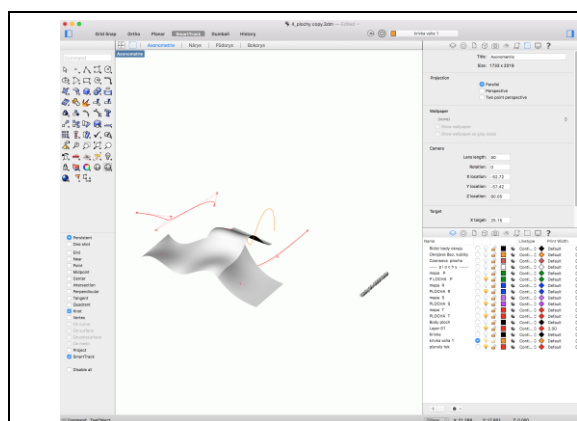
5.1 Rhinoceros

Rhinoceros je komerční software v oblasti 3D počítačové grafiky a počítačově podporovaného navrhování a výroby (CAD, CAM). Aplikace byla vyvinutá Robert McNeel & Associates. Rhinoceros geometrie je založena na NURBS reprezentaci [9].

Rhinoceros je také používán pro rapid prototyping, 3D tisk a reverzní inženýrství v průmyslu, včetně architektury, průmyslového designu (např. automobilového, lodního designu).

Pro tento software existují pluginy, které jsou schopné doplnit jeho funkčnost podle aplikace. Například jsou pluginy určené pro vizualizaci (Brazil for Rhino, Keyshot, Maxwell Render), analýzu mechanických vlastností (ScanSolve, Diva), výrobu na numericky řízených obráběcích strojích (madCAM, RhinoCAM).

Jedním z nejužitečnějších pluginů pro systém Rhinoceros v automobilovém průmyslu je plugin VSR Shape Modelling for Rhino [10]. Tento plugin dovoluje vytvářet, editovat a analyzovat A-Class plochy. Výrobce tohoto pluginu je společnost Autodesk. Program je používán v menších společnostech vyrábějících prvky pro automobilové karosérie a interiéry. Na obrázku 36 je ukázán interface software Rhinoceros. Model vytvořený pomocí software Rhinoceros a pluginu VSP Shape Modelling for Rhino je ukázán na obrázku 37.



Obrázek 36 Interface, software Rhinoceros



Obrázek 37 3D Model, software Rhinoceros [21]

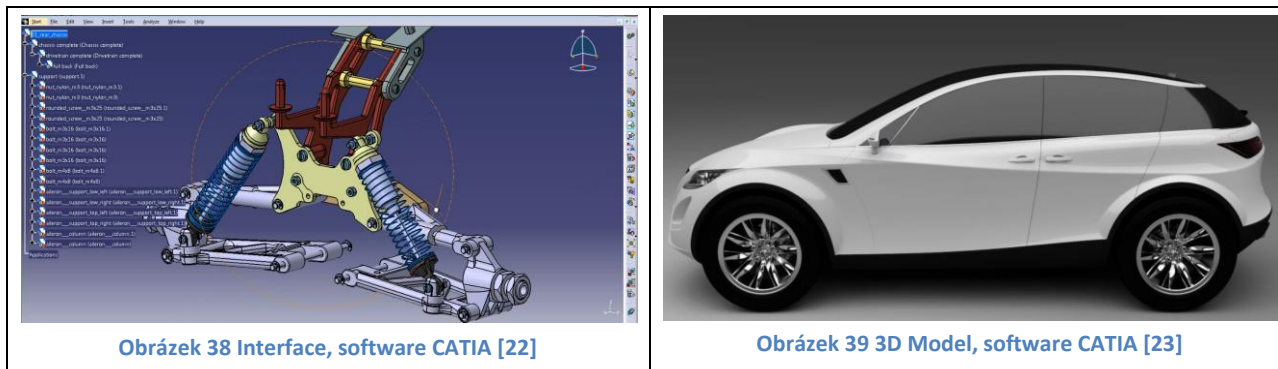
5.2 CATIA

CATIA (Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application) je integrovaný systém počítačového konstruování a výroby CAD/CAM/CAE, vyvinutý francouzskou firmou Dassault Systemes. Jedná se o software podporující trojrozměrný interaktivní návrh, výrobu a inovace velmi složitých výrobků.

Vývoj systému, který byl původně nazván CATI (Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive), vznikl počátkem osmdesátých let v letecké společnosti Avions Marcel Dassault pro vnitřní potřebu společnosti. Během několika let byl přejmenována na CATIA a také se dostal do prodeje. Díky své všestrannosti našel uplatnění ve všech průmyslových odvětvích. Dnes se jedná o nejrozšířenější software v automobilovém průmyslu, který má značné uplatnění i v průmyslu leteckém. Tento systém je vhodný pro využití pro strojírenství, konstrukci forem a nástrojů [11].

Systém CATIA V5 nabízí základní i rozšiřující moduly potřebné k plošnému modelování. Mezi tyto moduly patří i modul GSD (Generative Shape Design). Tento technologicky vyspělý modul nabízí konstruktérům rychle a intuitivně transformovat tvarovou představu do 3D geometrického modelu. Je přítomen ve všech oblastech vyžadujících vytvoření plošného modelu a je propojen s řadou dalších modulů obsažených v programu CATIA V5 [11]. V CATIA plošné modelování se používá také

pro modelování konstrukčních ploch, např. jako geometrií nosníků karosérií vozů. Při modelování vnějších ploch karosérie s důrazem na estetickou kvalitu plochy je často používán ve spojení se software ICEM Surf. Na obrázku 38 je ukázán interface software CATIA. Model vytvořený pomocí software CATIA je ukázán na obrázku 39.



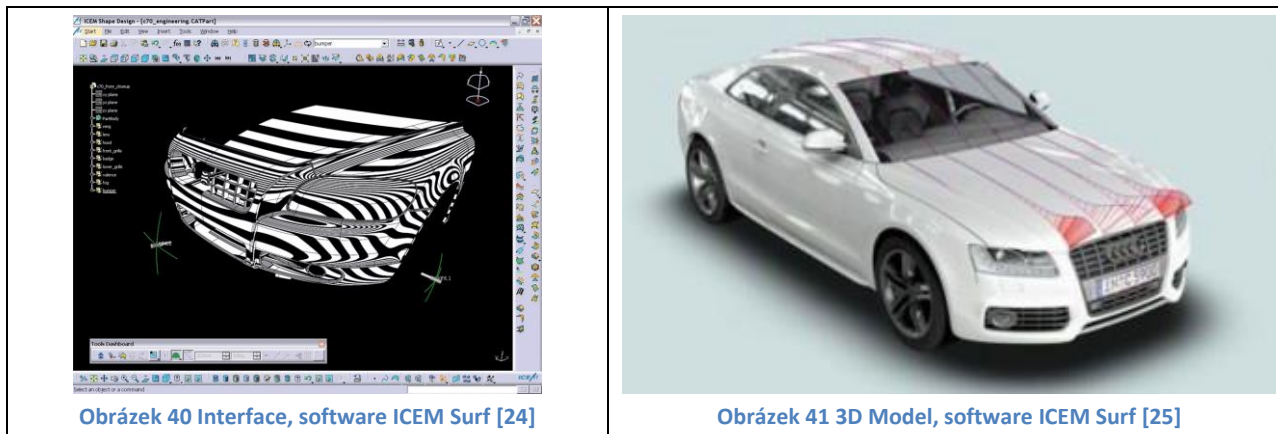
Obrázek 38 Interface, software CATIA [22]

Obrázek 39 3D Model, software CATIA [23]

5.3 ICEM Surf

ICEM Surf je software určený pro plošné modelování vyvinutý a podporovaný společností DASSAULT SYSTEMES. Nespornou výhodou je jeho kompatibilita, neboť na rozdíl od mnoha konkurenčních produktů je vhodný pro použití ve spojení s mnoha dalšími prostředími CAD a stejně tak je vhodný pro Dassault Systèmes CATIA [12]. Jeho nevýhodou je to, že nemá dostupnou studentskou verzi.

ICEM Surf je založen na NURBS geometrii. Systém je sestavený z několika modulů. ICEM Surf Professional je základní modul ICEM Surf pro modelování a modifikaci ploch volného tvaru, který umožňuje vytváření A-Class ploch. Interface software ICEM Surf je mnohem jednodušší v porovnání s konkurenčními systémy a to hlavně díky tomu, že má nástroje pouze pro plošné modelování, viz obrázek 40. Model, vytvořený pomocí software ICEM Surf je ukázán na obrázku 41.



Obrázek 40 Interface, software ICEM Surf [24]

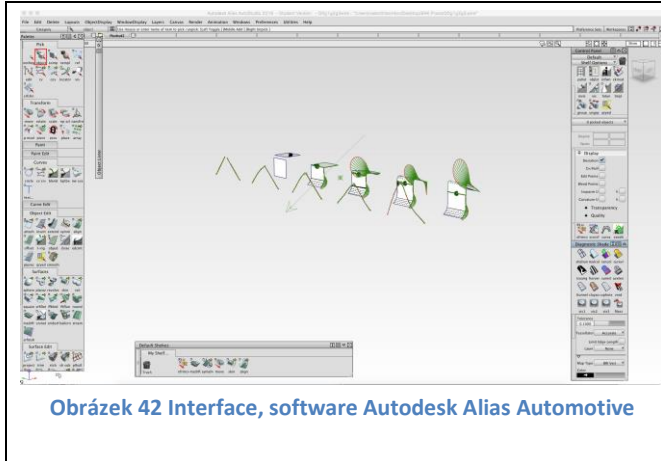
Obrázek 41 3D Model, software ICEM Surf [25]

5.4 Autodesk Alias

Autodesk Alias je sada aplikací pro průmyslový design - součást řešení Autodesk pro tvorbu digitálních prototypů. Virtuální digitální prototypy je možné použít pro celou řadu kontrol a testů ještě před fyzickým vytvořením výrobku nebo jeho prototypu [13].

Sada se skládá z řady produktů: Autodesk Alias Design, Autodesk Alias Surface a Autodesk Alias Automotive. Alias Design je nástroj, určený designérům, v němž lze vytvořit prototyp podle vlastního návrhu. Alias Surface je jeho rozšířenou verzí a umožňuje více možností při práci s plochami a jejich analýzy. Alias Automotive je vrcholem této sady. Obsahuje všechny nástroje z Alias Surface a Alias Design a plně podporuje A-Class modelování. Slouží pro návrh modelů a stylů v oblasti automobilového průmyslu. Obsahuje nástroje pokrývající celý proces navrhování tvarů - od náčrtů po A-Class plochy [13]. Na obrázku 42 je ukázán interface software Autodesk Alias

Automotive. Model, vytvořený pomocí software Autodesk Alias je ukázán na obrázku 43.



Obrázek 42 Interface, software Autodesk Alias Automotive



Obrázek 43 3D Model, software Autodesk Alias Automotive

Pro praktickou aplikaci byl v této bakalářské práci zvolen software Autodesk Alias Automotive především kvůli tomu, že je nejpoužívanější ve velkých automobilových společnostech a také z důvodu dostupnosti studentské verze a dostupnosti návodů.

6. Vytvoření modelu karosérie automobilu

Způsob vytvoření plošného modelu se liší podle jeho dalšího použití. Pro rychlé přiřazení ploch polygonální sítě (viz dále) v obalové technice nebo v animačním průmyslu se nevyžaduje hladkost, ale spíše rychlost vykreslení. Používají se tzv. rychlé plochy (rapid surfaces), u nichž je požadovaná spojitost G^0 , tj. poziční napojení. Pro technické plochy (technical surfaces) je používána spojitost G^1 . Tyto plochy se používají nejvíce v 3D modelování, konstrukci forem a nástrojů. Plochy používané pro designové části výrobku vyžadují kvalitnější spojitost napojení, tj. G^2 . V případě, že je na plochu kladen velký nárok na kvalitu a estetičnost, jako např. exteriérové a interiérové díly automobilu, je vhodné použít A-Class plochy.

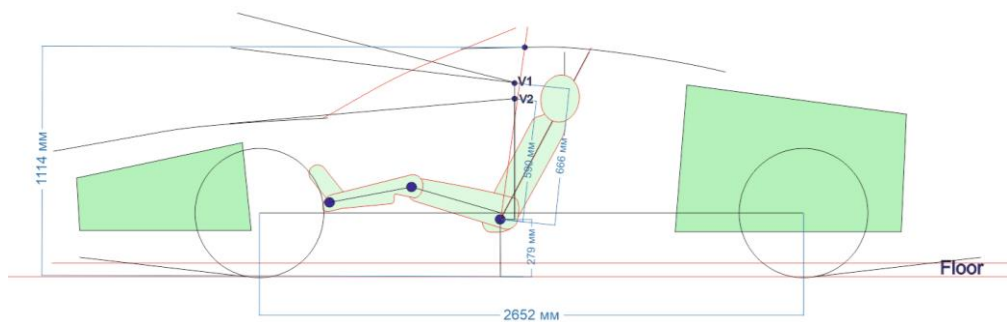
6.1 Proces návrhu karosérie

Při návrhu karosérie automobilu se postupuje následovně. Designer od inženýra dostává tzv. package, což jsou pohledy automobilu s prokresleným Oscarem a prostorem pro technické prvky automobilu, viz obrázek 44. Oscar je maketa člověka umístěného do navrhovaného automobilu v souladu se normami: SAE J826 (ISO 6549), SAE J1110, SAE J941 [14]. Následně designéři zpracují náčrtky budoucího automobilu, a to od prvního návrhu až po finální vzhled. Na této etapě se využívá jak obyčejná kresba tužkou, tak i kresba pomocí tabletu přímo ve specializovaném software jako např. Adobe Photoshop, Autodesk SketchBook. Hotové náčrty se předávají inženýrsko-modelářskému týmu, který je ve spolupráci s designérem zpracuje do 3D plošného modelu bez uvažování výrobních tolerancí. Tento prvotní plošný model slouží hlavně k první vizualizaci automobilu a pro upřesnění jeho designu [7]. Následně je vyrobena maketa, a to buď vytištěním na 3D tiskárně nebo frézováním, viz obrázek 45. Model se může vyrábět v různém měřítku, a to od menších 1:15 do skutečného rozměru 1:1.

Maketu dále zpracovává designér-sochař, který pomocí hlíny upřesní požadované detaily, a odstraní nepřesnosti výroby, viz obrázek 46. Další etapa je skenování hliněného modelu, kdy vznikne mrak bodů, ze kterého se vytvoří polygonální síť. Skenování se může provádět opticky nebo pomocí dotykové metody. Na obrázku 47 je vidět proces skenování makety pomocí dotykového měřicího stroje. Následně se tato polygonální síť upravuje, odstraňují se různé nežádoucí části (např. naskenovaná podložka) a eliminují se chyby skeneru. Potom je síť připravena k dalšímu plošnému zpracování, viz obrázek 48.

V případě, že maketu není možné vytvořit, lze použít tzv. obalovou metodu. Plošný model se exportuje do polygonální sítě a následně se tato síť obaluje pomocí kvalitnějších ploch. Tyto kroky se mohou několikrát opakovat, dokud není výsledný tvar karosérie vyhovující. Jakmile je design ukončen, přichází fáze A-Class modelování. A-Class modelování představuje metodickou a časově velmi náročnou činnost, právě z tohoto důvodu se k němu přistupuje pouze na konci projektového procesu. Při A-Class modelování se model zpracuje ve skutečném měřítku s dodržováním všech výrobních požadavků a tolerancí. Po zpracování se model exportuje do CAM software, kde jsou generované formy pro lisování nebo další technologie výroby jednotlivých částí karosérie. Celý postup při vývoji karosérie je ukázán na obrázku 49.

Tento proces se může v detailech lišit v různých společnostech, a to z důvodu různých používaných technologií. Rámcový postup však zůstává stejný.



Obrázek 44 Package, umístění Oscara



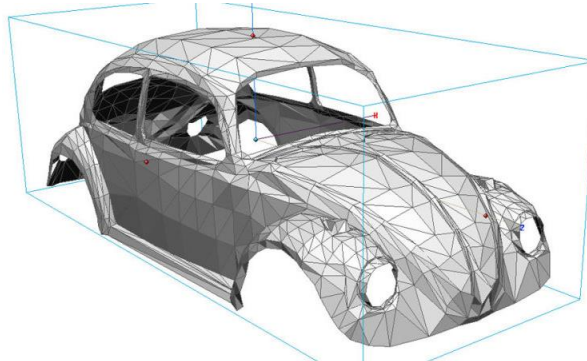
Obrázek 45 Frézování hliněného modelu [26]



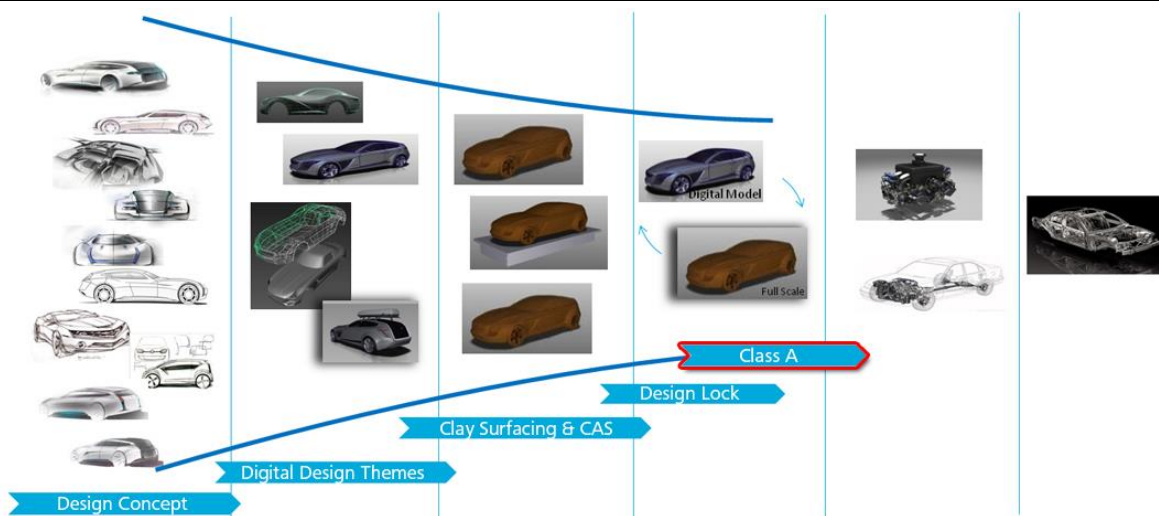
Obrázek 46 Práce sochaře na modelu karosérie v měřítku 1:1 [27]



Obrázek 47 Skenování hliněného modelu [28]



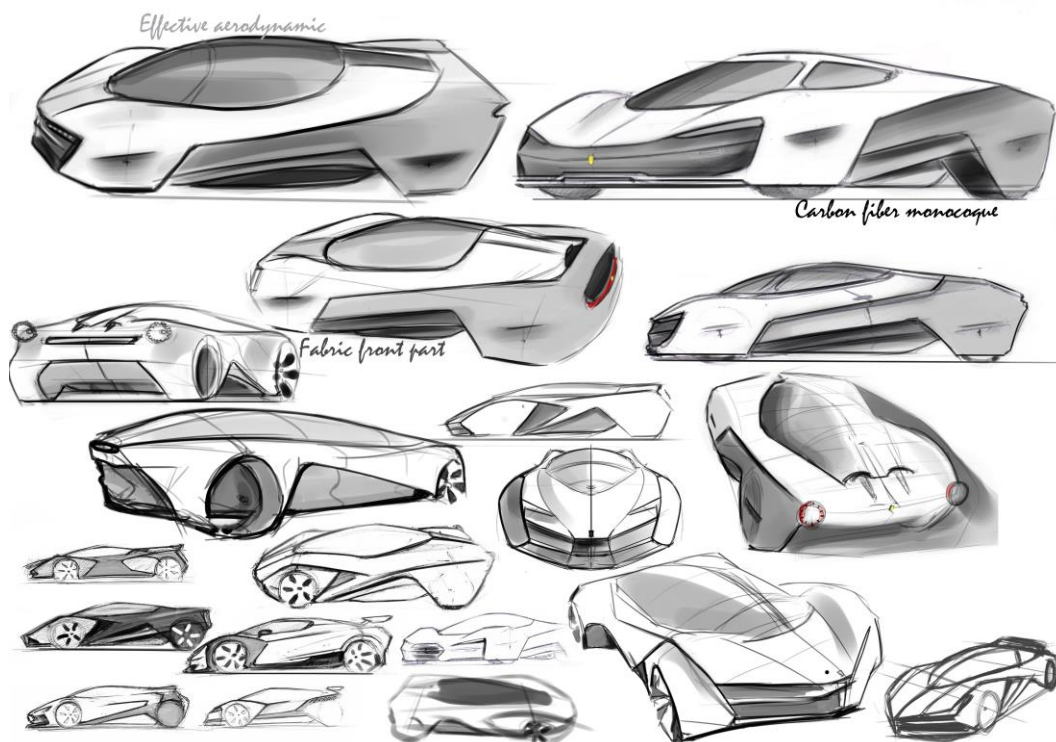
Obrázek 48 Polygonální síť [29]



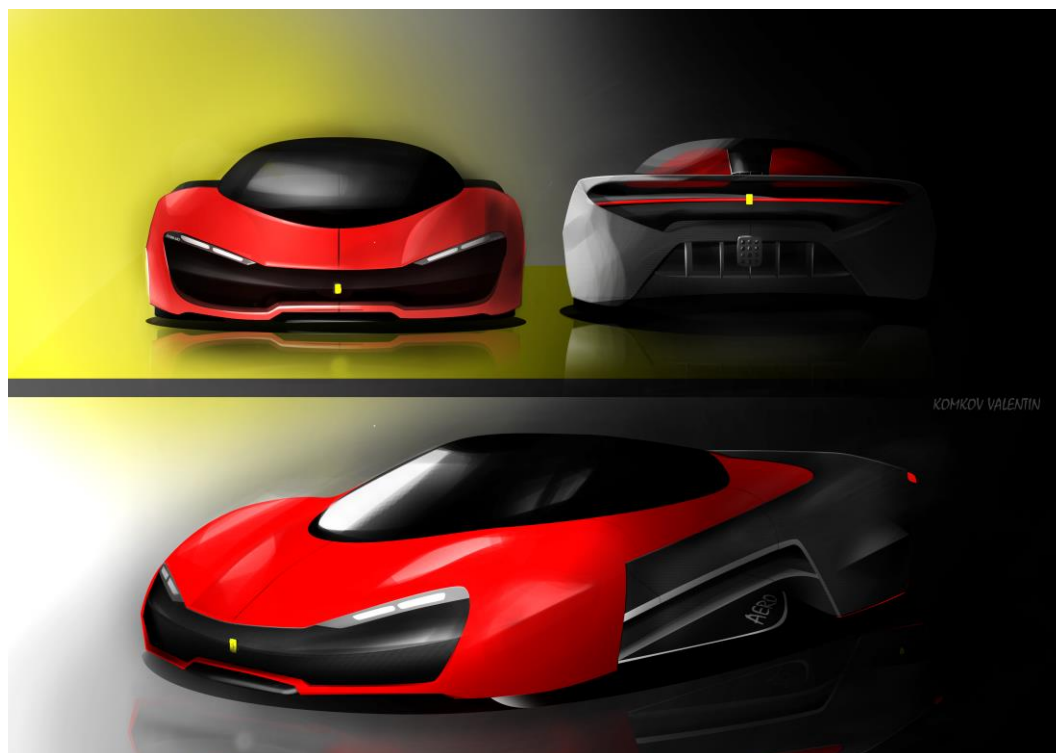
Obrázek 49 Vývoj designu [30]

6.2 Vlastní návrh

V rámci předmětu „Design v konstrukci strojů“ jsem navrhl package (pohledy automobilu s prokresleným Oscarem, viz obrázek 44) podle platných norem (SAE J826 (ISO 6549), SAE J1110, SAE J941) pro automobil třídy Supersport s motorem umístěným uprostřed. Na obrázku 50 jsou uvedeny vývojové náčrty, vytvořené v software Adobe Photoshop, ze kterých je zřejmý postup návrhu konečného tvaru karosérie. Na obrázku 51 jsou tzv. klíčové náčrty. Klíčové náčrty jsou podklady, kterými končí první fáze návrhu karosérie.

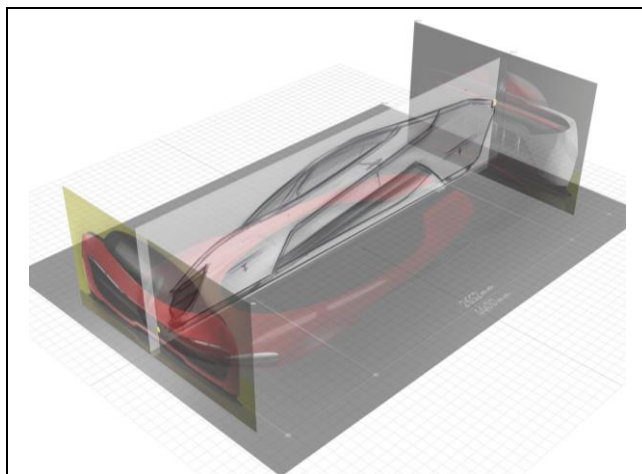


Obrázek 50 Vývojové náčrty

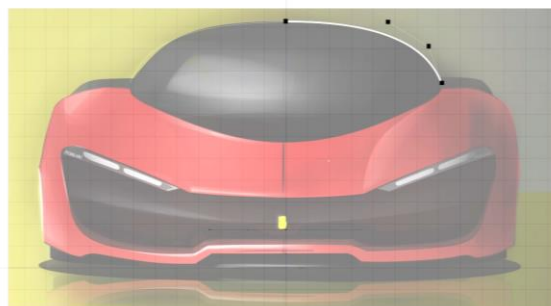


Obrázek 51 Klíčové náčrty

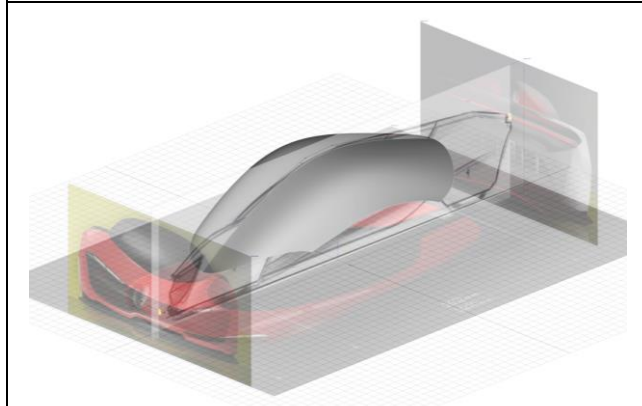
Následně byly tyto náčrtky importovány do prostředí Autodesk Alias jako podkladové obrázky (Canvas Images) do rovin xy , xz , yz , viz obrázek 52. Podle tvaru karosérie na těchto obrázcích byly vymodelovány hrubé tvary ploch. Při tomto modelování byly zvoleny velké tolerance a nebyla důsledně dodržována pravidla, uvedená v kapitole 4.3. Na obrázcích 53, 54 jsou ukázány podkladové náčrty a vytvořená plocha střešního skla. Model celé karosérie automobilu je ukázán na obrázku 55. Následně byl tento model exportován jako polygonální síť. Postup přesného modelování s uvažováním tolerancí je uveden v kapitole 6.4.



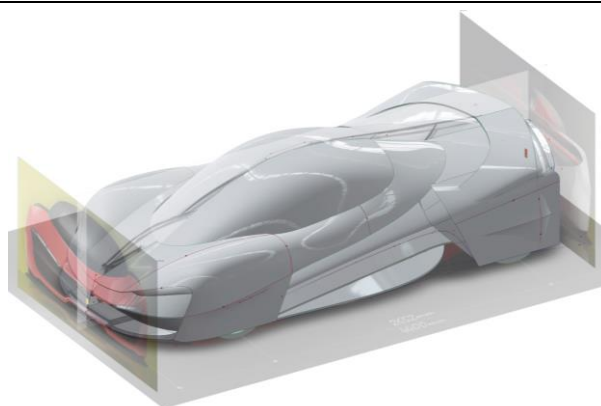
Obrázek 52 Importované náčrtky



Obrázek 53 Vytvoření plochy střešního skla



Obrázek 54 Vytvořená plocha skla



Obrázek 55 Vymodelovaná karosérie podle importovaných náčrtů

6.3 Popis nejdůležitějších funkcí

Pick/ Pick Object Tool – nástroj pro výběr objektu.

Transform/ Scale – zobrazení manipulátoru pro pohyb, rotace, změnu velikosti modifikovaného objektu.

Transform CV – ruční kontrola řídicích bodů plochy resp. křivky.

Surfaces/ Square – vytvoření plochy určené čtyřmi okrajovými křivkami. Při navazování těchto ploch lze kontrolovat spojitosti na každém z okrajů.

Surfaces/ Multi-Surface draft – vytvoření plochy pomocí vytažení křivky v zadaném směru.

Surfaces/ Rail (BiRail) – vytvoření plochy pomocí protažení tvořící křivky podél zadané cesty resp. dvou cest.

Surfaces/ Plane – vytvoření roviny jako NURBS plochy s koplanárními řídicími body. Změnou polohy řídicího bodu lze dosáhnout požadovaného tvaru plochy.

Object Edit/ Extend – vytažení nové plochy resp. protažení plochy se zachováním G^2 spojitosti.

Object Edit/ Align – napojení okraje jedné plochy na druhou s požadovanou spojitostí.

Object Edit/ Symmetry Plane Align – zajištění spojitosti v rovině symetrie (např. na středové ose).

Surface Edit/ Intersect – průsečík dvou nebo více ploch, vytvoření křivek na místech průsečíku.

Surface Edit/ Project – promítnutí křivky v zadaném směru na povrch.

Surface Edit/ Trim – odříznutí části plochy.

Surfaces/ Surface Fillet Control – vytvoření plynulého přechodu mezi navazujícími plochami s požadovanou spojitostí (maximálně G^3).

Surfaces/ Skin Control – vytvoření plochy ze dvou okrajů. Při navazování těchto ploch lze kontrolovat spojitosti na každém z okrajů.

Evaluate/ Curve Curvature Tool – zobrazení grafu spojitosti křivky resp. okraje plochy.

Evaluate/ Surface Continuity Tool – kontrola požadované spojitosti ploch.

Preferences/ Construction options – volba konstrukčních požadavků.

6.4 Praktická aplikace znalostí

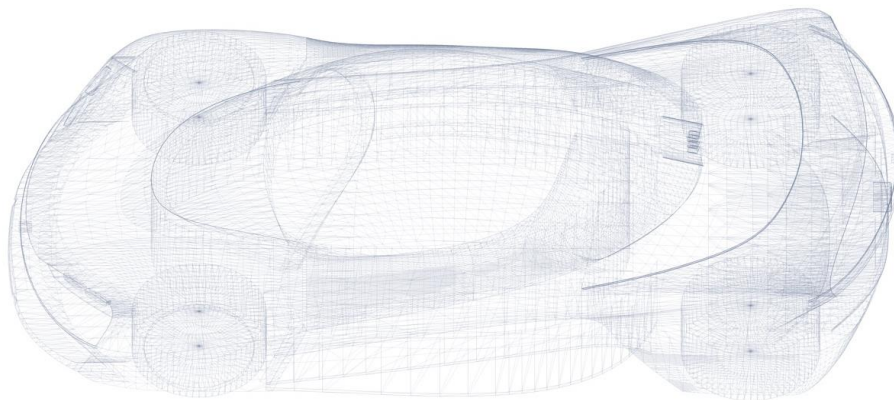
Vzhledem k symetrii karosérie se modeluje pouze polovina. Software Autodesk Alias má k dispozici nástroje pro modelování v symetrickém režimu. Modelování se provádí v axonometrickém pohledu v měřítku 1:1. Celý postup modelování je zobrazen na obrázcích 56-86, kde modifikovaná součást je zvýrazněna žlutou barvou. Byly zvolené tolerance odpovídající software CATIA V5:

- Maximální mezera při G^0 spojitém napojení ploch: 0,001 mm
- Maximální úhel mezi normálami při G^1 spojitém napojení: 6' (0.1°)
- Maximální úhel mezi normálami při G^2 spojitém napojení: 6' (0.1°)

Pořadí	Popis	Použité funkce
1.	Import polygonální sítě do prostředí Autodesk Alias. Ihned po importu nastavení tolerance napojení ploch, odpovídající A-Class modelování, viz obrázek 56.	File/ Import .obj Preferences/ Construction options
2.	Vytvoření válcových ploch kol, viz obrázek 57.	Object/ Cillinder Transform/ Move Transform/ Scale Transform/ Non-proportional scale
3.	Vytvoření plochy popisující kapotu automobilu. Zajištění tečnosti na středové ose viz obrázek 58.	Surfaces/ Plane Objekt Edit/ Symmetry plane align Trasform CV
4.	Plocha popisující horní část předního blatníku. Navazuje s G^0 spojitostí na kapotu, viz obrázek 59.	Curves/ New CV curves Curve Edit/ Duplicate Trasform CV Surfaces/ Square
5.	Plocha popisující dolní část předního blatníku. Navazuje s G^0 spojitostí na kapotu, viz obrázek 60.	Curves/ New CV curves Curve Edit/ Duplicate Trasform CV Surfaces/ Square
6.	Plocha popisující boční část karosérie, požadovaná spojitost G^2 s plochou karosérie, viz obrázek 61.	Curves/ New CV curves Trasform CV Surfaces/ Rail
7.	Plochy popisující přední nárazník. Plocha zvýrazněná žlutou barvou musí navazovat na plochu blatníku se spojitostí G^2 a musí být zajištěna její tečnost na středové ose, viz obrázek 62.	Curves/ New CV curves Trasform CV Surfaces/ Multi-Surface draft
8.	Průsečík a následné oříznutí ploch předního nárazníku, viz obrázek 63.	Surface Edit/ Intersect Surface Edit/ Trim
9.	Vytvoření ploch přední části nárazníku, viz obrázek 64.	Curves/ New CV curves Surfaces/ Multi-Surface draft
10.	Plochy popisující dolní části nárazníku a jejich následné oříznutí, viz obrázek 65.	Curves/ New CV curves Surfaces/ Multi-Surface draft Surface Edit/ Intersect Surface Edit/ Trim
11.	Vytvoření vnitřních ploch nárazníku (žluté) a jejich průsečík a vzájemné oříznutí, viz obrázek 66.	Surfaces/ Multi-Surface draft Surface Edit/ Intersect Surface Edit/ Trim
12.	Průběžná analýza spojitosti ploch (dynamická analýza zebřími pruhy). Kontrola napojení všech ploch, kontrola splnění konstrukčních požadavků, viz obrázek 67.	Diagnostic Shade/ Horizontal Zebra Diagnostic
13.	Vytvoření ploch podlahy automobilu, zajištění tečnosti na středových osách, viz obrázek 68.	Object/ Plane Trasform CV Object edit/ Align Objekt Edit/ Symmetry plane align

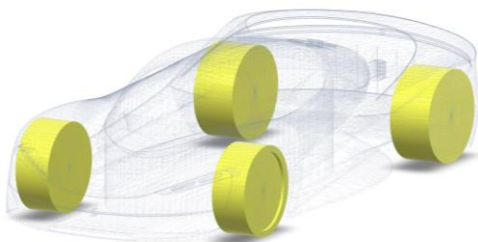
Pořadí	Popis	Použité funkce
14.	Vytvoření ploch dolní boční částí karosérie, viz obrázek 69.	Surfaces/ Multi-Surface draft Trasform CV
15.	Plochy popisující horní boční části karosérie, viz obrázek 70.	Trasform CV Surfaces/ Square
16.	Vytvoření ploch zadní části automobilu, viz obrázek 71.	Object Edit/ Extend
17.	Vytvoření ploch zadního nárazníku, viz obrázek 72.	Surfaces/ Multi-Surface draft Trasform CV Surfaces/ Square
18.	Plochy popisující zadní spoiler. G^2 spojitě napojení na boční část karosérie. Oříznutí promítnutou křivkou, viz obrázek 73.	Object/ Plane Object edit/ Align Surface Edit/ Project Surface Edit/ Trim
19.	Plochy popisující zadní kryt kola. Horní část krytu navazuje s G^2 spojitostí na zadní spoiler, viz obrázek 74.	Surfaces/ Square Trasform CV
20.	Plochy popisující zadní část automobilu, viz obrázek 75.	Surfaces/ Multi-Surface draft Trasform CV
21.	Vytvoření ploch popisujících detaily zadní části karosérie, viz obrázek 76.	Curves/ New CV curves Surfaces/ Rail Trasform CV
22.	Plocha popisující sklo a střechu automobilu. Zajištění tečnosti na středové ose, viz obrázek 77.	Object/ Plane Trasform CV Objekt Edit/ Symmetry plane align
23.	Průsečík a oříznutí plochy skla, viz obrázek 78.	Surface Edit/ Intersect Surface Edit/ Trim
24.	Vytvoření ploch popisujících vnitřní plochy blatníku, viz obrázek 79.	Surfaces/ Multi-Surface draft Trasform CV
25.	Vytvoření ploch popisujících vnitřní plochy boční části karosérie, viz obrázek 80.	Surfaces/ Multi-Surface draft Trasform CV
26.	Plochy popisující zadní spoiler. Zajištění tečnosti na středové ose, viz obrázek 81.	Surfaces/ Multi-Surface draft Object edit/ Align Surfaces/ Skin Control
27.	Průsečík a oříznutí ploch předního nárazníku, viz obrázek 82.	Surface Edit/ Intersect Surface Edit/ Trim
28.	Průsečík a oříznutí ploch zadního nárazníku, viz obrázek 83.	Surface Edit/ Intersect Surface Edit/ Trim
29.	Průsečík a oříznutí ploch boční části automobilu, viz obrázek 84.	Surface Edit/ Intersect Surface Edit/ Trim
30.	Zaoblení hran, požadovaná spojitost G^2 , viz obrázek 85.	Surfaces/ Surface Fillet tool
31.	Zaoblení hran, požadovaná spojitost G^2 , viz obrázek 86.	Surfaces/ Surface Fillet tool

1.



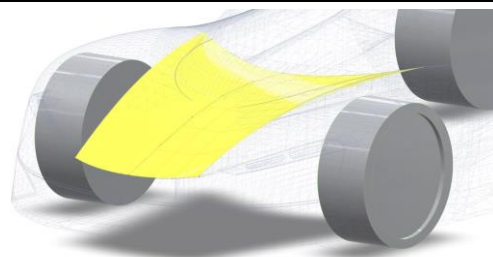
Obrázek 56 Importovaná polygonální síť

2.



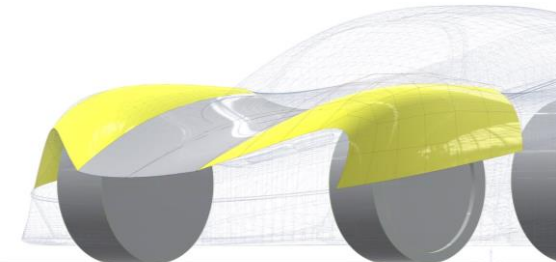
Obrázek 57 Vytvoření válcových ploch kol

3.



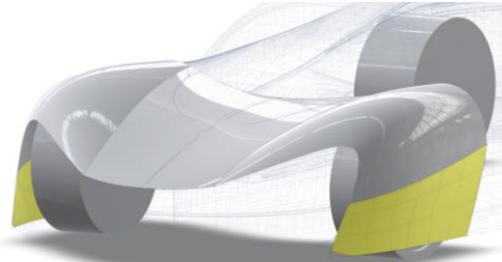
Obrázek 58 Vytvoření kapoty automobilu

4.



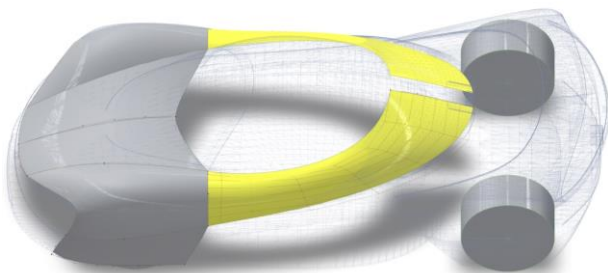
Obrázek 59 Horní část předního blatníku

5.



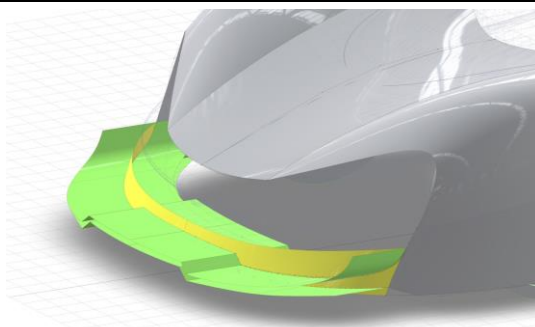
Obrázek 60 Dolní část předního blatníku

6.



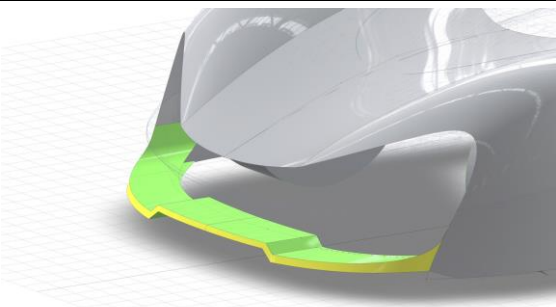
Obrázek 61 Boční části karosérie

7.



Obrázek 62 Plochy předního nárazníku

8.



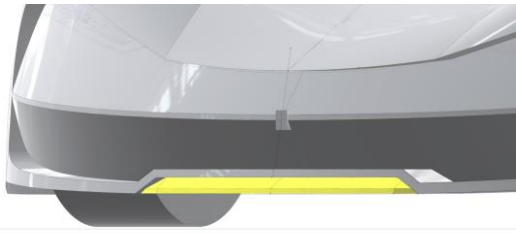
Obrázek 63 Průsečík a následné oříznutí ploch předního nárazníku

9.



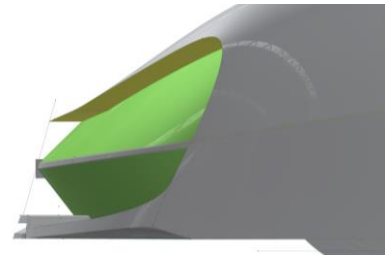
Obrázek 64 Plochy přední části nárazníku

10.



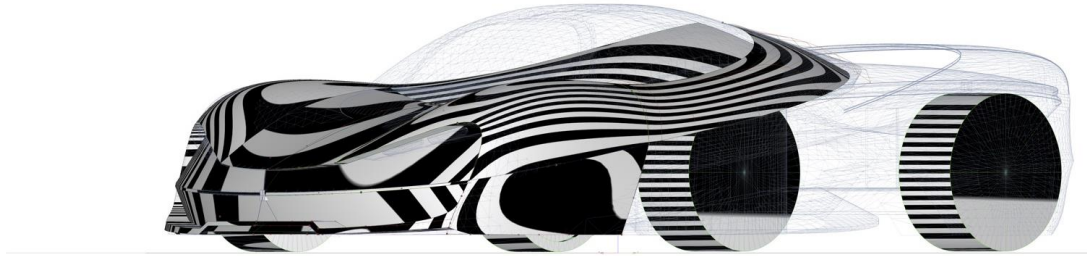
Obrázek 65 Plochy dolní částí nárazníku a jejich následné oříznutí

11.



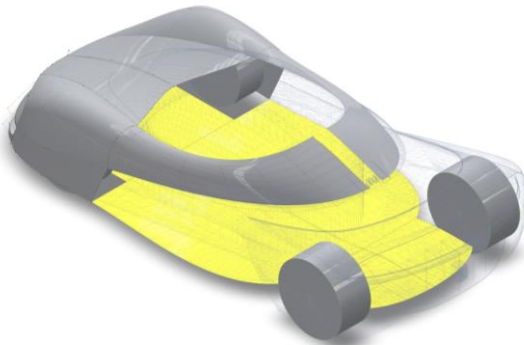
Obrázek 66 Vytvoření vnitřních ploch nárazníku (žluté) a jejich protknutí a vzájemné oříznutí

12.



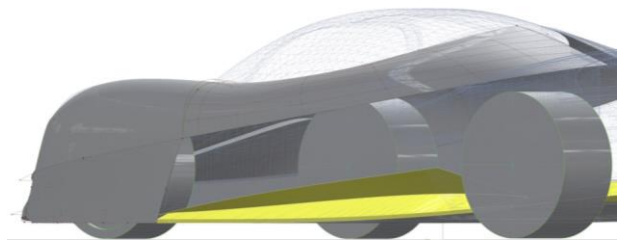
Obrázek 67 Průběžná analýza spojitosti ploch

13.



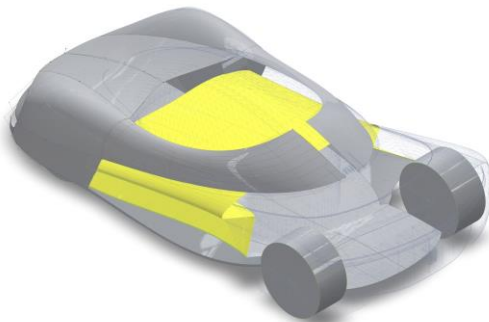
Obrázek 68 Podlaha automobilu

14.



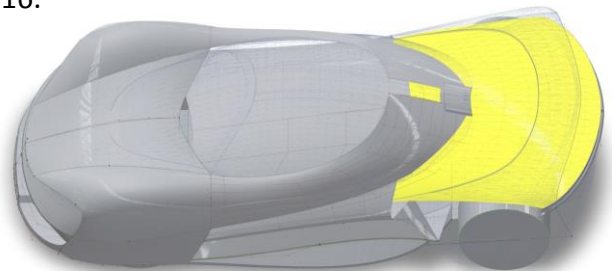
Obrázek 69 Boční části automobilu

15.



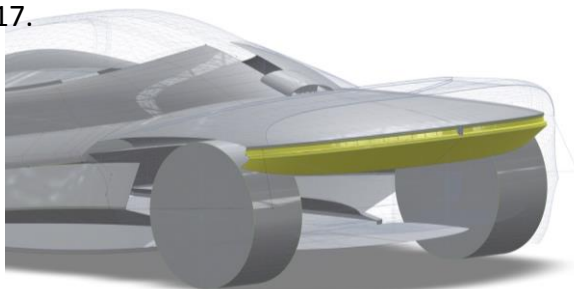
Obrázek 70 Boční část automobilu

16.



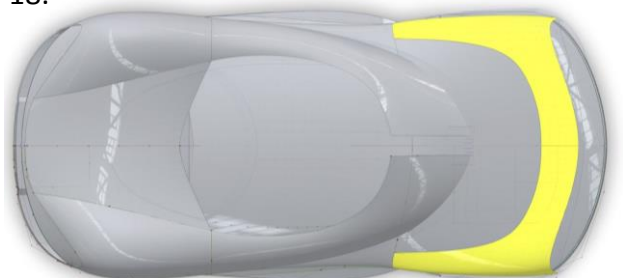
Obrázek 71 Zadní části automobilu

17.



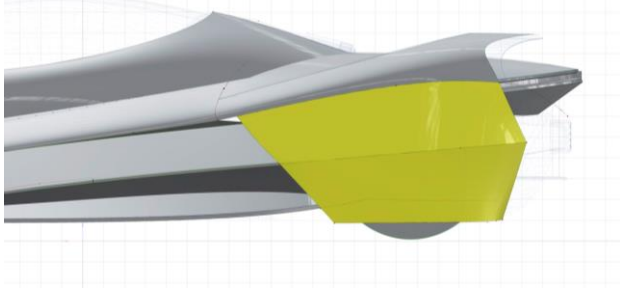
Obrázek 72 Zadní nárazník

18.



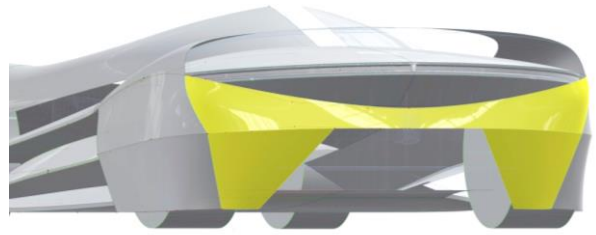
Obrázek 73 Zadní spoiler

19.



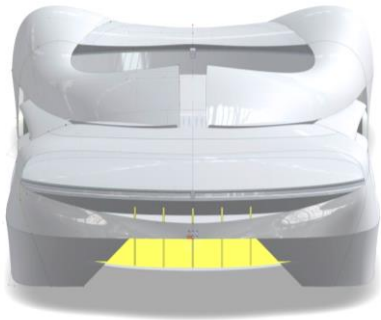
Obrázek 74 Zadní kryt kola

20.



Obrázek 75 Zadní část automobilu

21.



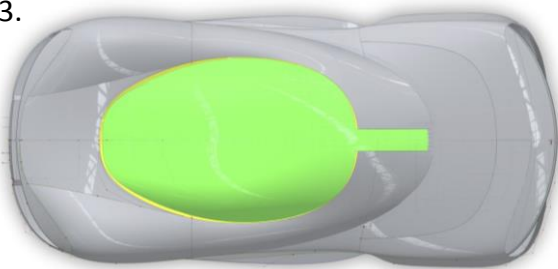
Obrázek 76 Detaily zadní části karosérie

22.



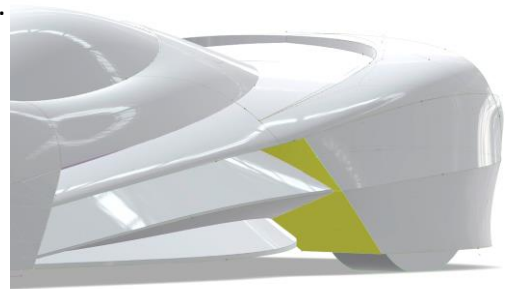
Obrázek 77 Sklo a střecha automobilu

23.



Obrázek 78 Průsečík a ořiznutí plochy skla

24.



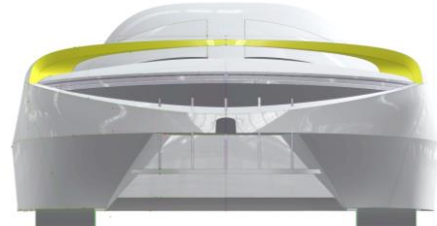
Obrázek 79 Vnitřní plochy blatníku

25.



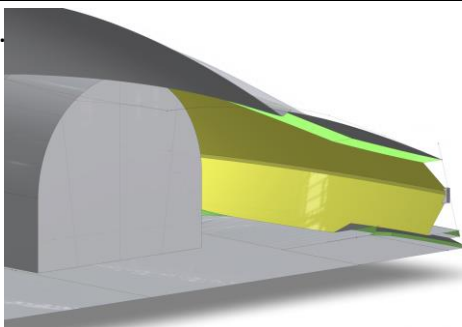
Obrázek 80 Vnitřní plochy boční části karosérie

26.



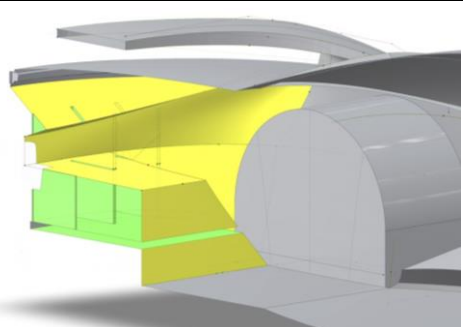
Obrázek 81 Zadní spoiler

27.



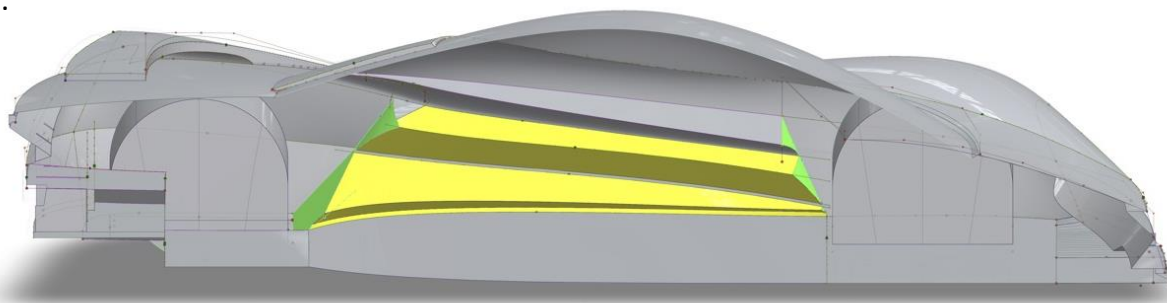
Obrázek 82 Průsečík a ořiznutí ploch předního nárazníku

28.



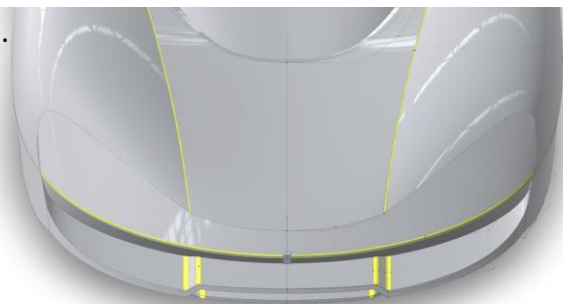
Obrázek 83 Průsečík a ořiznutí ploch zadního nárazníku

29.



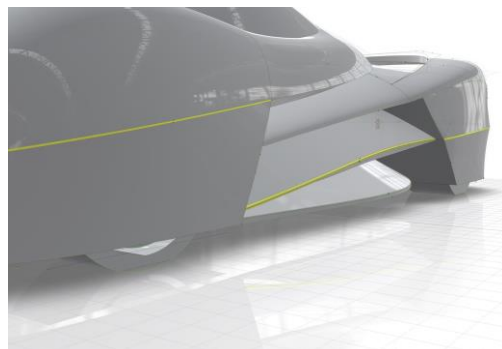
Obrázek 84 Průsečík a ořiznutí ploch boční části automobilu

30.



Obrázek 85 Zaoblení hran

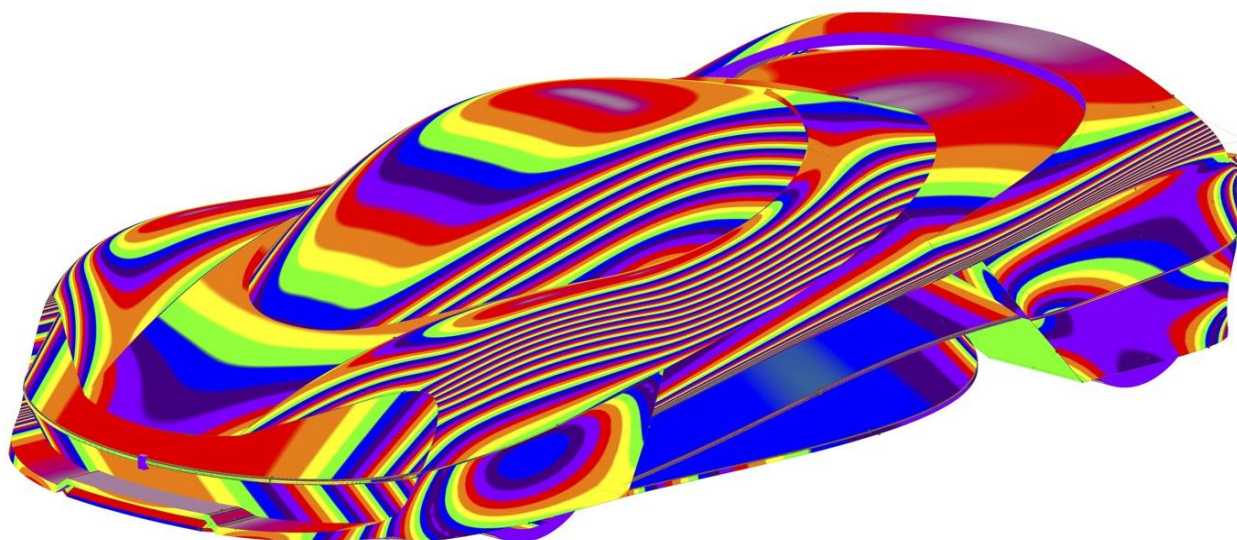
31.



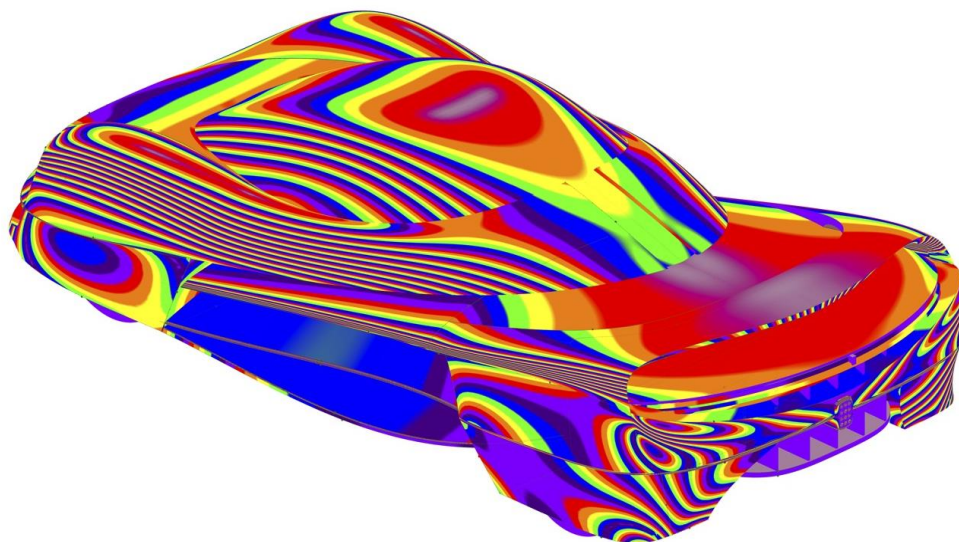
Obrázek 86 Zaoblení hran

6.5 Analýza ploch

Pro analýzu byla použita statická analýza zebřími pruhy v duhových barvách. Směr promítání: osa x . Na obrázku 87 je zobrazen pohled na přední část karosérie auta. Na obrázku 88 je zobrazen pohled na zadní část karosérie auta. Z obrázků je zřejmé, že na středové ose je zajištěna torzní spojitost. Na obrázku 89 je ukázána dynamická analýza zebřími pruhy.



Obrázek 87 Statická analýza zebřími pruhy v duhových barvách

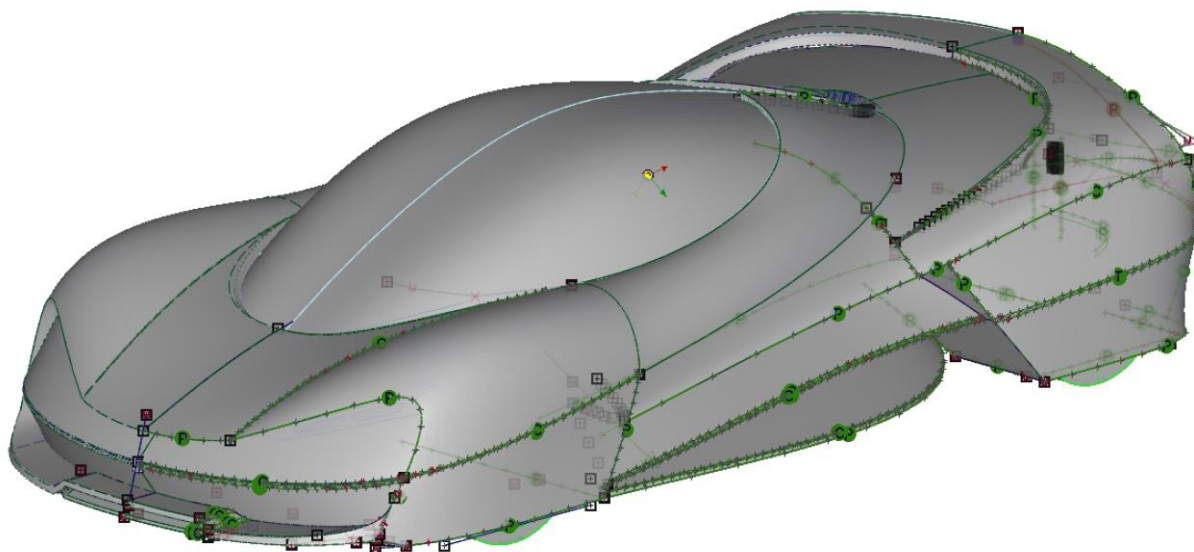


Obrázek 88 Statická analýza zebřími pruhy v duhových barvách



Obrázek 89 Dynamická analýza zebřími pruhy

Spojitosť ploch se kontrolovala nástrojem *Evaluate/Surface Continuity Options*. Tento nástroj kontroluje, jestli je dodržena požadovaná spojitost v souladu se zvolenou tolerancí. Při splnění spojitosti se zobrazí značení splněné spojitosti (G^0 - značení *P*, G^1 - značení *T*, G^2 - značení *C*). V případě nesplnění spojitosti se čára podél spojení zobrazí červeně. Z obrázku 90 je zřejmé, že všechny spojitosti jsou splněny.



Obrázek 90 Kontrola spojitosti ploch

6.6 Vizualizace

Pro vizualizaci byl zvolen software Autodesk VRED. Tento software slouží k renderování (tvorba reálného obrazu na základě počítačového modelu) obrázků a animací z vymodelovaných součástí. V software Autodesk VRED byl každé ploše přidělen materiál a zvoleny parametry scény. Na obrázcích 91, 92, 93 jsou ukázány příklady vizualizace.



Obrázek 91 Vizualizace automobilu pomocí software Autodesk VRED



Obrázek 92 Vizualizace automobilu pomocí software Autodesk VRED



Obrázek 93 Vizualizace automobilu pomocí software Autodesk VRED

7. Závěr

Tato práce se týká metod použití plošného modelování v automobilovém průmyslu.

Nejprve je uvedena stručná teorie NURBS křivek a ploch a jejich vlastností a definice parametrické a geometrické spojitosti napojení křivek a ploch obecného tvaru. Jsou zde zmíněny i způsoby kontroly a analýzy spojitosti křivek a ploch jak při počítačem podporovaném modelování tak i při výrobě automobilové karosérie.

Dále je zde vymezen termín „A-Class modelování“, který se používá v počítačem podporovaném automobilovém průmyslu, uvedeny inženýrské požadavky potřebné pro dosažení požadované kvality konečného modelu a pravidla, použitím kterých lze této kvality dosáhnout.

Z analýzy nyní používaných systémů pro plošné modelování byl zvolen vhodný software (Autodesk Alias Automotive). Volba software byla zdůvodněna.

Praktická část práce obsahuje popis celého procesu návrhu karosérie automobilu od prvního náčrtku po vytvoření virtuálního prototypu.

Cíle bakalářské práce byly splněny, jelikož získané poznatky byly úspěšně aplikovány při návrhu 3D modelu karosérie automobilu. Pomocí použití zlatých pravidel, uvedených v teoretické části práce, se podařilo dosáhnout vyhovující kvality 3D modelu. Všechny inženýrské požadavky byly splněny. Celý proces vytváření 3D modelu je dokumentován a potřebné obrázky popisující postup jsou v práci uvedeny. 3D model byl analyzován a vizualizován. Tento model by bylo možné použít při kusové výrobě, například pro prezentační účely. 3D Model ve formátu step je dostupný na přiloženém CD.

8. Zdroje

- [1] KUNDRÁTOVÁ, Karolína. NURBS reprezentace křivek v Maple. [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.linkeova.cz/vyuka/pubic/janov2005-ku.pdf>
- [2] FARIN, Gerald E., HOSCHEK, Josef a KIM, Myung-Soo. Handbook of computer aided geometric design. Boston, Mass.: Elsevier, 2002. ISBN 0444511040.
- [3] LINKEOVÁ, Ivana. Základy počítačového modelování křivek a ploch. ČVUT v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04011-9.
- [4] JEŽEK, František. B-Spline a NURBS křivky a plochy [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://geometrie.kma.zcu.cz/index.php/www/content/download/971/2742/file/NGM-P10-B-spline%20a%20NURBS.pdf?PHPSESSID=9406dd77c09f9a07a157e1ecef94c288>.
- [5] HOLLISTER, Stephen M. The Dirty Little Secrets of NURBS [online]. NEW WAVE SYSTEMS, INC. 2001 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.pilot3d.com/NurbSecrets.htm>
- [6] VILÍM, Marek. A-Class modeling v systému Autodesk Alias. ČVUT v Praze, Fakulta Strojní.
- [7] Autodesk Alias Foundation. In: Understanding Class A Modeling [online]. 2015 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/alias-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/Alias-Tutorials-Legacy/files/GUID-64611955-D2CC-44F2-98F0-D4F1FE931D8B-htm.html>
- [8] Autodesk Alias Foundation. In: Alias Golden Rules [online]. 2015 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/alias-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/Alias-Tutorials-Legacy/files/GUID-21501AEB-9E7A-4F9F-A0B3-0A4B3431B9BD-htm.html>
- [9] Rhino 5 Features [online]. 2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <https://www.rhino3d.com/features>
- [10] Modelování a analýza špičkových Class-A ploch pro Rhinoceros 5 [online]. 2015 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.dimensio.cz/vsr-shape-modeling>
- [11] HOMOLKA, Jan a DOSTÁL, Zdeněk. Tvorba modelů v CAD [online]. [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: http://www.iss-cheb.cz/tc/vystup/cad_manual.pdf
- [12] ICEM SURF - THE ART OF SURFACE MODELLING. 3ds [online]. [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.3ds.com/products-services/catia/products/icem-surf/>
- [13] Autodesk Alias. CADSTUDIO [online]. 2014 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.cadstudio.cz/alias>
- [14] MACEY, Stuart. a Geoff. WARDLE. H-point: the fundamentals of car design & packaging. Culver City, CA: Design Studio Press, 2009. ISBN 1933492376.
- [15] Porsche Plant Leibzig. In gettyimages [online]. [Obrázek] [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.gettyimages.com/detail/news-photo/worker-checks-a-porsche-macan-car-body-at-the-newly-built-news-photo/468441549>
- [16] The Q30 Infiniti launch at Sunderland Nissan. In: Sunderland Echo [online]. [Obrázek] 2015 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.sunderlandecho.com/news/business/in-pictures-q30-infiniti-revealed-at-sunderland-nissan-1-7605604>

- [17] Aston Martin's Plans. In: Bloomberg [online]. [Obrázek] 2015 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-01-27/aston-martin-s-plan-to-overhaul-lineup-backed-with-cash>
- [18] Leštění Fordu. In: Auto-mania.cz [online]. [Obrázek] 2015 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.auto-mania.cz/v-tovarne-fordu-se-lesti-auta-gigantickou-prachovkou-ze-pstrosiho-peri/>
- [19] Auto Union Type C Record Car Revived With Audi Stromlinie 75 Concept. In: Autoevolution [online]. [Obrázek] 2015 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.autoevolution.com/news/auto-union-type-c-record-car-revived-with-audi-stromlinie-75-concept-55051.html>
- [20] Francis Turbine Runner 3D CAD Model. In: 3D Cad browser [online]. [Obrázek] 2012 cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.3dcadbrowser.com/download.aspx?3dmodel=58065>
- [21] Modelování a analýza špičkových Class-A ploch pro Rhinoceros 5. In: Dimensio.cz [online]. [Obrázek] 2015 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.dimensio.cz/vsr-shape-modeling>
- [22] Our Multi-CAD solution is simplifying multi-CAD application design!. In: Theorem Solutions [online]. [Obrázek] 2015 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <https://theoremsolutions.wordpress.com/tag/v5-to-nx/>
- [23] Dimensional Analysis Model Examples. In: 3Dcs.com [online]. [Obrázek] 2015 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.3dcs.com/catia-v6.html>
- [24] ICEM Shape Design R17 released. In: Cluster 1 [online]. [Obrázek] 2008 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: [http://cluster1.cafe.daum.net/ICEM Shape Design R17 released](http://cluster1.cafe.daum.net/ICEM%20Shape%20Design%20R17%20released)
- [25] Virtual Shape Research. In: Studiengang [online]. 2008 [cit. 2016-06-14]. [Obrázek] Dostupné z: <https://studiengang.beuth-hochschule.de/uploads/media/Folien-Salzmänn.pdf>
- [26] Car clay model creation with CNC. In: Youtube [online]. [Obrázek] 2008 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=b8HVLQOEtvM>
- [27] Car Designers Stick to Clay Models. In: Accountmateblog [online]. [Obrázek] 2008 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <https://accountmateblog.com/2014/06/09/car-designers-stick-to-clay-models/>
- [28] Automotive Clay Design Process. In: Youtube [online]. 2008 [cit. 2016-06-14]. [Obrázek] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=KaenNpHaFFg>
- [29] 3D Scanned And Rendered VW Beetle. In: JALOPNIK [online]. [Obrázek] 2008 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://jalopnik.com/the-first-real-object-ever-3d-scanned-and-rendered-was-494241353>
- [30] Understanding Class A Modeling. In: Knowledge.autodesk.com [online]. [Obrázek] 2008 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/alias-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Alias-Tutorials-Legacy/files/GUID-64611955-D2CC-44F2-98F0-D4F1FE931D8B-htm.html>