



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

## NÁHRADA MATERIÁLU PODLAHOVÉHO ZÁVĚSU KUCHYŇKY DOPRAVNÍHO LETOUNU

MATERIAL REPLACEMENT OF THE AIRLINER GALLEY FLOOR HINGE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Krotký

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Löffelman, Ph.D.

BRNO 2025



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Petr Krotký**  
Studijní program: Základy strojního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. František Löffelmann, Ph.D.**  
Akademický rok: 2024/25

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

## Náhrada materiálu podlahového závěsu kuchyňky dopravního letounu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci spolupráce s průmyslovým partnerem byl vytipován podlahový závěs kuchyňky dopravního letounu jako vhodný díl pro potenciální změnu materiálu. Vzhledem k řadě požadavků a vlivů bude potřeba zpracovat návrh relativně detailně, aby bylo možno určit, zda je proveditelné a vhodné v sériové výrobě přejít z kovového materiálu na díl z plastu/vyztuženého plastu.

### Cíle bakalářské práce:

Rešerše vhodných materiálů (zejména plastů) a technologie výroby.  
Napěťová a deformační analýza původní geometrie závěsu v konfiguraci pro testování.  
Analýza pro upravenou geometrii s ohledem na zvolený materiál a způsob výroby.

### Seznam doporučené literatury:

ASHBY, M. F. Materials selection in mechanical design. Fifth edition. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0-08-100599-6.

ASM Handbook. Volume 21 , Composites. Materials Park: ASM International, 2001. ISBN 0-87170-703-9.

ZENKERT, Dan. An Introduction to Sandwich Structures. 1995. Dostupné z: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1366182&dswid=682>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Práce se zabývá změnou materiálu podlahového závěsu v letounu. Jsou popsány různé materiály vhodné pro strukturální součást, přenos zatížení a kritéria jejich volby. Jsou uvedeny metody výroby vhodné pro zvolený díl. Závěs je analyzován metodou konečných prvků v softwaru ANSYS Workbench 2024 R2. Postup simulace a zadané parametry jsou specifikovány a jednotlivé výsledky porovnány. Na jejich základě je zvolen nový materiál součásti. Práce je zakončena úvahou o návrhu nové geometrie dílu.

## **Klíčová slova**

Podlahový závěs, MKP, náhrada materiálu, deformační/napěťová analýza, termoplast

## **Abstract**

The thesis deals with the change of material for the floor hinge in an aircraft. Various materials suitable for a structural component, load transfer, and the criteria for their selection are described. Manufacturing methods appropriate for the selected part are presented. The hinge is analyzed using the finite element method in ANSYS Workbench 2024 R2 software. The simulation process and specified parameters are outlined, and individual results are compared. Based on these results, a new material for the component is selected. The work concludes with a consideration of the design of a new geometry for the part.

## **Keywords**

Floor hinge, FEM (Finite Element Method), material replacement, deformation/stress analysis, thermoplastic

### **Bibliografická citace**

KROTKÝ, Petr. *Náhrada materiálu podlahového závěsu kuchyňky dopravního letounu*. Online, bakalářská práce. František LÖFFELMANN (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165561>. [cit. 2025-05-23].

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem a zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Františka Löffelmana, Ph.D.

Petr Krotký

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Františku Löffelmannovi, Ph.D., za ochotu, trpělivost, připomínky a rady. Děkuji také mé rodině a přátelům.

# Obsah

Úvod .....	10
1 Rešerše vhodných materiálů .....	11
1.1. Kritéria volby vhodného materiálu .....	11
1.2. Slitiny .....	11
1.3. Plasty .....	12
1.3.1. Termoplasty .....	12
1.3.2. Reaktoplasty .....	19
1.3.3. Možnosti vyztužení plastů .....	20
2 Technologie výroby součásti z plastu .....	22
3 Analýza napětí a deformací .....	24
3.1. Zjednodušení geometrie původního modelu .....	24
3.2. Postup v ANSYS .....	26
3.3. Výměna materiálu .....	36
3.4. Srovnání výsledků .....	37
4 Pojetí nové geometrie .....	40
Závěr .....	44
Seznam použitých zdrojů .....	45

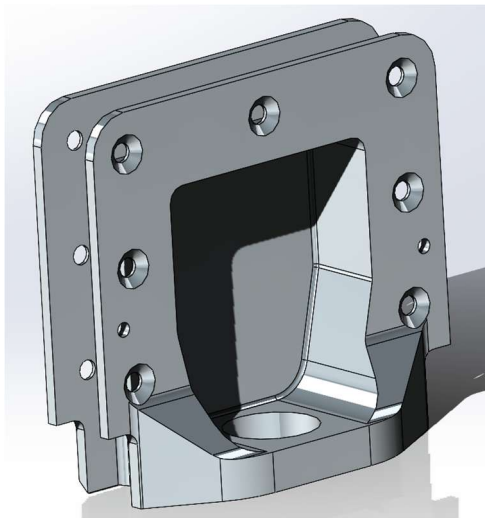
## Úvod

V letecké dopravě stále více převládá trend nahrazovat konstrukční materiály jejich výhodnějšími náhradami. Inženýři neustále hledají různé možnosti, jak snížit hmotnost letounu, zvýšit efektivitu, a to při zachování bezpečnostních požadavků na letoun. Jedním ze způsobů je nahrazování tradičních kovových dílů náhradou z plastu, či kompozitu. Letečtí inženýři mají v dnešní době k dispozici velké množství různých materiálů. Na výběr je řada slitin, plastů, keramik, kompozitů a také přírodní látky, jako dřevo. Vlastnosti různých látek jsou odlišné. Tento fakt musí brát konstruktéři v potaz a překonávat tak různé překážky.

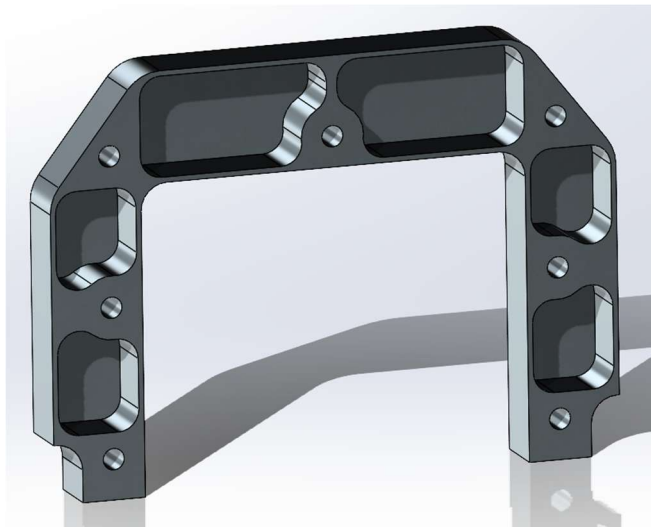
Průmyslovým partnerem byl zadán požadavek na výměnu materiálu součásti, nacházející se v kuchyňce dopravního letounu. Jde o podlahový závěs. V závěsu je zasazena stěna kuchyňky sendvičové konstrukce. Součástí sestavy je ještě insert, který je vložen mezi závěs a stěnu. Jeho funkcí je přenos zatížení ze závěsu na stěnu kuchyňky. Závěs je potom přišroubován k podlaze.

Změna materiálu součásti byla průmyslovým partnerem navrhnutá ze dvou důvodů. Prvním je fakt, že původní hliníková slitina Al 7075, použita pro závěs, má nevýhodu korozního praskání. Druhým je snaha držet krok s dobou a více využívat plasty a s nimi spojené výhody.

Cílem této práce je posoudit možnosti různých druhů materiálu jako náhradu za původní slitinu. Zvážit, jak by se mohla součást, po výměně materiálu, vyrábět. Bude potřeba zhotovit analýzu napětí a deformací původní geometrie závěsu, vyrobeného z vybraných materiálů. Nakonec proběhne úvaha nad konceptem nové geometrie součásti.



Obr. 1 Závěs



Obr. 2 Insert

# 1 Rešerše vhodných materiálů

## 1.1. Kritéria volby materiálu

Při hledání nového materiálu byly stanoveny vlastnosti, podle kterých byl vybírán:

- Mez pevnosti
- Modul pružnosti
- Hustota
- Měrná pevnost
- Měrný modul pružnosti
- Mez kluzu
- Chemická odolnost
- Teplota skelného přechodu
- Ohnivzdornost
- Odolnost vůči UV záření
- FST index (fire, smoke, toxicity)
- Houževnatost
- Cena
- Možnosti vyztužení plnivem nebo vlákny
- Výrobci

Pomocí těchto vlastností, byly určeny různé druhy slitin a plastů. Konkrétní materiál z dané skupiny plastů byl potom volen hlavně na základě hořlavosti. Tedy charakteristiky, bez které se v interiérech dopravních letounů nedá obejít. Ta je stanovena podle normy UL 94 (UL je zkratka pro americkou společnost zabývající se bezpečností produktů UL Solutions). Tento standart zavádí řadu bezpečnostních, horizontálních a vertikálních zkoušek plamenem. Pro naši aplikaci byla zvolena nejpřísnější klasifikace V0. Materiály, které nesplnili tuto podmínku byly vyloučeny. Teplota skleného přechodu by měla být větší jak 50°C. Materiály, které nesplnili tuto podmínku byly také vyloučeny.

## 1.2. Slitiny

Některé materiály jsou náchylnější k praskání v důsledku korozního napětí (SCC – stress corrosion cracking) než jiné. Pokud je náchylný materiál vystaven koroznímu prostředí za současného působení dostatečně velkého tahového napětí a doba expozice je dostatečně dlouhá, aby došlo k iniciaci a růstu trhlin, dojde k selhání při napětí nižším, než jaké by materiál za normálních okolností měl vydržet. Korozní prostředí přitom nemusí být výrazně agresivní z hlediska obecného korozního napadení. Selhání v provozu v důsledku korozního praskání vlivem napětí se často vyskytuje v případech, kdy povrchy selhaných částí nevykazují viditelné známky obecné koroze. Napětí různých druhů namáhání se navíc sčítá a prahové hodnoty pro vznik náchylnosti bývají často nízké. Byla zaznamenána řada případů korozního praskání, kdy konstrukční napětí bylo přerušované, mělo krátké trvání a mělo jen malý vliv na samotné selhání. V těchto případech došlo k praskání v důsledku kombinace zbytkových a montážních napětí, která nebyla při návrhu zohledněna [1].

Hodnocení náchylnosti ke koroznímu praskání (SCC) byla přiřazena hlavním slitinám používaným v letectví na základě provozních zkušeností a testovacích programů [1, 2]. Jsou hodnoceny jako vysoce, středně a málo odolné vůči SCC [3].

Je nutno poznamenat, že slitiny, které mají vysokou odolnost vůči SCC, nejsou nutně odolné vůči klasické tepelné, nebo elektrochemické korozi.

Původní materiál, z něhož byl závěs vyroben, byl hliníkovou slitinou Al 7075 T6. S tepelnou úpravou T6 (rozpuštěcí žíhání a umělé stárnutí) je slitina hodnocena jako středně až málo

odolná vůči SCC [3]. Nevýhodu korozního praskání, je ale možné překonat jiným tepelným zpracováním. V případě slitiny Al 7075 zpracováním T73 (rozpuštěcí žíhání a plné přestárnutí) [3, 4].

Bylo by možné použít další hliníkové slitiny, určené pro letecký průmysl, s vlastnostmi srovnatelnými s Al 7075 T6. Slitiny z řady 7XXX a 2XXX. Ale většina těchto slitin by potřebovala stejnou tepelnou úpravu T73, nebo úpravy jiné.

Slitina	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Rp02 [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost Rm/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Měrný modul pružnosti E/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Únavová odolnost [MPa]	Podmínka korozní odolnosti
7075	400-650	340-595	71,7	2810	0.142-0.231	25,52	159	T73
2024	385-495	260-470	73,1	2770	0.140-0.179	26,39	138	T8, T6 (ve formě prutu)
2219	172-476	70-395	73,8	2840	0.061-0.168	26		T6, T8
2618	441	372	74,5	2760	0,16	27	124	T6, T8
7020	390	310	70	2900	0,135	24,14	130	T6
7049	530	450	70	3100	0,171	22,58	170	T73
7149	550	485	72	2840	0,194	25,35	160	T73
7050	500	440	70	3100	0,161	22,58	190	T73
7475	496	421	71,7	2810	0,177	25,52	220	T73
2124	490	430	71	3000	163,3	23,67	130	T851, T6, T8
2011	410	310	71	3100	0,132	22,9	120	T8

Tabulka 1 Vlastnosti vybraných hliníkových slitin na základě doporučení z MIL – HDBK – 5J [5]

V rámci hliníkových slitin, je rozhodně na výběr a je tu i možnost ponechání (za zmíněných úprav) materiálu stávajícího. Průmyslový partner, se ale spíše kloní k polymernímu materiálu.

### 1.3. Plasty

Každý materiál má své výhody i nevýhody. Plasty mají menší hustotu a tím pádem i menší hmotnost. Jejich mechanické vlastnosti za hliníkovými slitinami ale zaostávají. Zvláště u plastů pak záleží na stupni hořlavosti, i chemické odolnosti (díl bude v kuchyňském koutě a může tak přijít do styku s různými čistícími chemikáliemi). Při výběru plastů byly nejdříve zvoleny ty, které měli relativně velkou mez pevnosti. Dále proběhla kontrola na hořlavost (UL 94 – V0). Nakonec se vzalo v potaz, zdali se polymer používá v leteckém průmyslu. Je potřeba podotknout, že technické plasty lze do jisté míry chemicky upravovat podle potřeby, tak aby splňovaly chtěné požadavky pro svoji funkci. To se týče například právě hořlavosti, chemické odolnosti, nebo odolnosti proti UV záření. Plasty lze také vyztužit plnivem, nebo vlákny. Výsledný kompozit tak bude mít vyšší mechanické vlastnosti než původní plast.

#### 1.3.1. Termoplasty

##### 1.3.1.1. Polyvinylchlorid – PVC

PVC je, díky svému chemickému složení, samozhášivý termoplast. Je také často kombinován s aditivami za účelem zlepšení jeho vlastností. Díky tomu je PVC jedním z nejvyužívanějších plastů na světě. Existuje široká škála jeho použití, protože jeho vlastnosti lze přizpůsobit vhodným

výběrem aditiv. Plniva se často přidávají za účelem snížení nákladů a zahrnují mastek, uhličitán vápenatý a jí. Tato plniva mohou také dodat směsi větší tuhost [6].

Mezi výrobky z tuhého PVC patří obklady domu, protlačované trubky, tepelně tvářené a vstřikované díly. Díky své samozhášivosti se využívá v prostředí s elektrickým vedením. Má ale i dobré mechanické vlastnosti, díky kterým je vhodný i pro aplikace strukturálního zatížení. Trubky a armatury spotřebují 47 % celkového množství PVC [7].

Dále je také používán chlorovaný polyvinylchlorid – C-PVC. Do klasického roztoku polyvinylchloridu je přidán chlór, který zvyšuje modul pružnosti a mez pevnosti. C-PVC má navíc lepší chemickou odolnost. Chlorovaný PVC je používán například na venkovní rámy střešních oken, nebo vnitřní části automobilů [7].

Jedna z nevýhod obyčejného PVC je, že je náchylné ke korozi kovových součástí. Navíc ačkoli jsou jeho mechanické vlastnosti relativně dobré v porovnání s hliníkovou slitinou, či dalšími termoplasty, vcelku zaostává. Za svou samozhášivost vděčí chloru, který je uvolňován při hoření. Tím pádem ale vznikají toxické výpary. Přítomnost chlóru v jeho složení, je navíc handicapem z ekologického hlediska. Sám o sobě je citlivý na UV záření, což se opět dá spravit správnými aditivy. Je ale třeba podotknout, že další aditiva zvyšují celkovou cenu materiálu [7].

Průmyslová označení PVC: Astralon, Exon, Fiberloc, Geon, Hostalit, Igelit, Lucoflex, Lucovyl, Marvinol, Norvinyl, Opalon, Ortodur, Pevikon, Polychlorovinyl, Polytherm, Porodur, Trovidor, Vinilplast, Viniplaen, Vinnol, Vinoflex, Yugovinyl [7].

Výrobci PVC: Geon, Arkema, Asahi Glass Corp., Formosa Plastics, LG Chemical, Solvay [7].

PVC	Mez pevnosti Rm [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost Rm/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Měrný modul pružnosti E/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Houževnatost [J/m] (metoda Izod, s vrubem; 23°C)
Plus 66311	41,4	2,41	1,31	0,032	1,840	800
Plus M6215	44,1	2,34	1,26	0,035	1,857	270
Plus M6220	42,7	2,28	1,24	0,034	1,839	64
Plus M6230	43,4	2,34	1,23	0,035	1,902	110
Plus M6307	29,6	1,72	1,23	0,024	1,398	750
Plus M6309	29,6	1,65	1,23	0,024	1,341	850
Plus M7000	41,4	2,28	1,33	0,031	1,714	640
Rigid 8700A	42,7	2,69	1,38	0,031	1,949	910
Rigid 85857	42,7	2,45	1,46	0,029	1,678	200
Rigid 85891	49	2,9	1,47	0,033	1,973	800
Rigid 87262	40,9	2,61	1,38	0,030	1,891	810
Rigid 87402	47,6	2,62	1,31	0,036	2,000	800
Rigid 87416	44,1	2,48	1,45	0,030	1,710	150
Rigid 87549	41,4	2,48	1,34	0,031	1,851	520

Tabulka 2 Vlastnosti vybraných PVC od firmy Geon [8; 9]

### 1.3.1.2. Akrylonitrilbutadienstyren – ABS

Vlastnosti ABS se mohou značně lišit v závislosti na poměru monomerů které mohou mít (styren, akrylonitril, butadien). Je ceněn pro dobré mechanické vlastnosti, hlavně houževnatost.

Nevsakuje vodu, má dobrou odolnost vůči chemikáliím a relativně nízkou cenu. Je recyklovatelný [7].

Mezi nevýhody patří citlivost na světlo, UV záření, a tečení materiálu (creep) za vyšších teplot. U čistého ABS je problémem také hořlavost, dosahuje pouze hodnoty HB. Existují ale speciální FR (fire resistance) třídy, u kterých je možné dosáhnout hodnocení V0 [7].

Mezi výrobky z ABS patří palubní desky, kryty a skříně domácích spotřebičů a elektrického nářadí, nebo trubky a potrubí [7, 6].

Příklady průmyslových názvů ABS: Cycolac, Lustran ABS, Magnum, Novodur, Polylac, Terluran, Terlux, Toyolac [7].

Výrobci ABS: BASF, Chimei Corp., LG Chemical, Sabic, Toray Plastics [7].

ABS se často slučuje s polykarbonátem (PC) a vzniká tak kompozit zlepšující jeho vlastnosti.

*: ABS (čistý) ostatní: PC+ABS	Mez pevnosti Rm [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota ρ [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost Rm/ρ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Měrný modul pružnosti E/ρ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Houževnatost [J/m] (metoda Izod, s vrubem; 23°C)
RESIN FR15 *	41	2,34	1,19	0,034	1,966	213
RESIN FR15U *	37	2,06	1,19	0,031	1,731	213
RESIN FR23 *	42	2,41	1,17	0,036	2,060	267
FR RESINS C2800	58	2,68	1,17	0,050	2,291	427
FR RESINS C2950	62	2,65	1,18	0,053	2,246	534
FR RESINS C3650	64	2,86	1,18	0,054	2,424	694
FR RESINS C6600	60	2,7	1,19	0,050	2,269	15 [J/m <sup>2</sup> ]
FR RESINS C7230P	58	5,2	1,3	0,045	4,000	69
FR RESINS CE3510	64	2,68	1,21	0,053	2,215	664
FR RESINS CM6140	65	3,5	1,25	0,052	2,800	200
FR RESINS CM6210	64	3,57	1,27	0,050	2,811	500
FR RESINS CM6220	55	5,85	1,4	0,039	4,179	95
FR RESINS CM6240	55	4,35	1,3	0,042	3,346	86
FR RESINS CY6110	63	2,76	1,18	0,053	2,339	475
FR RESINS CY6120	62	2,96	1,19	0,052	2,487	587
FR RESINS CY6310	63	2,7	1,17	0,054	2,308	600

Tabulka 3 Vlastnosti vybraných ABS od firmy Sabic [10]

### 1.3.1.3. Polykarbonát – PC

Polykarbonáty mají v porovnání s ABS lepší mechanické vlastnosti. Jsou ale dražší, a proto se často užívá směs obou polymerů (viz. Tabulka 3 Vlastnosti vybraných ABS od firmy Sabic [10]). PC se používají v optice, transparentních technických dílech a ochranných zařízeních pro jejich průhlednost, mechanické vlastnosti, odolnost proti nárazům a tuhost. Mají také dobré chování při pnutí, jsou odolné proti únavě a rozměrově stabilní. Jsou málo nasákavé a mají široký rozsah provozních teplot (od -100 °C do +135 °C) [7, 6].

Samotné polykarbonáty jsou citlivé na světlo a mají špatnou ohnivzdornost. Opět ale existují speciální FR třídy, které jsou schopny dosáhnout hodnocení V0.

Ačkoli jsou polykarbonáty hojně využívány díky své průhlednosti, díky dobrým mechanickým vlastnostem mohou sloužit i jako strukturální součást. Například jako ozubená kola, či kryty elektrických nástrojů [7]. PC lze vyztužit skelnými, či karbonovými vlákny.

Průmyslové označení: Acrylite, Apec, Calibre, Lexan, Makrolon, Panlite, Sinvet, Xantar, Xenoy, Makroblend [7].

Výrobci PC: Asahi-Kasei, Bayer MaterialScience, Chimei, Sabic, Covestro, Resinex, Teijin [7].

Vyztužení	PC	Mez pevnosti Rm [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost Rm/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Měrný modul pružnosti E/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Houževnatost [J/m <sup>2</sup> ] (metoda Charpy, s vrubem; 23°C)
minerální plnivo, PC+ABS směs	Multilon DN-3710F	61	4,2	1,26	0,048	3,333	13000
10% uhlíková vlákna	Panlite BN-8110R	115	7,5	1,26	0,091	5,952	7000
20% uhlíková vlákna	Panlite BN-8120R	135	13	1,31	0,103	9,924	7000
20% skleněná vlákna	Panlite GN-3620L	82	6,1	1,34	0,061	4,552	7000

Tabulka 4 Vlastnosti vybraných PC od firmy Teijin [11]

#### 1.3.1.4. Polyamid – PA

Polyamid, nebo Nylon, má více druhů. Těmi nejznámějšími jsou PA 66, PA 6, PA 11, PA 12. Jejich charakteristiky se mezi sebou trochu liší. O každém z nich se dá říct, že má obstojnou odolnost proti vyšším teplotám a únavě, a dobrou odolnost vůči chemikáliím. PA 11 a PA12 mají ale menší modul pružnosti. Pro přenos zatížení se tedy více hodí PA 66 a PA6. PA jsou často vyztužovány skleněnými a uhlíkovými vlákny, nebo minerálními plnidly. Také jsou vyráběny ecopolyamidy, jejichž výroba nemá negativní dopad na životní prostředí [7, 6].

Jednou z nevýhod polyamidů je absorpce vody. Vysoká nasákavost způsobuje pokles mechanických vlastností a nárůst objemu až o 10 %. Vyžadují ochranu proti UV záření. Jsou hořlavé, opět ale existují speciální FR třídy a protiopatření [7].

Z PA jsou vyráběny: kryty spotřebičů a motorů, sací potrubí, spoilery, ozubená kola, kladky a svorky.

Průmyslová označení: Akulon, Domamid, Durethan, Grilon, Maranyl, Nylatron, Nylon, Orgamide, Technyl, Sniamid, Ultramid, Vestamid, Zytel [7].

Výrobci: Asahi Kasei, BASF, DuPont, Evonik, Sabic, Toray, Exatec [7].

Vyztužení	PA	Mez pevnosti Rm [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost Rm/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Měrný modul pružnosti E/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Houževnatost [J/m <sup>2</sup> ] (metoda Charpy, s vrubem; 23°C)
PA 66 + PA 6I; skleněná vlákna, 55%	LEONA SH10E M120530	209	22,6	1,86	0,112	12,151	18000

<b>PA 66 + PA 6I; skleněná vlákna, 25%</b>	LEONA SN10B 33J7	132	9,4	1,38	0,096	6,812	11000
<b>PA 66 + PA 6I; skleněná vlákna, 25%</b>	LEONA SN11B 33K2	124	9,5	1,4	0,089	6,786	9200
<b>PA 66 + PA 6I; skleněná vlákna, 25%</b>	LEONA SN11B Na	133	9,1	1,4	0,095	6,500	12000
<b>PA 66 + PA 6I; skleněná vlákna, 30%</b>	LEONA SN103 33J8	137	11,1	1,43	0,096	7,762	10000
<b>PA 66; 25% skleněná vlákna</b>	Frianyl A3 GF25 V0	90,33	6,3	1,36	0,066	4,632	9043

Tabulka 5 Vlastnosti vybraných PA od firmy Asahi Kasei [12]

### 1.3.1.5. Polyetheretherketon – PEEK

PEEK je ceněn pro své skvělé mechanické vlastnosti, chemickou odolnost, odolnost proti opotřebení a únavovému poškození, odolnost vůči vysokým teplotám a radiaci. Má také nízkou nasákovost a s tím spojené přiměřené smrštění [7].

Mezi nevýhody patří špatná rezistence vůči UV záření a hořlavost. Oba handicapy se dají omezit přidáním aditiv v rámci speciálních FR tříd. PEEK je ale jedním z nejdražších termoplastů [7].

V letectví je hojně využíván jako komponenta do interiéru letounu. Je často vyztužován uhlíkovými a skleněnými vlákny.

Průmyslová označení: APC, Aptiv, AvaSpire, Gharda, Ketaspire, OXPEEK, VestaKeep, Vicote, Victrex PEEK [7].

Výrobci: Arkema, Evonik, Solvay, Gharda Chemicals Ltd, Victrex [7].

Vyztužení	PEEK	Mez pevnosti Rm [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost Rm/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Měrný modul pružnosti E/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Houževnatost [J/m <sup>2</sup> ] (metoda Charpy; 23°C)	
<b>30% uhlíková vlákna</b>	VESTAKEEP 2000 CF30	251	24	1,41	0,178	17,021	s vrubem	8000
							bez vrubu	51000
<b>bez výtzuže</b>	VESTAKEEP 2000 FP	100	3,7	1,3	0,077	2,846	s vrubem	6000
<b>30% skleněná vlákna</b>	VESTAKEEP 2000 GF30	180	11	1,5	0,120	7,333	s vrubem	10000
							bez vrubu	55000

30% uhlíková vlákna	VESTAKEEP 4000 CF30	240	23	1,4	0,171	16,429	s vrubem	10000
							bez vrubu	60000
30% skleněná vlákna	VESTAKEEP 4000 GF30	160	11	1,5	0,107	7,333	s vrubem	11000
							bez vrubu	70000
bez výztuže	VESTAKEEP 5000 FP	95	3,4	1,3	0,073	2,615	s vrubem	9000
30% skleněná vlákna	Tecopeek PK40 GR30 NL	175	11	1,52	0,115	7,237	s vrubem (Izod)	8000

Tabulka 6 Vlastnosti vybraných PEEK od firmy Evonik [13]

### 1.3.1.6. Polysulfon – PSU

Polysulfon má dobré mechanické vlastnosti, je tuhý a odolný proti únavě. Má nízkou nasákavost a nemění svůj objem. Má velký interval servisních teplot (-100°C – 150°C) [7].

Mezi nevýhody patří citlivost na UV záření a špatná chemická odolnost. Co se týče hořlavosti, je na tom lépe než PEEK. Pro dosažení hodnocení UL94 – V0, ale existují speciální FR třídy. Může být citliví na praskání v důsledku svého okolí (environmentální praskání). [7].

PSU je používán pro součástky pod kapotou, interiérové díly letadel a v aplikacích pro spojky a armatury.

Průmyslová označení: Acudel, Airex, Mindel, Radel, Stabar, Sumikaexcel, Udel, Ultrason, Veradel [7].

Výrobci: BASF, Solvay, Sumitomo Chemical, Syensqo [7].

Vyztužení	PSU	Mez pevnosti Rm [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost Rm/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Měrný modul pružnosti E/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Houževnatost [J/m <sup>2</sup> ] (metoda Izod,notched; 23°C)
bez výztuže	Ultrason E 1010	85	2,65	1,37	0,0620	1,9343	6500
20% skleněná vlákna	Ultrason E 2010 G4 MR SW 15102	130	7	1,5	0,0867	4,6667	8000
20% skleněná vlákna	Ultrason E 2010 G4 UN	130	6,9	1,5	0,0867	4,6000	8000
bez výztuže	Ultrason P 3010	74	2,25	1,285	0,0576	1,7510	58000
20% skleněná vlákna	Ultrason S 2010 G4 SW 15038	114	6,5	1,38	0,0826	4,7101	8000
30% skleněná vlákna	Ultrason S 2010 G6 UN	130	9	1,46	0,0890	6,1644	9000
20% skleněná vlákna	Veradel 3320GF	120	7	1,49	0,0805	4,6980	70 [J/m]
30% skleněná vlákna	Veradel 3330GF	130	8,62	1,58	0,0823	5,4557	75 [J/m]

Tabulka 7 Vlastnosti vybraných PSU od firem BASF a Syensqo [14, 15]

### 1.3.1.7. Polyphenylensulfid – PPS

Tento polymer je skoro vždy používán ve formě kompozitu. Buď vyztužen vlákny, nebo naplněn minerálními plnidly. PPS má dobré mechanické vlastnosti, je tuhý, odolný proti únavě, málo nasávkavý a nemění svůj objem. Má velký interval servisních teplot, malou hořlavost a dobrou chemickou odolnost [7].

Má ale menší houževnatost a vyšší cenu [7].

PPS se využívají pro výrobu ventilů, palivových vedení, rotory čerpadel, součástky pod kapotou, kryty, ložiska a přesné součástky pro mechanické komponenty [7].

Průmyslová označení: Crastone, Fortron, Primef, Ryton, Supec, Tedur, XTeI [7].

Výrobci: Resinex, Toray Plastics, Sabic, Solvay Plastics, Ticona, Chevron Phillips [7].

Vyztužení	PPS	Mez pevnosti Rm [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost Rm/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Měrný modul pružnosti E/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Houževnatost [J/m <sup>2</sup> ] (metoda Charpy, notched; 23°C)
30% skleněná vlákna	Fortron 1130L4	170,3	12	1,58	0,108	7,595	9043
40% skleněná vlákna	Fortron 1140L4	195,2	14,7	1,65	0,118	8,909	10094
40% skleněná vlákna	Fortron 1141L4	195,2	15,5	1,65	0,118	9,394	11987
53% minerál/sklo	Fortron 4184L4	164,8	16,6	1,8	0,092	9,222	6940
65% minerál/sklo	Fortron 4665B6	124,8	17,3	2,03	0,061	8,522	6099
65% minerál/sklo	Fortron 6165A6	135,2	19,5	1,95	0,069	10,000	6940
30% skleněná vlákna	Ryton XE5030BL	131	flex: 8,96	1,51	0,087	5,934	Izod: Notched: 9500

Tabulka 8 Vlastnosti vybraných PPS od firmy Resinex [16]

### 1.3.1.8. Polyetherimid – PEI

PEI má dobré mechanické vlastnosti, tuhost a únavovou životnost. Má malou nasávkavost a smršťivost. Je sám o sobě nehořlavý a při hoření má malé emise kouře. Je odolný proti UV záření [7].

Jeho nevýhodou je vyšší cena, větší hustota a horší chemická odolnost. Vykazuje také citlivost na vruby, při návrhu by se tedy mělo vyhnout koncentracím napětí [7].

PEI je používán jako materiál pro výrobu hasičských přileb, převodových součástek, interiérových dílů a strukturálních součástí v letounu.

Průmyslová označení: Hydrel, Lubricomp, RTP, Siltem, Stat-Kon, Tempalux, Ultem [7].

Výrobci: SABIC Innovatve Plastics, Quadrant [7].

Vyztužení	PEI	Mez pevnosti Rm [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost Rm/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Měrný modul pružnosti E/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Houževnatost [J/m <sup>2</sup> ] (metoda Izod, unnotched; 23°C)
10% skleněná vlákna	ULTEM RESIN 2110	115	4,5	1,34	0,086	3,358	30000
20% skleněná vlákna	ULTEM RESIN 2210	140	6,8	1,42	0,099	4,789	30000
30% skleněná vlákna	ULTEM RESIN 2300	175	10,5	1,51	0,116	6,954	600 [J/m]
45% skleněná vlákna a minerální plniva	ULTEM RESIN 3452	100	12,5	1,66	0,060	7,530	14 000

Tabulka 9 Vlastnosti vybraných PEI od firmy Sabic [17]

## 1.3.2. Reaktoplasty

### 1.3.2.1. Fenolové pryskyřice

Fenolové pryskyřice se používají v hromadné dopravě a stavebnictví, na ropných plošinách a v lodním stavitelství díky svým dobrým vlastnostem při požáru. Mají dobré požární hodnocení a relativně nízké množství kouře při relativně nízké úrovni toxicity. S aditivy jsou schopny dosáhnout hodnocení V0. Mají dobrý poměr ceny a vlastností, dobré chování při tečení, dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči velkému množství chemikálií. Jsou odolné vůči světlu [18]. Jsou slabé vůči zásadám, kromě speciálních typů, rozkládají se působením silných oxidačních kyselin [18].

Příklady použití: Nehořlavé prvky pro stavebnictví, hromadnou dopravu, elektrotechniku a elektroniku [18]. Najdou využití také v interiérech letounu.

Průmyslová označení: Novotext, Micarta, Bakelite, Tufnol, Catalin, Erinite [18].

Výrobci: SAE Manufacturing Specialties Corp, Asahi Organic Chemicals [18].

Vyztužení	Fenolová pryskyřice	Mez pevnosti Rm [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost Rm/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Měrný modul pružnosti E/ $\rho$ [MPa·m <sup>3</sup> /kg]	Houževnatost [J/m <sup>2</sup> ] (metoda Charpy, notched; 23°C)
skleněná vlákna a kuličky	Vyncolit BXE650/1	108	22	1,98	0,055	11,111	2900
skleněná vlákna	Vyncolit BXE7660	101	19	1,84	0,055	10,326	3300
skleněná vlákna a minerální plnivo	Vyncolit W5000	90	29	2,08	0,043	13,942	2800
skleněná vlákna a minerální plnivo	Vyncolit X655RB	100	30	2,08	0,048	14,423	2700

Tabulka 10 Vlastnosti vybraných Fenolových pryskyřic od firmy SBHPP [19]

### 1.3.2.2. Polyimidy

Polyimidy se výhradně používají ve vysoce výkonných kompozitech, zejména ve formě prepregů. Mají velmi dobrou krátkodobou i dlouhodobou tepelnou stabilitu umožňující nepřetržité použití až do 260 °C a špičkové zatížení až do 480 °C. Mají dobré mechanické vlastnosti s omezeným tečením a odolnost vůči mnoha organickým chemikáliím [18].

Jsou ale poměrně drahé. Často mají dlouhé a energeticky náročné výrobní procesy a obtížné zpracování. Mají omezenou odolnost vůči světlu [18].

Příklady použití: Letecký průmysl, kosmonautika, části motorů, panely, elektronika, ozubená kola [18].

Průmyslová označení: Actymid, Compimide, Duratron, Kerimid, Vespel [18].

Výrobci: DuPont, Evonik, Sabic [18].

### 1.3.3. Možnosti vyztužení plastů

Pro zlepšení mechanických vlastností plastových materiálů se využívá různých druhů vláken. Nejčastěji využívaná jsou:

- Skleněná (glass fiber – GF)
- Uhlíková (carbon fiber – CF)
- Aramidová (aramid fiber – AF)
- Textilní (nylon, polyester)
- Průmyslová vlákna (PE, PTFE, PBO, Zylon)
- Přírodní vlákna (juta, len)
- Ocelová vlákna
- Minerální vlákna (bór, křemen)

V případě tzv. hybridního kompozitu je možné využít dva a více druhů vláken najednou.

Cíle vláknových výztuží jsou:

- Zvýšení modulu pružnosti a meze pevnosti
- Zlepšení teploty deformace při zatížení (heat deflection temperature – HDT)
- Snížení tendence k tečení – creepu při trvalém zatížení

Vlákna s nejlepším poměrem ceny a vlastností jsou skleněná a představují 95% spotřeby materiálu pro výztuž plastů. Jsou používána v různých formách a velikostech. Příze, stratipregy nebo prepregy, rohože a 2D a 3D výztužné struktury. Díky své všestrannosti, co se velikosti týče, jsou kompatibilní se všemi polymery. Jsou ale abrazivní vůči nástrojům s čímž se musí počítat při jejich výrobě [7, 18].

Průmyslová označení GF: Advantex, Araton, Glasslon, Fiberglass, Silenka, Vitron a další [7].

Výrobci: Asahi Glass, 3B Fiberglass, PPG [7, 18].

Uhlíková vlákna jsou používána pro vysoce namáhané součásti. Jejich mechanické vlastnosti jsou lepší než u skleněných vláken, navíc mají i menší hustotu. Jsou ale podstatně dražší a mají menší houževnost než GF [7].

Průmyslová označení CF: Besfigh, Carbolon, Pyrofil, Tenax a další [7].

Výrobci: Cyttec, SGL Group, Toray Industries [7].

Aramidová vlákna, jsou vlastnostmi srovnatelná s uhlíkovými. Cenově jsou střední cestou mezi GF a CF. Jsou ale nasákavé, citlivé na UV záření a obtížněji zpracovatelné [7, 18].

Průmyslová označení AF: Kevlar, Twaron, Paramid [7].

Výrobci: Aramid, DuPont, Teijin [7].

Přírodní výztuže se používají již velmi dlouho. Dřevěná moučka byla jedním z prvních plniv. V poslední době se objevil zájem o nahrazení GF právě přírodními vlákny, díky jejich šetrnosti k životnímu prostředí [7, 18].

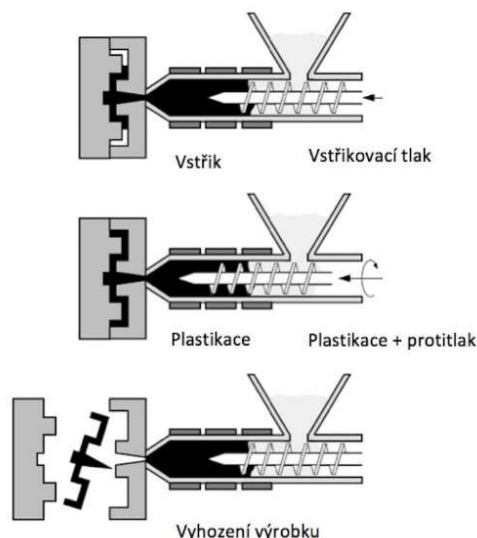
Minerální vlákna jsou potom používána k velmi specifickým účelům. Například bórová vlákna najdou uplatnění v letectví díky své tepelné odolnosti [7].

Vlastnosti kompozitu pak záleží na množství vláken, jejich délce a průměru, orientaci a formě. S přidáním vláken se z izotropního materiálu, ale stane materiál anizotropní. Mechanické vlastnosti pak nejsou ve všech směrech stejné.

## 2 Technologie výroby součásti z plastu

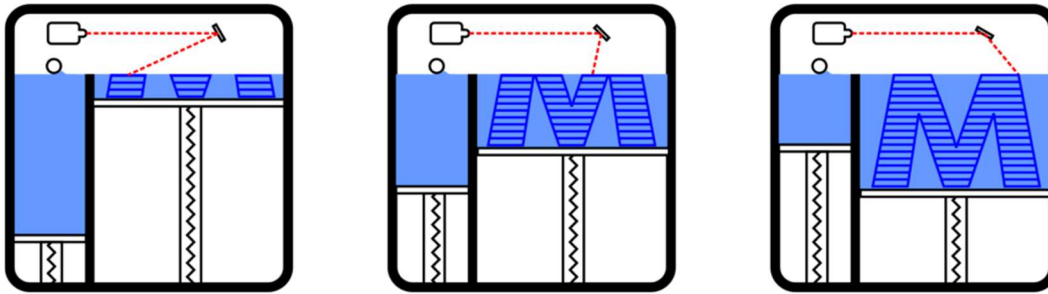
Pro součást vyrobenou z plastu byly zatím uvažovány celkem dva způsoby výroby. Vstřikování a 3D tisk. V této chvíli, ale nelze výrobu součásti přesně zvolit, natož navrhnout.

Vstřikování (společně s vyfukováním) je nejběžnější výrobní proces plastových dílů. Změkčený nebo úplně roztavený termoplast je vstřikován do dutiny formy, kde je následně ochlazen. Po ztuhnutí získá své konečné vlastnosti. Pokud zanedbáme smrštění a případnou deformaci má díl tvar dutiny formy [7]. Tímto způsobem se dají vyrábět také plasty vyztužené krátkými vlákny. Hodí se spíše pro velkosériové výroby, z hlediska ceny formy. Proto by forma měla být co nejjednodušší.



Obr. 3 Schéma procesu výroby pomocí vstřikování [20]

3D tisk se dělí na několik metod. Pro náš účel by byla nejvhodnější metoda SLS – Selective Laser Sintering. SLS využívá k výrobě dílů CO<sub>2</sub> laser, který podle počítačového 3D modelu spéká polymerní prášek do požadovaného tvaru. Celý proces probíhá ve výrobní komoře, ve které je po celé ploše postupně nanášen prášek ve vrstvách. Před začátkem výroby je komora stroje zaplavena inertním plynem. Roznašeč aplikuje tenkou vrstvu prášku po celé ploše, která je vyhřátá pomocí infralamp těsně pod teplotu tavení polymerního prášku. Laser následně vypálí konturu průřezu dílu, čímž dojde k selektivnímu sintrování prášku, tedy k roztavení částic materiálu a jejich spojení. Poté je vysintrován i vnitřek průřezu všech dílů. Po dokončení jedné celé vrstvy poklesne výrobní platforma o tloušťku vrstvy dílu. Laser v každé vrstvě speče a vytvrdí přesně definovaná místa. Všechny okolní prášek, který po celou dobu slouží jako opora pro vypálený díl, zůstane v nezměněné formě a je po dokončení výrobního procesu plně recyklován. Výrobní parametry jsou takto více stabilní a vyrobené díly nejsou tolik porézní. Celý proces se opakuje, dokud nejsou všechny díly vyrobeny [21]. Tato metoda také umožňuje výrobu součástí vyztužených vlákny, navíc je vhodnější pro malosériovou výrobu.



Obr. 4 Schéma procesu výroby pomocí SLS metody 3D tisku

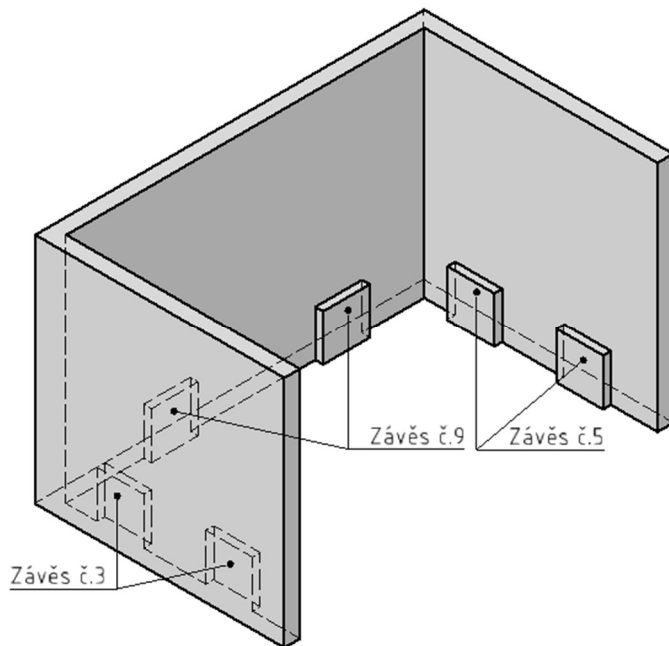
Firmy v České republice zabývající se metodou SLS:

- Admasys CZ [22]
  - Specializují se na zakázkový 3D tisk z termoplastů, kompozitů a kovů.
  - Nabízejí tisk z materiálů jako PEEK Carbon, ULTEM, PPSU, PVDF a kompozitů se spojitým uhlíkovým vláknem
- 3Dees Industries [23]
  - Nabízejí tisk z materiálů jako PA12, PA11, TPU a dalších
- Norck [24]
  - Nabízejí širokou škálu 3D tiskových služeb, včetně FDM, SLA, PolyJet a MJF.
  - Specializují se na technické materiály jako ABS, PC, Nylon, PEEK a elastomery.
- One3D [25]
  - Poskytují profesionální 3D tisk pro průmyslové aplikace včetně prototypování, malosériové výroby a funkčních dílů.
  - Specializují se na technologie FDM, SLA, SLS, MJF a PolyJet.
  - Nabízejí materiály vyztužené uhlíkovým nebo skelným vláknem.

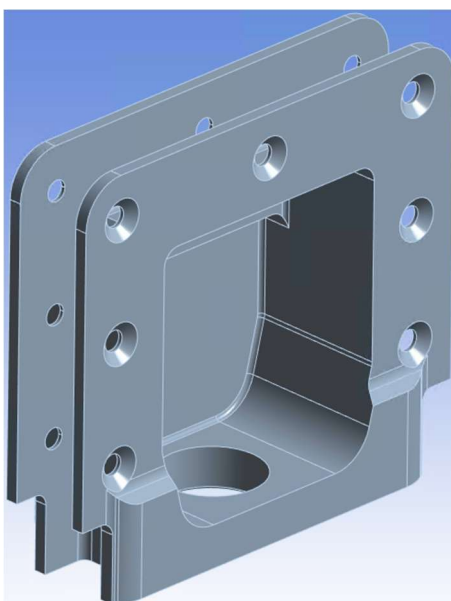
### 3 Analýza napětí a deformací

#### 3.1. Zjednodušení geometrie původního modelu

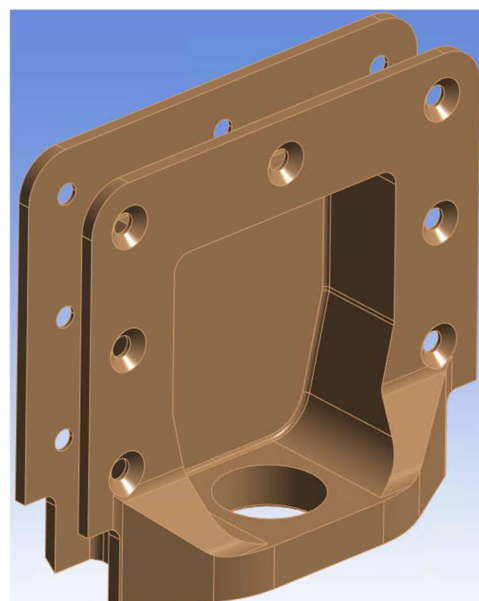
Průmyslovým partnerem byly dodány celkem 3 CAD modely (Závěsy č. 3,5,9). Ty obsahovaly vyříznutou sekci stěny kuchyňky v místě podlahového závěsu. Každý model se lišil částečně odlišným designem závěsu. Tento design závisí na pozici stěny kuchyňky, vůči dalším stěnám a prostorám kabiny letadla. Zbylé součásti byly ve všech případech stejné. Modely byly upraveny v softwaru Autodesk Inventor Professional 2025. Pro další postup budeme uvažovat model závěsu č. 5.



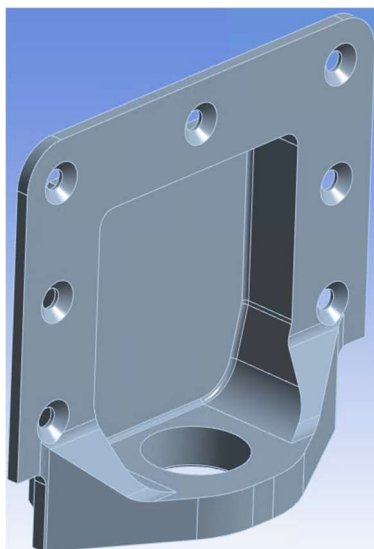
Obr. 5 Schématické znázornění jednotky kuchyňského koutu



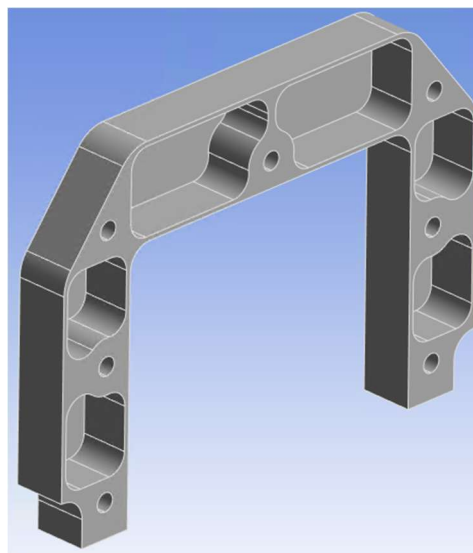
Obr. 6 Závěs – model 5



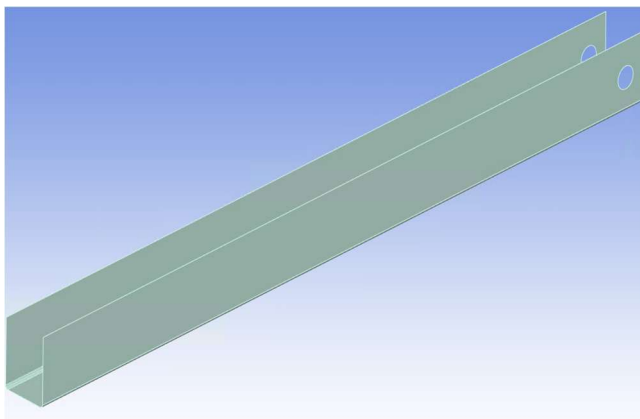
Obr. 7 Závěs – model 9



Obr. 8 Závěs – model 3



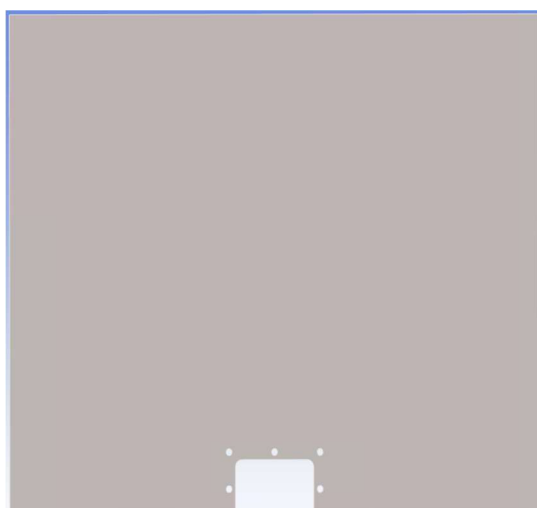
Obr. 9 Insert



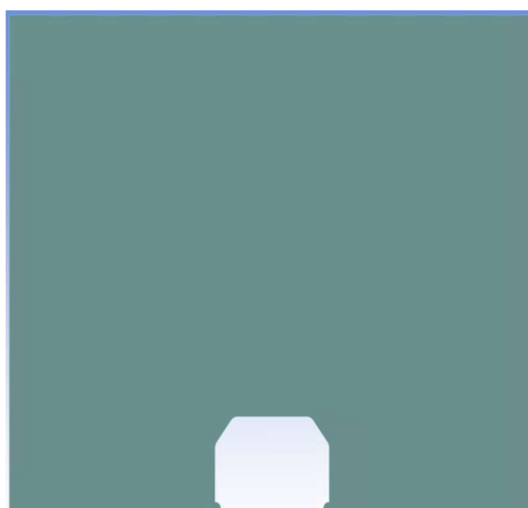
Obr. 10 Lišta



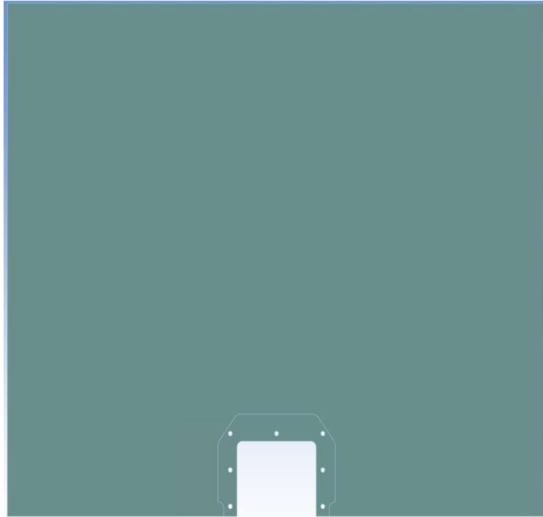
Obr. 11 Jádro sendviče



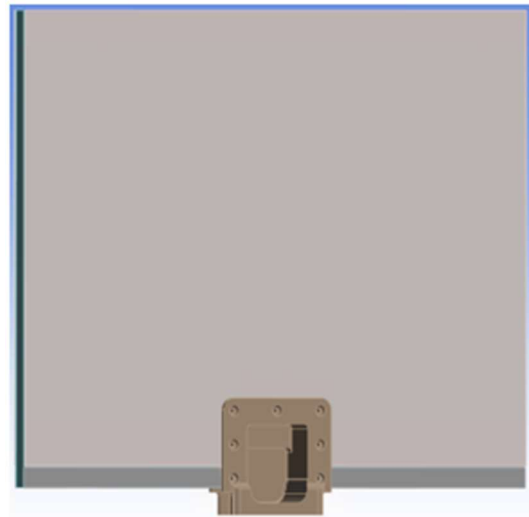
Obr. 12 Doubler



Obr. 13 Kompozitní potah 1



Obr. 14 Kompozitní potah 2



Obr. 15 Celá sestava

Pro výpočetní analýzu je zásadní příprava geometrie. Výpočetní náročnost stoupá s geometrickou složitostí modelu. Není ani nutné zohledňovat různé díry a vruby v místech, která nespádají do oblastí našeho zájmu. To samé také platí pro součásti, o kterých můžeme říct, že jsou pro výpočet nepodstatné. Z modelů byly odstraněny tyto prvky:

- 24 nýtů spojujících doublery se sendvičovou stěnou
- 14 šroubů spojujících závěs s insertem a stěnou
- šroub, kterým byl závěs přišroubován k podlaze, a jeho příslušenství (tři různé podložky, matice s pouzdrem + dvě další vložky)

Další úprava geometrie spočívala v odstranění děr, které zůstaly po nýtech z doublery a úprav stěny. Ta byla modelována jako jeden díl. Ve skutečnosti se ale sendvič skládal z jádra z nomexového papíru a kompozitních potahů. Model stěny byl tedy rozdělen na 3 části, jedno jádro a dva potahy. Mezi doublery a stěnou je mezera o 0,28 mm. Tato mezera mezi součástmi, nejspíše dává prostor pro vrstvu lepidla, kterým je doubler nalepen na stěnu. Mezera byla zachována.

### 3.2. Postup v ANSYS

Po úpravě geometrie, byl model ve formátu stp. vložen do softwaru ANSYS Workbench 2024 R2. Zde byla zahájena statická analýza v systému Static Structural.

Před zahájením výpočtu v Mechanicl, byla geometrie modelu ještě více upravena v DesignModeler. Zde bylo rozhodnuto, jakých prvků (elementů) sítě bude použito při analýze. Zájmové součásti, závěs a insert, byly ponechány v objemové geometrii – solid prvky. Zbylé části byly upraveny do skořepin, tedy shell prvků. Důvod použití shell elementů byl snížit výpočetní náročnost analýzy. Na díly sestavy byl použit příkaz Shared Topology (sdílená topologie). Sdílená topologie je funkce, která pomáhá propojit díly tím, že sdílí uzly sítě na společných rozhraních.

Do záložky Engineerign Data byly přidány použité materiály. U hliníkové slitiny Al 7075 - T6 (materiál závěsu a insertu) byl použit model pro simulaci plasticity materiálu – Bilinear Isotropic Hardening (bilinéární izotropní zpevnění). Pro tento model bylo potřeba vložit hodnotu meze

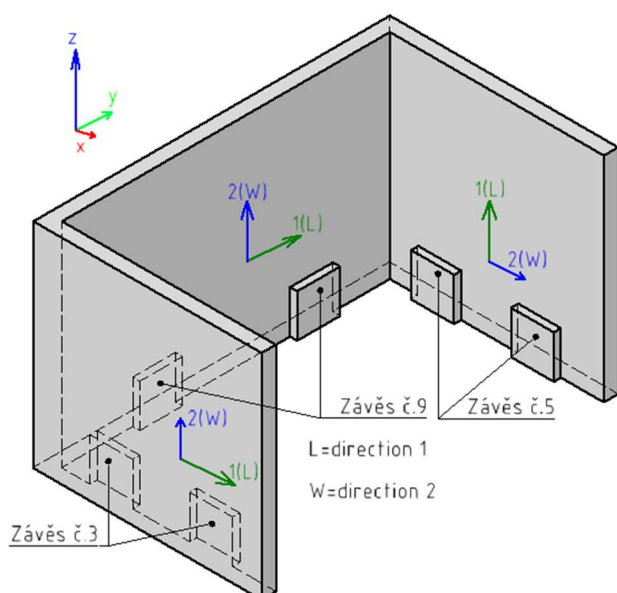
kлізу (yield strength) a tečný modul plasticity (plastic tangent modulus) [26]. Tečný modul byl zvolen 0, což zajistí perfektní plasticitu modelu.

Hliníkové slitiny se dají považovat za izotropní materiál, jejich mechanické vlastnosti jsou tudíž ve všech směrech stejné.

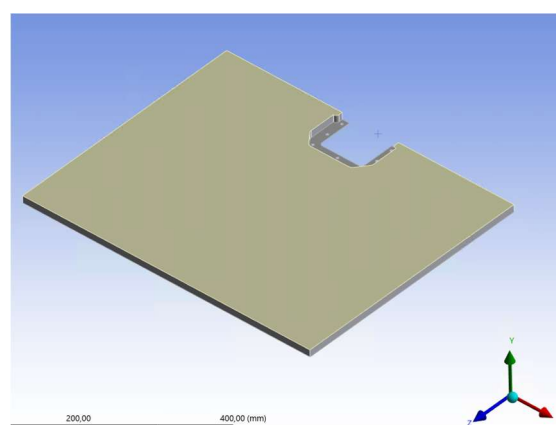
Součást	Materiál	Youngův modul E [GPa]	Poissonova konstanta $\mu$ [-]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Mez kluzu Re [MPa]	Tečný modul $E_T$ [GPa]
<b>závěs, insert</b>	Al 7075 T6	72	0,33	2,804	503	0
<b>doublery</b>	Al 5052 H32	70,3	0,33	2,68	-	-
<b>lišty</b>	Al 6061 T6	70	0,33	2,703	-	-

Tabulka 11 Izotropní materiály a jejich vlastnosti zadávané při simulaci

To samé se, ale nedá říct o jádru stěny z nomexového papíru a kompozitních potahů. Tyto materiály jsou ortotropní. Jejich mechanické vlastnosti v osových směrech se liší. Hodnoty jejich vlastností byly převzaty z interních dat výrobce sendvičové stěny.



Obr. 16 Orientace stěny v kuchyňském koutě



Obr. 17 Orientace stěny v simulaci

Pro náš souřadný systém platí:

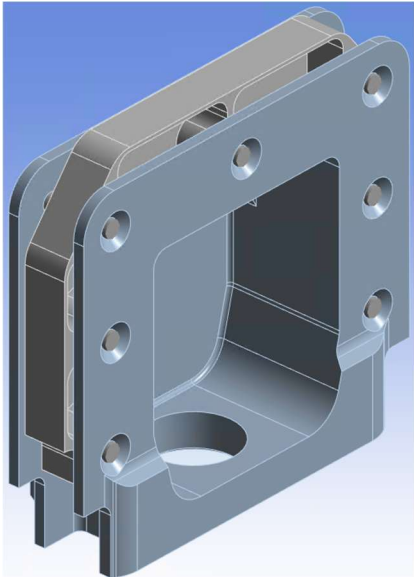
směry		roviny	
<b>x</b>	22	xy	23
<b>y</b>	33	yz	31
<b>z</b>	11	xz	12

Tabulka 12 Převod souřadného systému

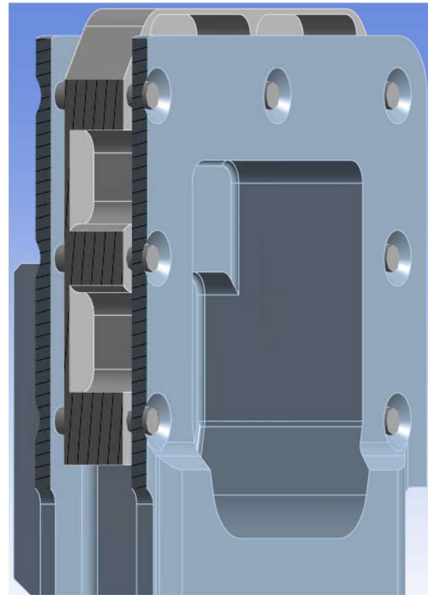
## Kontakty

Díly sendvičové konstrukce stěny a doublerů jsou ve skutečnosti slepené k sobě. Kontakty mezi součástmi sestavy byly tedy zvoleny jako bonded. V bonded kontaktu spolu dvě plochy interagují tak, že se od sebe neoddělují, ani po sobě nesklouvávají [27]. Chovají se jako by byly svařené k sobě. Tento kontakt je nejjednodušší náhradou lepeného, do jisté míry i šroubového spoje. Při

úpravě geometrie modelu byly sice šrouby ze závěsu odstraněny, pro simulaci přenosu zatížení s nimi ale musíme počítat. Při modelování sestavy obvykle vede zobrazení šroubů jako těles s objemovou geometrií (solid prvků) k velkým výpočetním modelům, jejichž řešení může trvat dlouho, nebo nemusí proběhnout vůbec [28]. Pro případ šroubů tedy bylo použito nastavení Beam Connections (nosníkových spojů). Při použití Beam Connections není potřeba modelovat geometrie šroubů, podložek ani matic. Nosníkové prvky (Beam elements) jsou vytvořeny v Ansys Mechanical, když je spojení přiřazeno ke dvěma otvorům.



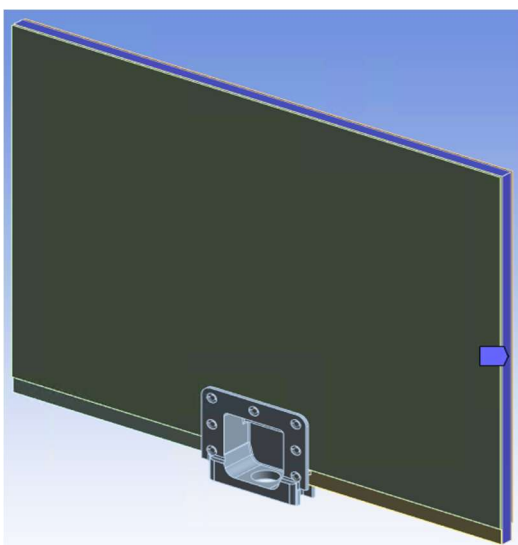
Obr. 18 Nosníkový spoj jako náhrada šroubů



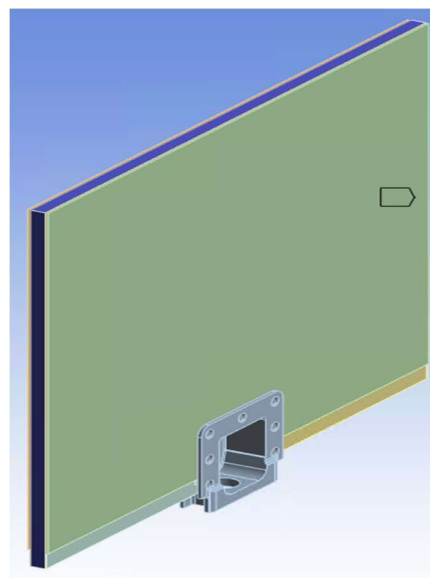
Obr. 19 Nosníkový spoj jako náhrada šroubů v řezu

### Okrajové podmínky a zatížení

Okrajové podmínky byly uvažovány jako vetknutí na okrajích stěny a doublerů.

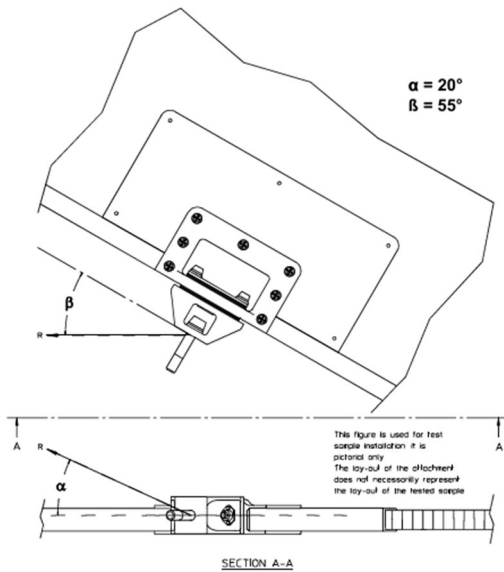


Obr. 20 Vetknutí stěny (označeno modře)



Obr. 21 Vetknutí stěny (označeno modře)

Zatížení bylo zadáno průmyslovým partnerem. Panel bude zatížen právě touto hodnotou. V případě modelu 5 o velikosti  $R = 22671 \text{ N}$ . Hodnota vycházela ze zátěžové zkoušky.



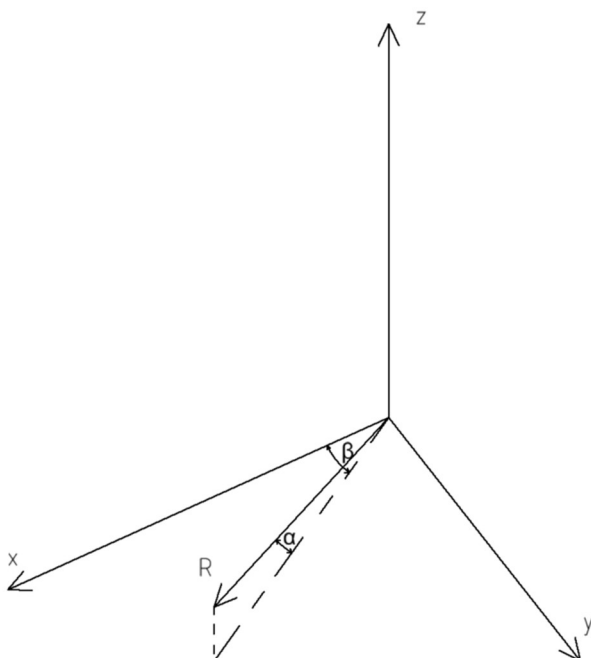
Obr. 22 Vektor zatížení  $R$



Obr. 23 Zátěžová zkouška

Vektor síly byl umístěn přes Remote Point na válcovou plochu díry pro upevnění šroubu na závěs, pod úhly  $\alpha$  a  $\beta$ . (viz. Obr. 22 Vektor zatížení  $R$ ). Remote points jsou způsob, jak zjednodušit propojení s pevným modelem — ať už se jedná o vrchol, hranu, plochu, těleso, uzel nebo plochu prvku — na bod v prostoru, do kterého bude zavedena síla  $R$ . Síla byla zavedena pomocí vektorových složek  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

**Výpočet složek zatížení  $R$ :**



Obr. 24 Zobrazení zatížení v souřadném systému

$$R = 22\,671 \text{ N}$$

$$\alpha = 20^\circ$$

$$\beta = 55^\circ$$

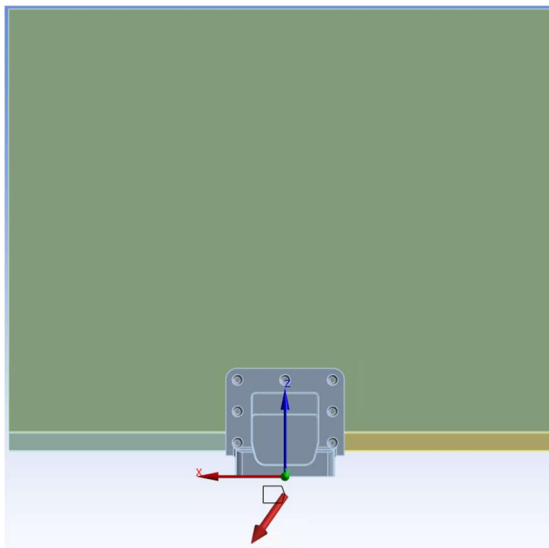
$$R_{xz} = R \cdot \cos \alpha = 22\,671 \cdot \cos 20^\circ = 21\,304 \text{ N}$$

$$R_x = R_{xz} \cdot \cos \beta = 21\,304 \cdot \cos 55^\circ = 12\,219 \text{ N}$$

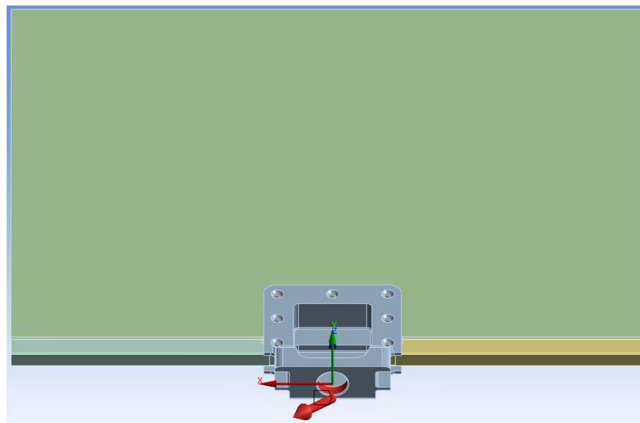
$$R_z = R_{xz} \cdot \sin \beta = 21\,304 \cdot \sin 55^\circ = 17\,451 \text{ N}$$

$$R_y = R \cdot \sin \alpha = 22\,671 \cdot \sin 20^\circ = 7\,754 \text{ N}$$

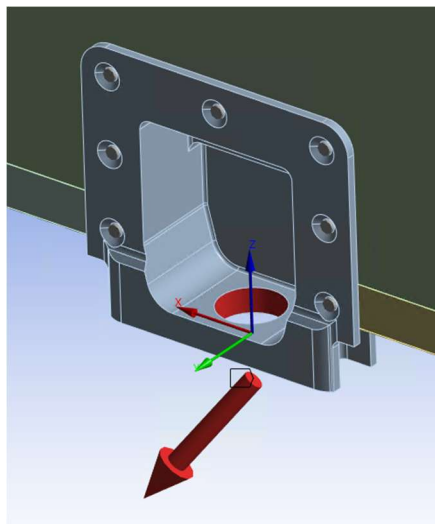
Kontrola správnosti výpočtu:  $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} = \sqrt{12\,219^2 + 7\,754^2 + 17\,451^2} = 22\,671 \text{ N}$



Obr. 25 Smysl zatížení



Obr. 26 Smysl zatížení



Obr. 27 Smysl zatížení

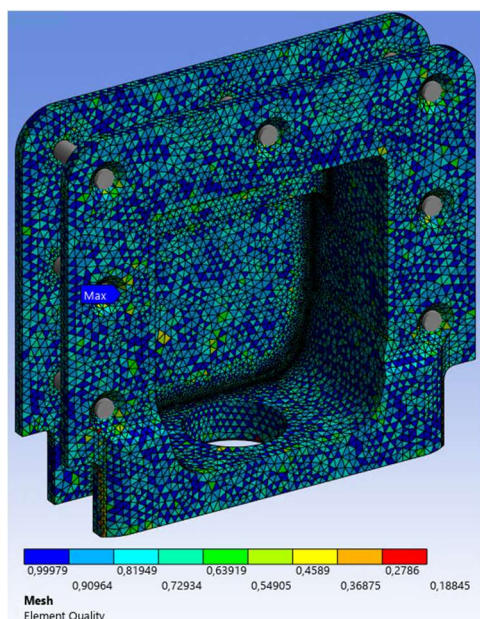
Červená válcová plocha označuje místo působení síly, počátek síly je ale až pod ní, leží v ose stavícího šroubu.

## Tvorba sítě

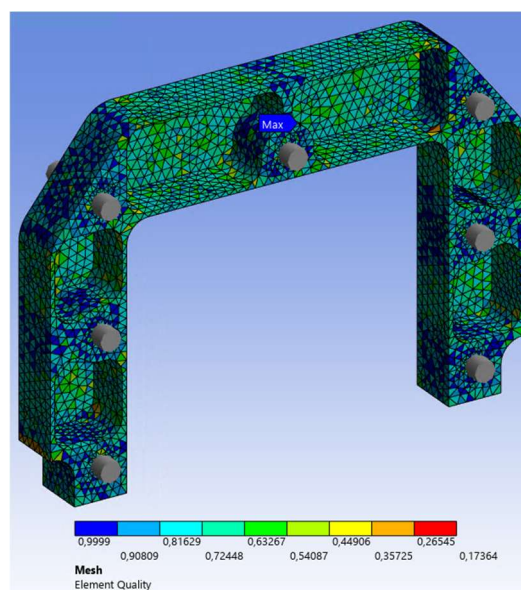
Ansys Mechanical automaticky vytváří síť pro všechny součásti. Pro větší přesnost výpočtu na závěsu a insertu bylo potřeba síť upravit. Na oba díly byla použita síť s tetrahedronovými elementy, kvůli jejich složité geometrii. Dále byla zmenšena velikost prvků na 2 mm (oproti defaultnímu nastavení 8,7 mm), pomocí příkazu Sizing. Na jádro stěny, byla použita metoda

Sweep. Tato metoda používá hexahedronové elementy, kde vzorec sítě je stejný ve všech vrstvách tělesa. Na některých z hran jádra bylo také potřeba upravit velikost prvků, aby tvar sítě odpovídal geometrickému tvaru. Další sizing na jádro byl přidán z důvodu zlepšení celkové kvality sítě. Je ale třeba zvážit kvalitu sítě oproti složitosti a době výpočtu. Vyšší kvalita obvykle vede k jemnější síti, a ta k delší době výpočtu.

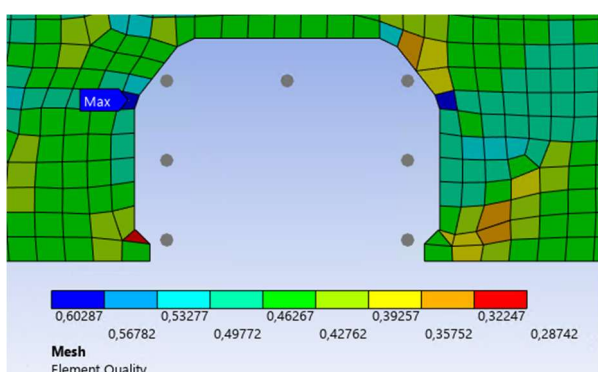
Při tvorbě sítě byly použity lineární i kvadratické elementy, nebo také prvky prvního a druhého řádu. Jejich názvy vycházejí z tvarové funkce, která určuje jejich řád. Lineární prvky mají uzly pouze ve vrcholech prvku, zatímco kvadratické mají navíc i uzly uprostřed hran [29]. Kvadratické elementy jsou používány přednostně a automaticky. ANSYS ale není vždy schopen vytvořit síť jenom s těmito prvky. Na jádru a kompozitních potazích, byli použity prvky prvního řádu, tedy lineární.



Obr. 28 Kvalita sítě závěsu

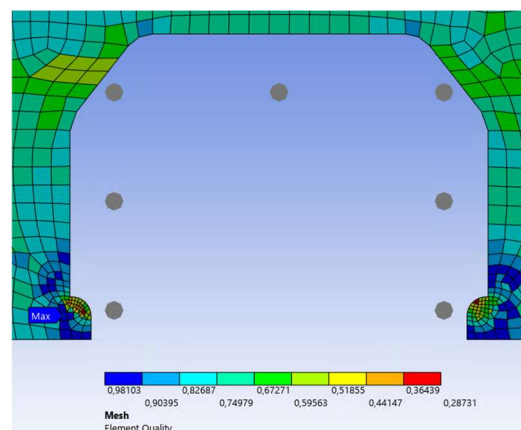


Obr. 29 Kvalita sítě Insertu



Obr. 30 Kvalita sítě Jádra před sizingem

Pozornost věnujte zaoblení spodní vnitřní hrany, kde se Jádro potkává s Insertem.



Obr. 31 Kvalita sítě Jádra po sizingu

počet uzlů sítě [-]	počet elementů sítě [-]	doba výpočtu [min]
493374	342645	51,4

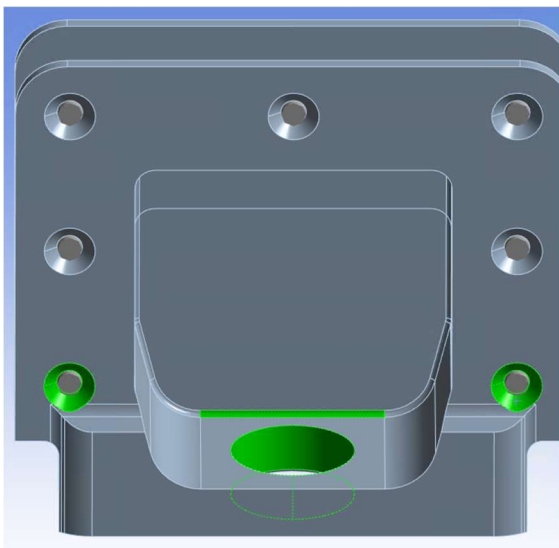
Tabulka 13 Výpočetní parametry modelu

## Nebezpečná místa

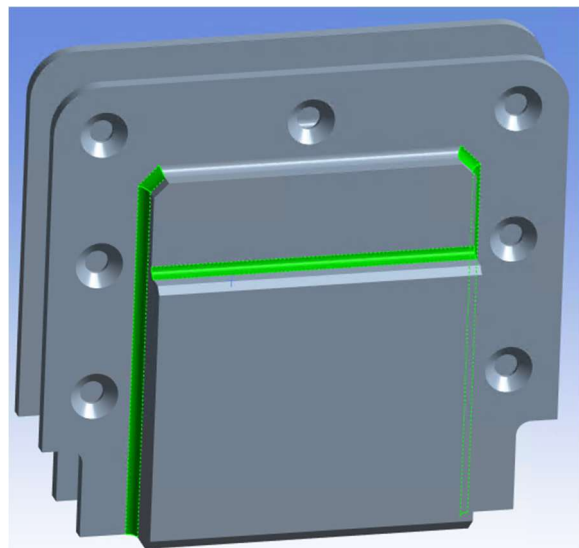
Na insertu a závěsu byla vytypovány oblasti špiček napětí.

- Závěs
  - Rádus uvnitř závěsu
  - Vybraná místa na přírubě
  - Díra pro podlahový šroub
  - Díry pro šrouby spojující závěs s insertem
- Insert
  - Hrany na okrajích součásti (V tomto případě se ale pravděpodobně jedná o špatný vliv simulace lepeného spoje. Nejspíše nejde o reálnou špičku napětí v součásti)
  - Díry pro šrouby spojující závěs s insertem

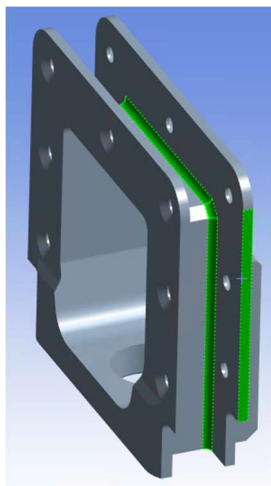
Místa jsou na obrázcích označena zeleně.



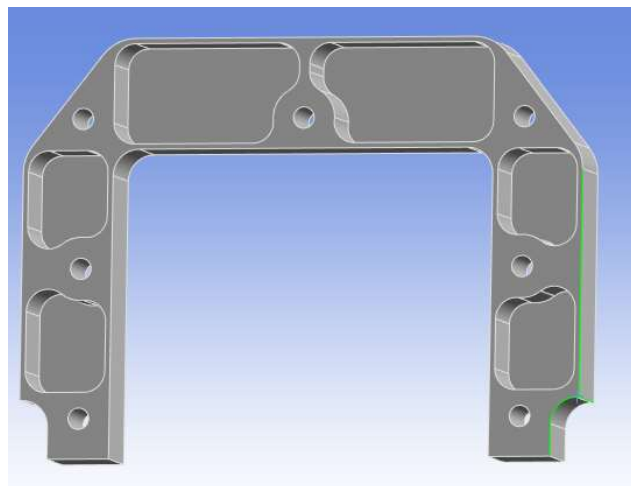
Obr. 32 Nebezpečná místa na závěsu



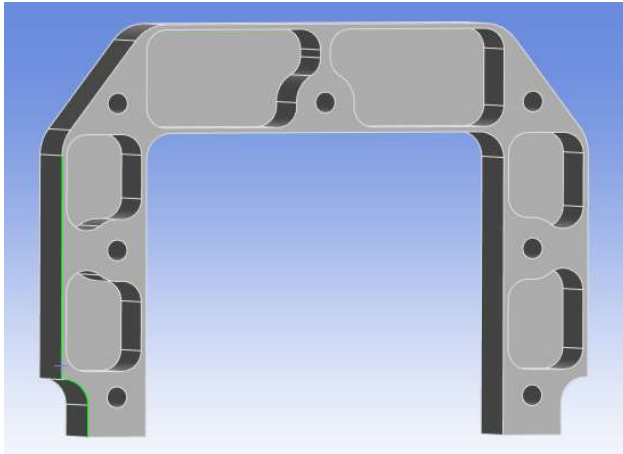
Obr. 33 Nebezpečná místa na závěsu



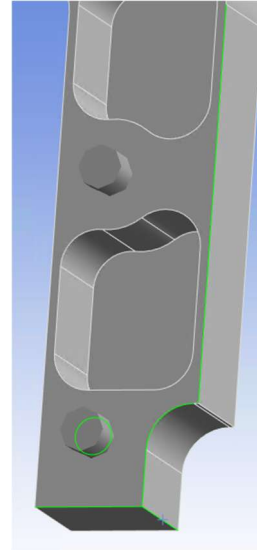
Obr. 34 Nebezpečná místa na závěsu



Obr. 35 Nebezpečná místa na insertu



Obr. 36 Nebezpečná místa na insertu

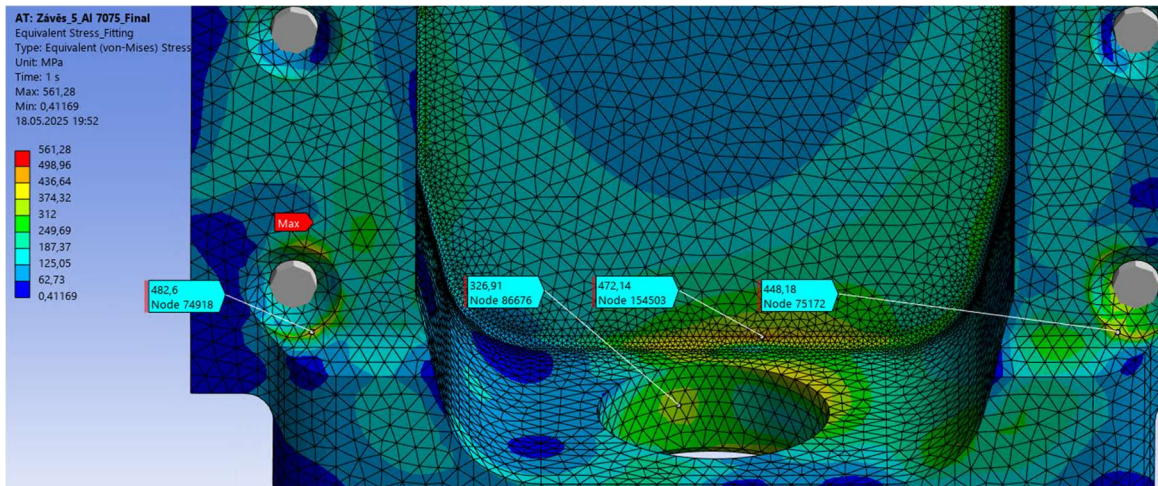


Obr. 37 Nebezpečná místa na insertu

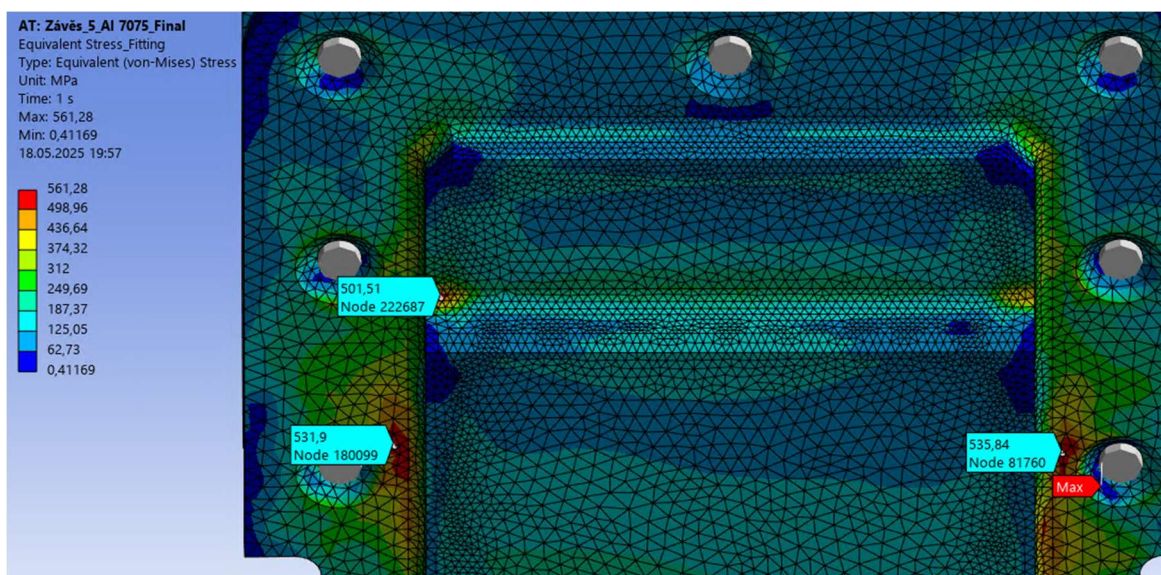
Všechny konečno-prvkové modely jsou zjednodušené představy skutečných geometrií a zatížení. Mezi běžná zjednodušení patří:

- lineárně elastický model materiálu
- bodová zatížení/okrajové podmínky aplikované na jediný uzel
- ostré hrany v CAD modelu – bez zaoblení

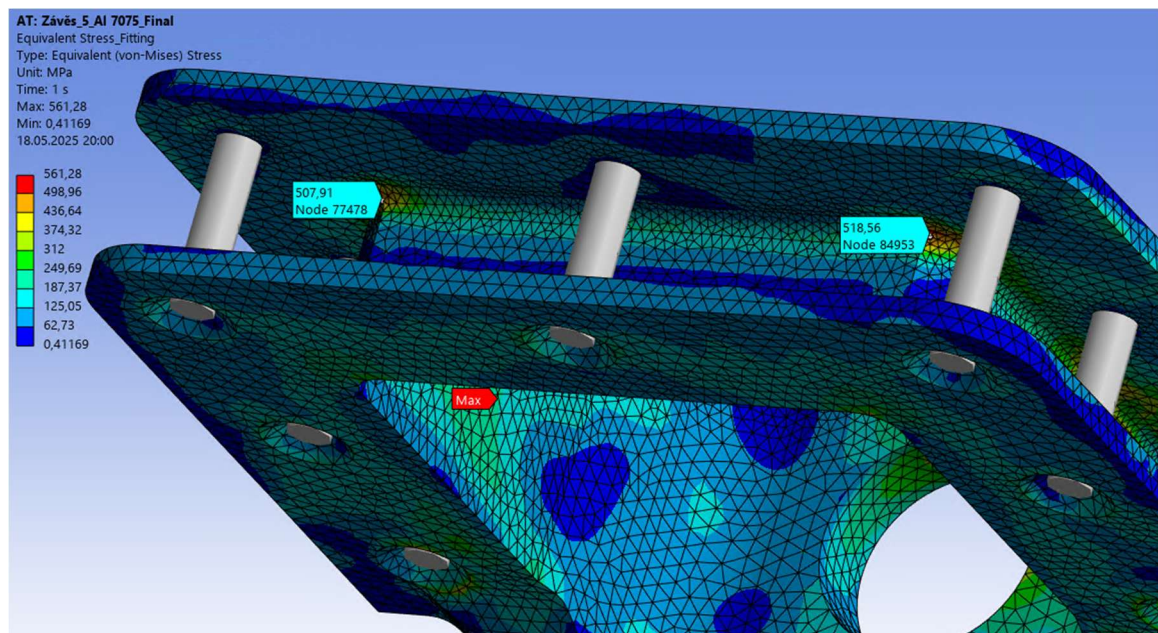
Tato zjednodušení jsou v praxi používané modelovací techniky. Při tvorbě praktických MKP modelů, však mohou způsobit matematické singularity, které vedou k uměle vysokým lokálním napětím. Vypočtené napětí v místě singularity u modelu nebude konvergovat k určité hodnotě, protože teoretická mez napětí v místě singularity je nekonečná. Zvyšování jemnosti sítě povede ke zvyšování napětí v místě singularity. Vysoké špičky napětí nemusí nutně znamenat, že model je nepoužitelný. Singularity je lokální jev. I když vypočtené napětí v místě singularity neodpovídá skutečnému napětí, posuvy by měly být správné a napětí v blízkém okolí rovněž. Odstranění všech singularit pomocí zpřesnění modelu nemusí být praktické nebo vůbec možné. Často je rozumnější ponechat singularity v modelu a následně pomocí inženýrského úsudku posoudit jejich vliv na celkovou pevnost konstrukce. Napětí v místě singularity není skutečné. Jedná se o numerický produkt [30].



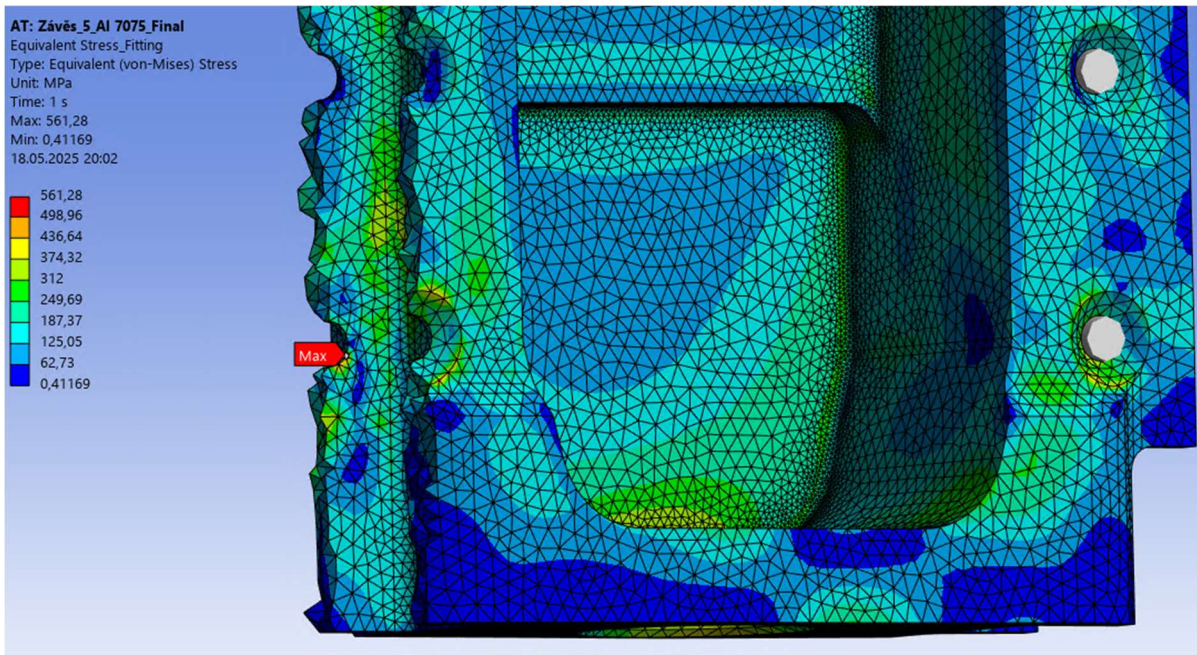
Obr. 38 Špičky napětí na závěsu



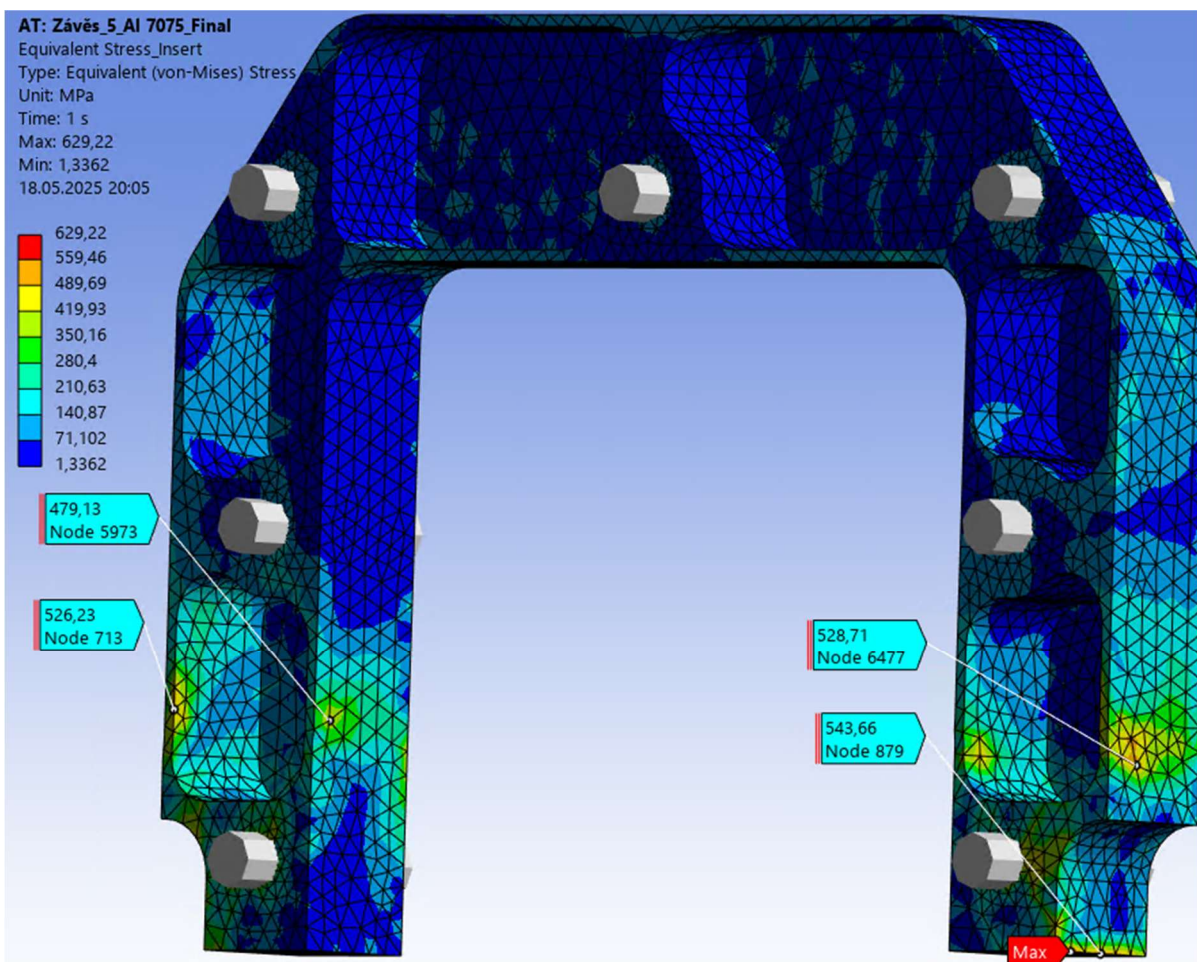
Obr. 39 Špičky napětí na závěsu



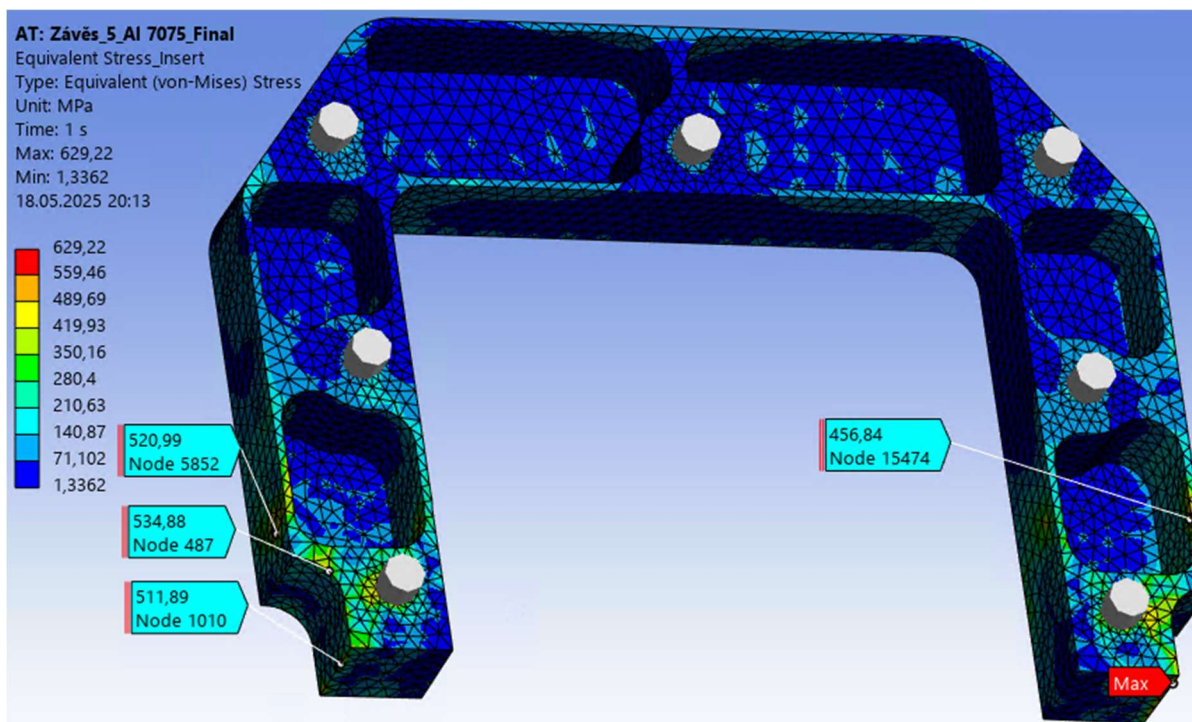
Obr. 40 Špičky napětí na závěsu



Obr. 41 Špičky napětí na závěsu



Obr. 42 Špičky napětí na insertu



Obr. 43 Špičky napětí na insertu

### 3.3. Výměna materiálu

Po nastavení modelu s původní hliníkovou slitinou byl materiál závěsu a insertu vyměněn. Z rešerše vhodných plastových materiálů bylo navrženo 5 vzorků a proběhly jejich simulace.

- Polyetheretherketon z 30% vyztužený skelnými vlákny – Tecopeek PK40 GR 30 NL (viz. Tabulka 6 Vlastnosti vybraných PEEK od firmy Evonik)
- Polyphenylen sulfid z 30% vyztužený skelnými vlákny – Ryton XE5030BL (viz. Tabulka 8 Vlastnosti vybraných PPS od firmy Resinex)
- Polyetherimid 30% vyztužený skelnými vlákny – ULTEM RESIN 2300 (viz. Tabulka 9 Vlastnosti vybraných PEI od firmy Sabic)
- Polysulfon z 20% vyztužený skelnými vlákny – Ultrason E 2010 G4 MR SW 155102 (viz. Tabulka 7 Vlastnosti vybraných PSU od firem BASF a Syensqo)
- Polyamid z 25% vyztužený skelnými vlákny – LEONA SN11B \*33K2 (viz. Tabulka 5 Vlastnosti vybraných PA od firmy Asahi Kasei)

Materiály zbylých součástí byly ponechány nezměněné.

Materiál	Youngův modul E [GPa]	Poissonova konstanta $\mu$ [-]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Polyetheretherketon</b>	11	0,34	1,52
<b>Polyphenylen sulfid</b>	8,96	0,38	1,51
<b>Polyetherimid</b>	10,5	0,38	1,51
<b>Polysulfon</b>	7	0,42	1,5
<b>Polyamid</b>	10,2	0,33	1,4

Tabulka 14 Plastové materiály a jejich vlastnosti zadávané při simulaci

Pro simulaci modelu s plastovými materiály, už nebylo uvažováno bilineární izotropní zpevnění, tedy ani žádná plasticita materiálu. U plastů se totiž ve většině případů neuvádí mez kluzu, jejíž

hodnoty by bylo potřeba. Tento fakt vychází z materiálových zkoušek, kdy kovy se testují na tah, a plasty spíše na ohyb. Je třeba také podotknout, že plastové materiály nejsou izotropní materiály a kompozity už vůbec ne. Jsou to materiály anizotropní a jejich vlastnosti se v různých směrech liší. Vlastnosti v tomto případě velmi závisí na geometrii součásti, způsobu její výroby a směru vláken k vyztužení. Tyto vlastnosti v této chvíli ale neznáme, nemůžeme s nimi tedy ani pracovat. Software tedy stále počítá s myšlenkovým modelem izotropie plastových materiálů.

### 3.4. Srovnání výsledků

Po dokončení analýzy byly výsledky shrnuty do tabulky a vizuálně porovnány v grafech. Byly porovnávány tyto veličiny:

- Mez pevnosti
- Youngův modul
- Hustota
- Hmotnost (závěs + insert)
- Celková deformace
- Napětí na závěsu
- Napětí na insertu
- Přibližná cena materiálu
- Konkrétní cena na 1 kg (při zachování původní geometrie modelu)

Materiál	Mez pevnosti [MPa]	Youngův modul pružnosti [GPa]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Hmotnost závěs + insert [g]	Deformace - celková [mm]
Al 7075	572	72	2,804	269,388	13,59
PEEK	175	11	1,52	146,032	13,86
Polyphenylen	131	8,96	1,51	145,069	14,52
Polyetherimid	175	10,5	1,51	145,069	14,03
Polysulfon	130	7	1,5	144,107	15,37
Polyamid	150	10,2	1,4	134,5	14,08

Tabulka 15 Výstupy z analýzy deformací a napětí

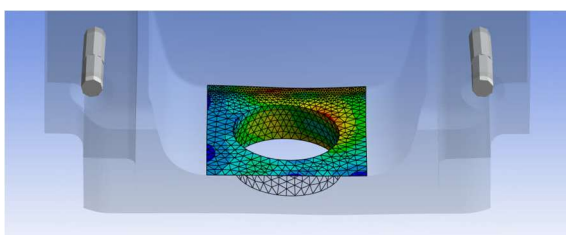
Materiál	Deformace v místě zavedení síly na závěs [mm]		Napětí na závěsu [MPa]	Napětí na insertu [MPa]	Přibližná cena materiálu [€/kg]	Konkrétní cena při zachování původní geometrie - závěs+insert [€]
	celková					
Al 7075	celková	14,441	480	574	2,5	0,67347
	x	0,275				
	y	14,434				
	z	-0,091				

PEEK	celková	15,514	470,04	177,48	50-75	7,3-11
	x	1,137				
	y	15,439				
	z	-1,015				
Polyphenylen Sulfid	celková	16,413	467,56	343,95	7-13	1,02-1,89
	x	1,379				
	y	16,312				
	z	-1,190				
Polyetherimide	celková	15,744	469,29	365,59	10-15	1,45-2,18
	x	1,196				
	y	15,663				
	z	-1,057				
Polysulfon	celková	17,63	465,73	287,24	7-12	1,01-1,73
	x	1,742				
	y	17,484				
	z	-1,447				
Polyamid	celková	15,801	469,42	385,67	3,2-3,7	0,43-0,498
	x	1,213				
	y	15,718				
	z	-1,071				

Tabulka 16 Výstupy z analýzy deformací a napětí

Ceny materiálů uvedené v tabulce jsou pouze cenami čistých plastů, bez vyztužení, přibližné, neaktuální hodnoty pro porovnání. Ceny plastů závisí na cenách ropy a dalších trendech. Cenu hotové součásti v tuto chvíli nelze určit ani přibližně. Závisí jak na aditivech materiálu, tak na použití vláken či plnidel, a hlavně na výrobě. Cena samotného materiálu by mohla být cca 5-10% celkové ceny součásti (podle pana doc. Zouhara).

Vzhledem ke špičkám napětí na závěsu bylo napětí vyhodnocováno na plochách součásti, kde nejspíš dojde k největším deformacím. Tedy plochy okolo díry pro stavěcí šroub. Jedná se o Equivalent von-Mises, což je redukované napětí. To samé platí pro insert, u kterého byl pro analýzu napětí vybrán objem jeho spodní části.

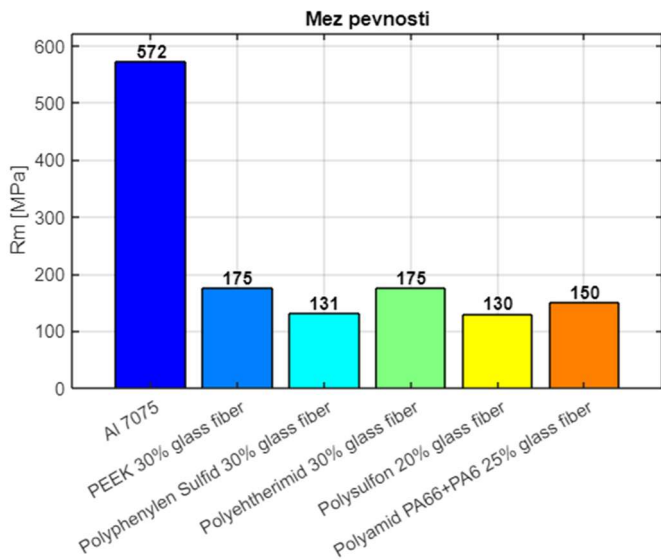


Obr. 44 Vybrané plochy závěsu pro analýzu napětí

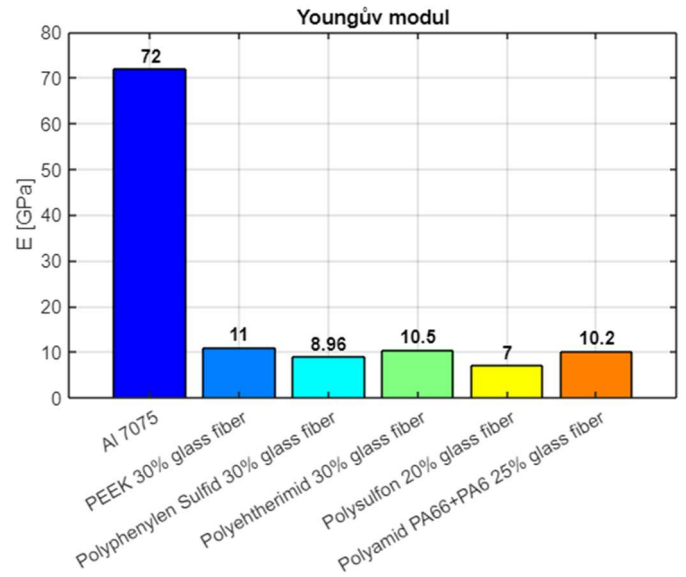


Obr. 45 Vybraný objem insertu pro analýzu napětí

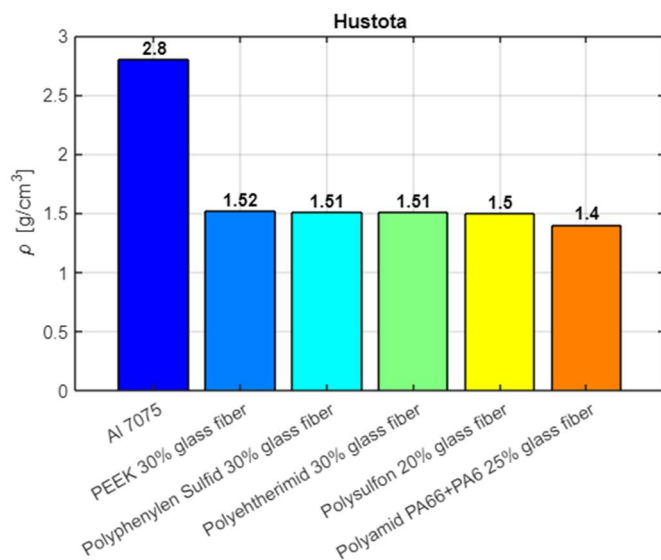
Následující grafy vyobrazují, jak se měnily vybrané vlastnosti modelu při změně materiálu závěsu a insertu.



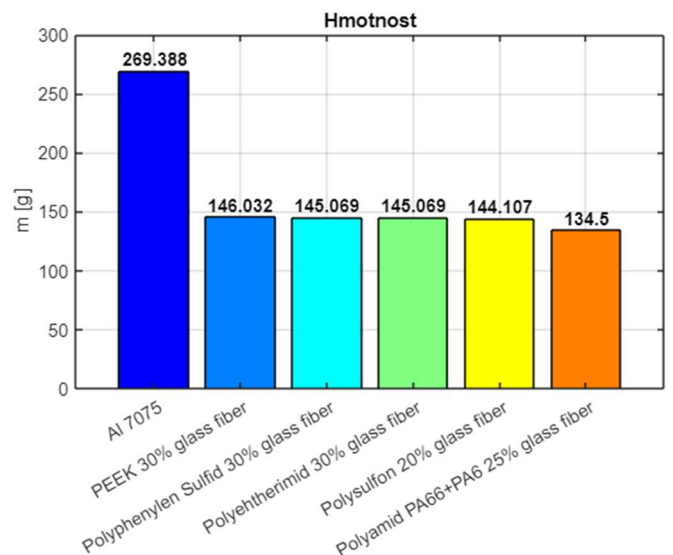
Graf 1 Srovnání meze pevnosti



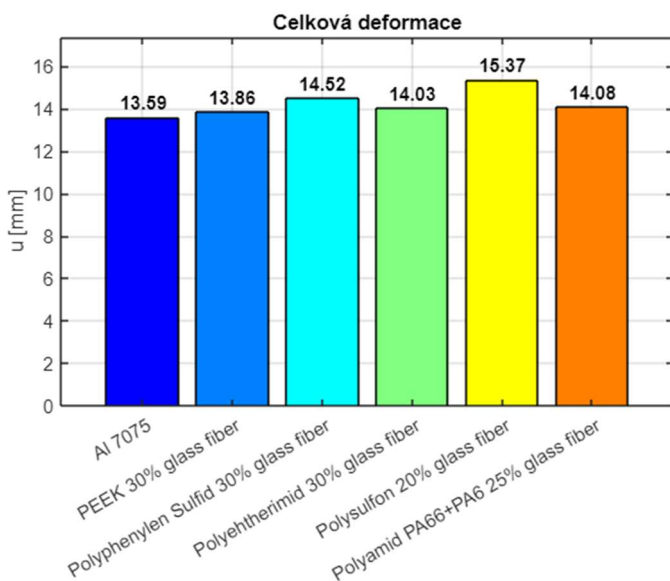
Graf 2 Srovnání Youngova modulu



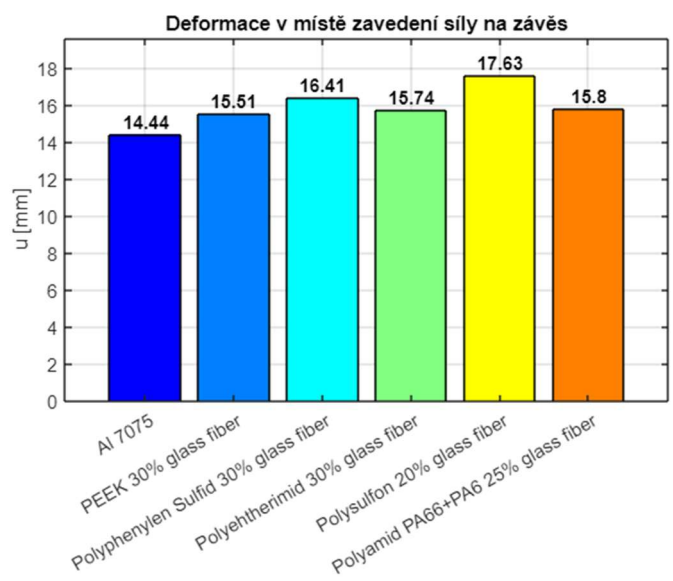
Graf 3 Srovnání hustoty



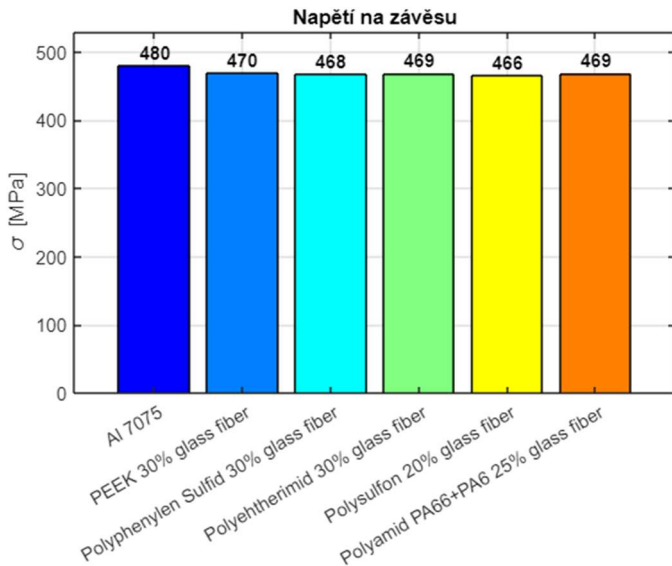
Graf 4 Srovnání hmotnosti



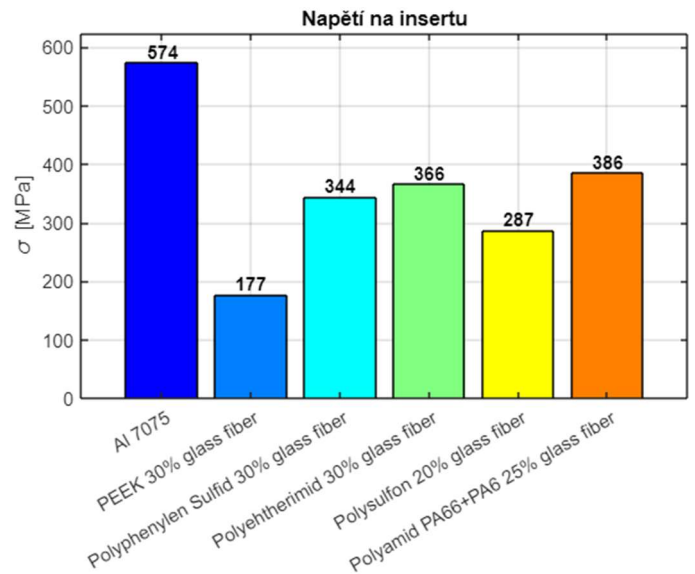
Graf 5 Srovnání celkové deformace



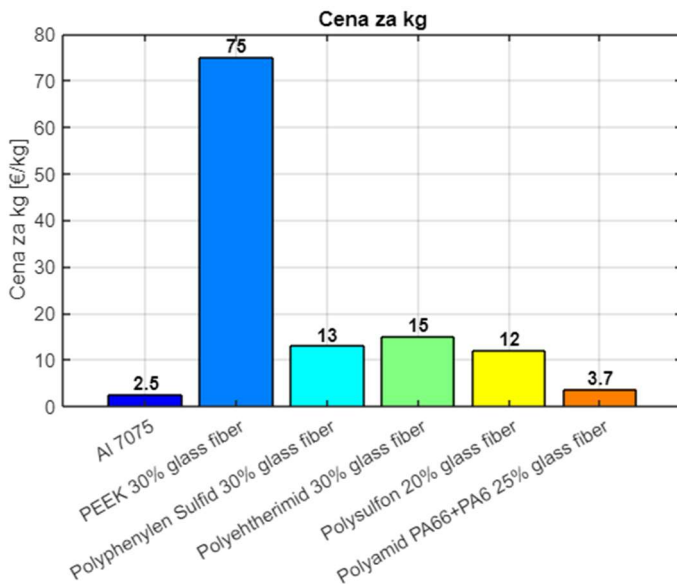
Graf 6 Srovnání deformace v místě zavedení síly na závěs



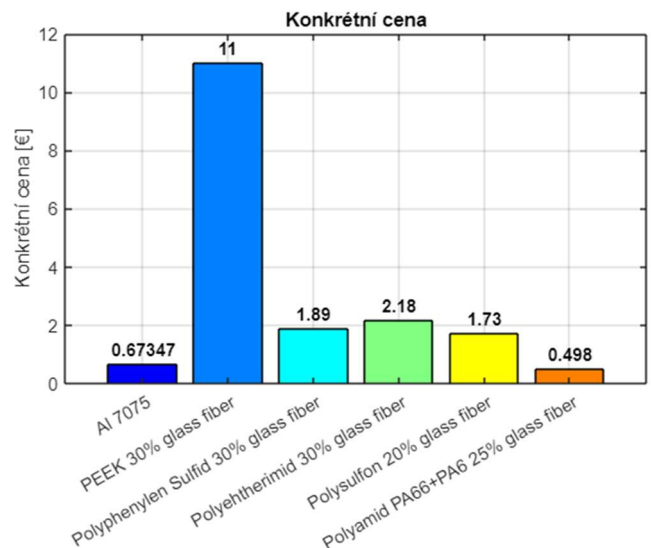
Graf 7 Srovnání napětí na závěsu



Graf 8 Srovnání napětí na insertu



Graf 9 Srovnání ceny za 1 kilogram



Graf 10 Srovnání konkrétní ceny

## 4 Pojetí nové geometrie

Se změnou materiálu z hliníkové slitiny na plast, se pojí také možná změna geometrie závěsu a insertu. Mechanické vlastnosti plastu jsou o třídu níže než ty u hliníkových slitin. Bylo uvažováno o následujících variantách.

Geometrie závěsu by zůstala z větší části stejná. Pro přenos stejného zatížení je ale potřeba, do jisté míry, upravit rozměry závěsu. Zvětšila by se tloušťka stěn a celková plocha, kterou závěs svírá stěnu kuchyňky. Dále by se pravděpodobně musel upravit způsob šroubení závěsu k podlaze. Do plastu není vhodné vyrábět závit pro šroub. Bylo by vhodnější do otvoru pro šroub nalísovat vložku se závitem. Závitovými vložkami se zabývá například firma Penn Engineering [31].



Obr. 46 Vložka se závitem [31]



Obr. 47 Vložka se závitem – pohled v řezu [31]

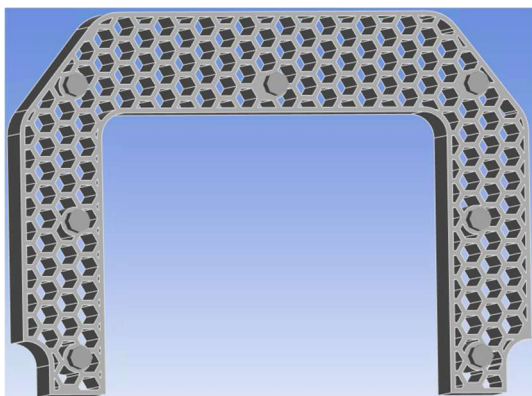
Další možností je rozdělit závěs na dva díly. Důvodem této varianty je výroba součásti. Kdyby se měl závěs vyrábět vstřikováním, při svém současném tvaru by byl návrh vstřikovací formy velmi složitý. Rozdělením na dvě části by se výroba zjednodušila. Obě části by se vyrobily odděleně a tvarovým stykem by do sebe zapadaly. Nevýhodou této varianty je problém z hlediska přenosu zatížení ve všech směrech. Tvar obou částí by musel být pečlivě navrhnout. Čím složitější navíc součást bude, tím více vzrůstá nejistota přesnosti výpočetního modelu, správné formulace kontaktů a dalších parametrů.

Úprava insertu by byla vyžadována hlavně z důvodu jeho výroby. Součást by se pravděpodobně vyráběla vstřikováním. Insert by tedy měl mít rovinu symetrie, aby forma mohla být co nejjednodušší. Skládal by se z rámu, který by byl vyplněn žebrováním. Žebrování by mělo tvar trojúhelníků, anebo voštiny pro nejlepší přenos zatížení. Mohl by se také změnit způsob šroubení do insertu. Momentálně jsou insert a závěs spojeny sedmi páry šroubů, pár je zašroubován do díry naproti sobě.

Návrhy šroubení:

- Samořezné šrouby  
Jednoduchá montáž zašroubováním rovnou do plastu. Spoj by ale po opakovaném šroubování vykazoval horší vlastnosti. Stěna díry by musela být větší vzhledem k ostatním rozměrům součásti, mohlo by tak dojít ke staženinám při výrobě.
- Průchozí šroub s maticí  
Tímto způsobem by v insertu nemusel být závit. Při montáži by ale musel být přístup k panelu z obou stran.
- Šrouby bez společné díry  
Každý šroub by měl svoji díru pro zašroubování. Zatížení by se rozložilo po součásti.
- Původní varianta dvou šroubů naproti sobě  
Ponechat původní variantu. Použití závitových vložek do děr pro šrouby.

Pro nový design insertu, s voštinovým žebrováním, byly zpracovány nové analýzy napětí a deformací. Geometrie závěsu byla zachována. Zatížení, kontakty, síť a další parametry analýzy zůstaly stejné.

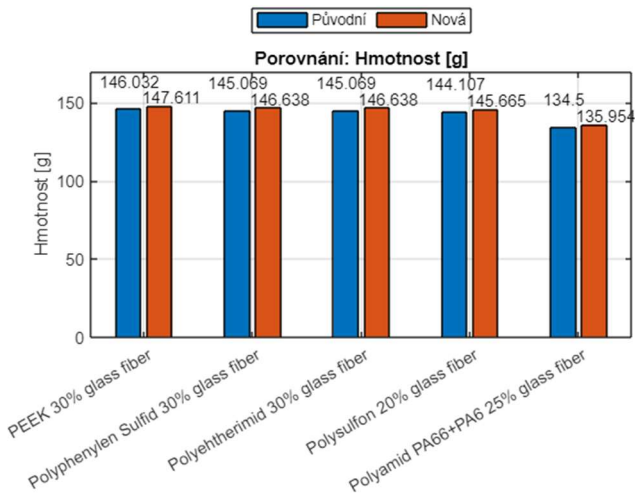


Obr. 48 Návrh designu insertu s voštinovým žebrováním s původní variantou šroubení

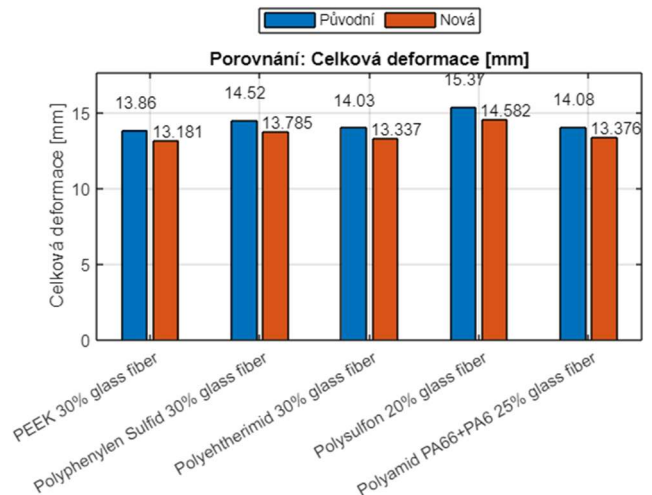
Materiál	Hmotnost závěs + insert [g]	Deformace – celková [mm]	Deformace v místě zavedení síly na závěs [mm]		Napětí na závěsu [MPa]	Napětí na insertu [MPa]	Konkrétní cena materiálu – původní závěs + nový insert [€]
			celková				
PEEK	147,611	13,181	celková	14,764	477,34	231,63	7,38-11,07
			x	1,138			
			y	14,685			
			z	-1,003			
Polyphenylen Sulfid	146,638	13,785	celková	15,606	474,47	238,64	1,027 -1,906
			x	1,381			
			y	15,5			
			z	-1,176			
Polyetherimide	146,638	13,337	celková	14,984	476,58	247,15	1,466 -2,2
			x	1,198			
			y	14,9			
			z	-1,045			
Polysulfon	145,665	14,582	celková	16,753	472,45	235,07	1,020-1,748
			x	1,745			
			y	16,6			
			z	-1,432			
Polyamid	135,954	13,376	celková	15,029	476,54	164,92	0,4351-0,5031
			x	1,215			
			y	14,942			
			z	-1,059			

Tabulka 17 Výstupy z analýzy deformací a napětí závěsu snovou geometrií insertu

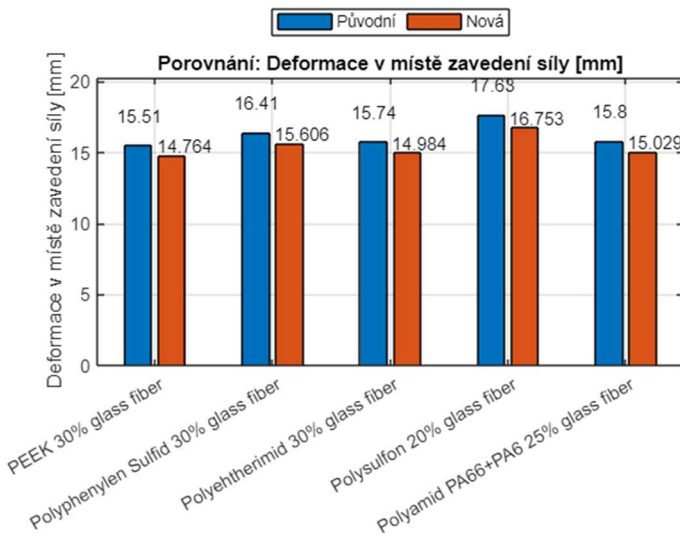
Grafy níže srovnávají pět dříve vybraných plastových materiálů. Jsou ukázány veličiny, které se změnilo. Modře označené sloupce představují původní geometrii, rudě označeny jsou sloupce s novou geometrií insertu. Můžeme vidět, že chování vlastností nové geometrie se neliší od té původní. Hodnoty hmotností, cen a deformací ale poklesly. Stejně tak pokleslo napětí na závěsu. Napětí na insertu naopak vzrostlo.



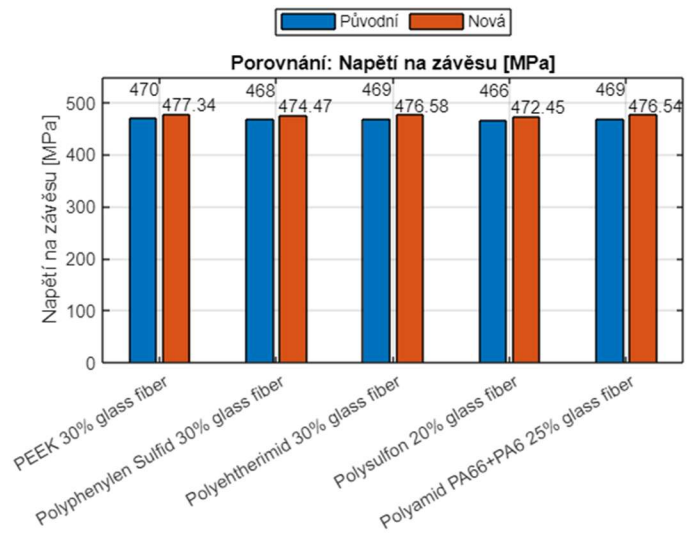
Graf 11 Porovnání hmotností



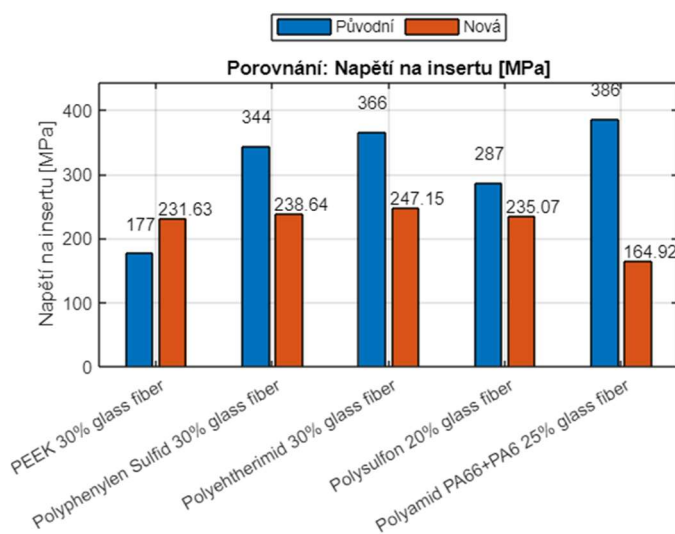
Graf 12 Porovnání celkové deformace



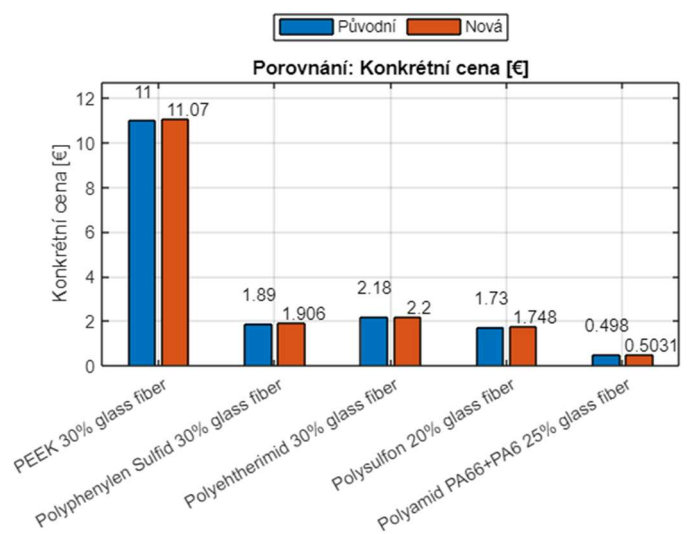
Graf 13 Porovnání deformace v místě zavedení síly



Graf 14 Porovnání napětí na závěsu



Graf 15 Porovnání napětí na insertu



Graf 16 Porovnání konkrétní ceny

## Závěr

Cílem práce bylo provést rešerši vhodných materiálů pro náhradu podlahového závěsu do kuchyňky dopravního letounu. Poté zpracovat analýzu napětí a deformací modelu součásti. A nakonec navrhnout novou geometrii součástí a zhotovit novou analýzu.

Původní materiál závěsu byla hliníková slitina Al 7075 T6. Důvod požadavku na její výměnu bylo korozní praskání. K odstranění tohoto problému by slitina mohla prodělat jinou tepelnou úpravu T73. Je také možné zvolit jinou hliníkovou slitinu s podobnými vlastnostmi jako 7075, ale s lepší korozní odolností. Průmyslový partner se ale spíše kloní k výzkumu součásti z plastu. V rámci rešerše materiálů byly tedy dále zkoumány termoplasty a reaktoplasty. Byly zvoleny různé polymery těchto dvou tříd, zejména na základě jejich hořlavosti. Požadavkem bylo hodnocení UL 94 – V0. Jelikož plasty svými mechanickými vlastnostmi zaostávají za kovy, zvažovaly se také různé druhy vyztužení. Vyztužení byla shrnuta a bylo zjištěno, že nejčastěji se v praxi využívají skleněná vlákna, pro jejich přijatelnou cenu a dobré mechanické vlastnosti. Co se týče technologie výroby, byly navrženy dvě metody. Vstřikování a SLS 3D tisk. Vstřikování je vhodné pro svou rozšířenost a zavedenost ve výrobě plastových dílů. 3D tisk je potom atraktivní pro malosériovou výrobu. V této chvíli nemůžeme jistě rozhodnout jakou metodu zvolit či nezvolit, nebo naopak využít obě.

Z obdržené geometrie od průmyslového partnera byly zpracovány CAD (Computer-aided Design) modely. Tyto upravené modely podstoupily napěťovou a deformační analýzu v softwaru ANSYS Workbench 2024 R2. Materiál součásti se v analýze postupně vyměňoval z původní slitiny na vybrané plastové vzorky. Výsledky byly graficky porovnány. Je třeba podotknout, že celá simulace byla jen hrubým nástinem reálné situace. Bylo uvažováno lineárně-elastické chování modelu a izotropie všech materiálů. Také kontakty byly zjednodušeny. Výsledky tedy nepopisují skutečnost, slouží pouze k porovnání jednotlivých modelů mezi sebou.

Z hlediska deformací je nejvhodnějším materiálem PEEK. Ten je ale velmi drahý. Z hlediska poměru deformaci ku ceně materiálu je nejlepší polyamid. Součást z polyamidu má také nejmenší hmotnost z pěti vzorků. Vyztužený polyamid jde navíc zpracovat jak vstřikováním, tak metodou SLS. Byl by tedy v budoucnosti možným kandidátem. Nevýhodou polyamidů je jejich nasákavost. Té se dá však zbavit vhodnými aditivami. Co se týče srovnání napěťových analýz jednotlivých modelů, simulace neposkytla konzistentní výsledky. Na modelu bylo až příliš špiček napětí a singularit. Tyto výsledky mohou naznačovat potenciální chybu v nastavení modelu a v zadaných parametrech. Tomuto problému můžeme předejít vyhodnocováním jen části geometrie, a ne celé součásti. U závěsu bylo takto vyhodnocováno napětí pouze na námi vybraných plochách. Tím bylo dosaženo relativně stejných výsledků mezi jednotlivými modely. U insertu se výsledky mezi modely lišily. A to i po omezení výběru analyzované části. Pro insert vyráběný vstřikováním byly zhotoveny nové analýzy, ve kterých se vyskytovaly podobné trendy, jako u dřívějších analýz původní geometrie.

Další postup pro získání přesnějších výsledků na insertu by bylo vytvoření submodelu. Submodel by byl skrz okrajové podmínky vázán k původnímu modelu. Součást v submodelu by ale podstoupila vlastní analýzu, která by se pojila s vhodnější, jemnější sítí. Výsledky by potom měly teoreticky konvergovat k ustálené hodnotě. Prozatím bylo vymezeno pár návrhů změny geometrie, se kterými by bylo možné v budoucnu pracovat. Na jejich základě bychom pak mohli pokračovat topologickou optimalizací. Tvar plastového závěsu by byl upraven, aby unesl stejné zatížení jako původní slitina. Nakonec by byl navrhnout výrobní proces a součást by dále byla upravována na základě způsobu výroby.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION [ECSS]. *Material selection for controlling stress-corrosion cracking*. Třetí vydání. 2200 AG Noordwijk, The Netherlands: ESA Requirements and Standards Division, 2009. Dostupné také z: <https://ecss.nl/standard/ecss-q-st-70-36c-material-selection-for-controlling-stress-corrosion-cracking/>
- [2] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION [NASA]. *GUIDELINES FOR THE SELECTION OF METALLIC MATERIALS FOR STRESS CORROSION CRACKING RESISTANCE IN SODIUM CHLORIDE ENVIRONMENTS*. Revision A. Marshall Space Flight Center, Alabama 35812, 2005. Dostupné také z: <https://standards.nasa.gov/sites/default/files/standards/MSFC/A/0/MSFC-STD-3029.pdf>
- [3] EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION [ECSS]. *Data for selection of space materials and processes*. Revision 1. 2200 AG Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications Division, 2014. Dostupné také z: <https://ecss.nl/standard/ecss-q-st-70-71c-materials-processes-and-their-data-selection/>
- [4] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a tvářené výrobky – Část 1: Označování tvářených výrobků*. Praha: Český normalizační institut, 2005. Dostupné také z: [https://bbolzano.cz/assets/files/Hlinikove\\_slitiny.pdf](https://bbolzano.cz/assets/files/Hlinikove_slitiny.pdf)
- [5] DEPARTMENT OF DEFENSE. *METALLIC MATERIALS AND ELEMENTS FOR AEROSPACE VEHICLE STRUCTURES*. Second revision. 2003. Dostupné také z: <https://www.abbottaerospace.com/downloads/mil-hdbk-5j-metallic-materials-and-elements-for-aerospace-vehicle-structures/>
- [6] HARPER, Charles A., ed. *Modern Plastics Handbook* [online]. McGraw-Hill, 1999 [cit. 2025-05-23]. ISBN 0-07-026714-6. Dostupné z: <https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/c5ebbc8c64887c5e/66f7693fbed02add60ce7d390855ac85104ab4f190d80a9ae35259e4cfa60b8/book-summary.pdf>
- [7] BIRON, Michel. *Thermoplastics and Thermoplastic Composites (2nd Edition)* [online]. Druhé vydání. San Diego: Elsevier, 2013 [cit. 2025-05-17]. ISBN 9781455778980. Dostupné z: [https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpTTCE0001/cid:kt00AVX8BE/viewerType:khtml/root\\_slug:thermoplastics-thermoplastic/url\\_slug:detailed-accounts-thermoplastic?&b-toc-cid=kpTTCE0001&b-toc-root-slug=thermoplastics-thermoplastic&b-toc-title=Thermoplastics%20and%20Thermoplastic%20Composites%20%282nd%20Edition%29&b-toc-url-slug=outline-actual-situation&kpromoter=federation&view=collapsed&zoom=1&page=1](https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpTTCE0001/cid:kt00AVX8BE/viewerType:khtml/root_slug:thermoplastics-thermoplastic/url_slug:detailed-accounts-thermoplastic?&b-toc-cid=kpTTCE0001&b-toc-root-slug=thermoplastics-thermoplastic&b-toc-title=Thermoplastics%20and%20Thermoplastic%20Composites%20%282nd%20Edition%29&b-toc-url-slug=outline-actual-situation&kpromoter=federation&view=collapsed&zoom=1&page=1)
- [8] *GEON Performance Solutions: GEON® Rigid PVC Compounds* [online]. c 2025 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.geon.com/our-brands/geon-rigid>

- [9] *GEON Performance Solutions: GEON® Plus - PVC Alloys* [online]. c 2025 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.geon.com/our-brands/plus>
- [10] *Sabic: Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)* [online]. c 2025 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.sabic.com/en/products/polymers/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs/cycolac-resin>
- [11] *Teijin: Resin, Flame Retardant & Additives* [online]. [2025] [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.teijin.com/products/resin/>
- [12] *Asahi KASEI Engineering plastics: LEONA* [online]. [2025] [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.asahi-kasei-plastics.com/en/products/leona/>
- [13] *EVONIK: Vestakeep PEEK* [online]. [2025] [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://medical.evonik.com/en/materials-and-solutions/vestakeep-peek>
- [14] *BASF: Ultrason®* [online]. [2025] [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: [https://plastics-rubber.basf.com/emea/en/performance\\_polymers/products/ultrason](https://plastics-rubber.basf.com/emea/en/performance_polymers/products/ultrason)
- [15] *Seynesqo: Veradel®* [online]. c 2025 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.syensqo.com/en/brands/veradel-pesu/veradel-hc-pesu>
- [16] *Resinex: Fortron®* [online]. [2025] [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://resinex.com/cs-CZ/brands/14675-fortron>
- [17] *Sabic: ULTEM™ Resin* [online]. c 2025 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.sabic.com/en/products/specialties/ultem-resin-family-of-high-heat-solutions/ultem-resin?grade=1040p>
- [18] BIRON, Michel. *Thermosets and Composites - Material Selection, Applications, Manufacturing, and Cost Analysis (2nd Edition)* [online]. 2nd edition. Chantilly: Elsevier, 2014, 547 s. [cit. 2025-05-23]. ISBN 1455731242. Dostupné z: [https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpTCMSAMC4/cid:kt00U07GR2/viewerType:khtml/root\\_slug:thermosets-composites/url\\_slug:composite--thermosets?&b-toc-cid=kpTCMSAMC4&b-toc-root-slug=thermosets-composites&b-toc-title=Thermosets%20and%20Composites%20-%20Material%20Selection%2C%20Applications%2C%20Manufacturing%2C%20and%200Cost%20Analysis%20%282nd%20Edition%29&b-toc-url-slug=outline-actual-situation&kpromoter=federation&view=collapsed&zoom=1&page=7](https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpTCMSAMC4/cid:kt00U07GR2/viewerType:khtml/root_slug:thermosets-composites/url_slug:composite--thermosets?&b-toc-cid=kpTCMSAMC4&b-toc-root-slug=thermosets-composites&b-toc-title=Thermosets%20and%20Composites%20-%20Material%20Selection%2C%20Applications%2C%20Manufacturing%2C%20and%200Cost%20Analysis%20%282nd%20Edition%29&b-toc-url-slug=outline-actual-situation&kpromoter=federation&view=collapsed&zoom=1&page=7)
- [19] *SBHPP: Vyncolit* [online]. c 2024 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.sbhpp.com/products-applications/catalog/category/vyncolit/>
- [20] *Technologie zpracování plastů* [online]. © Code Creator, 2016 [cit. 2025-05-23]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Impresum.html>
- [21] *Technologie 3D tisku. 3dtisk-online* [online]. 2019 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-technologie-3d-tisku/>
- [22] *ADMASYS* [online]. c 2014 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://admasys.cz/>

- [23] 3Dees [online]. c 2025 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/>
- [24] Norck [online]. c 2025 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.norck.cz/>
- [25] One3D [online]. c 2025 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: [https://www.one3d.cz/?gad\\_source=1&gad\\_campaignid=21183054652&gbraid=0AAAAAoaFhk\\_z-KctxzJMssT9MD8AHlljq&gclid=Cj0KCQjwucDBBhDxARIsANqFdr2-zsVxnjsMMY-AM0rDAzca4Cpo-aOuykSXwcgIn1MHCALaAJ1REGgaAs3BEALw\\_wcB](https://www.one3d.cz/?gad_source=1&gad_campaignid=21183054652&gbraid=0AAAAAoaFhk_z-KctxzJMssT9MD8AHlljq&gclid=Cj0KCQjwucDBBhDxARIsANqFdr2-zsVxnjsMMY-AM0rDAzca4Cpo-aOuykSXwcgIn1MHCALaAJ1REGgaAs3BEALw_wcB)
- [26] ANSYS, INC. *Lesson 4: Definition of Plasticity* [online]. [2020]. Dostupné také z: <https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2020/12/Lesson-4-Definition-of-Plasticity-from-Experimental-Data.pdf>
- [27] ANSYS, INC. *Introduction to Contact* [online]. [2019]. Dostupné také z: [https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2019/05/2.5.1-Introduction-on-contact\\_New\\_Template\\_Master.pdf](https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2019/05/2.5.1-Introduction-on-contact_New_Template_Master.pdf)
- [28] ANSYS, INC. *Connecting Bolts Represented as Beam Elements* [online]. [2020]. Dostupné také z: <https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2020/09/Connecting-Bolts-Represented-as-Beam-Elements.pdf>
- [29] ANSYS, INC. *Numerically Accurate Results* [online]. [2020] [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/numerically-accurate-results/lessons/summary-18/>
- [30] ANSYS, INC. *Topics in Structural Simulation in Ansys Mechanical - Assessing stress singularity* [online]. [2019] [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/tips-and-tricks-for-structural-simulation-in-ansys-mechanical/lessons/assessing-stress-singularity/>
- [31] PENNENGINEERING. *Products | Threaded Inserts Product Finder* [online]. c 2025 [cit. 2025-05-23]. Dostupné z: <https://www.pemnet.com/products-overview/products-threaded-inserts/>