

# Virtuální prototypování – cesta k optimálnímu návrhu a výrobě odlitků

## Virtual prototyping—the way to optimal design and manufacture of castings

621.74:338.45 : 519.68

foundry production—rapid prototyping techniques

The article deals with optimal "work-flow" from the initial design of an aluminium casting through its optimization using virtual tools up to its own production using so-called hybrid technology. The case study demonstrates the use of new approaches in the design of a machine component using generative design (GD), which is the entry point for the so-called co-design—a quick evaluation of the technological design of the structure. Final numerical simulations verify both the suitability of the machine component for the required load, and the technological simulation confirms the manufacturability the designed casting for the chosen foundry technology. In this case, the design was directed to the production of prototypes using a 3D printed model and subsequent production of the ceramic shell by rapid prototyping methods.

### Úvod

Jaké jsou benefity vyplývající ze součinnosti konstruktéra a technologa při návrhu odlitku, zcela jistě poznala nejen řada sléváren, ale i jejich odběratelů. Celá teorie tzv. simultánního inženýrství je postavena na myšlence dialogu a týmové spolupráce expertů, kteří se aktivním způsobem podílejí na návrzích požadovaných řešení. Spojení know-how a zdrojů by mělo vést k optimálnímu konceptu, který respektuje konstrukční a materiálové požadavky kladené na vlastní díl a zaručuje efektivní výrobu s minimalizací nákladů spojených s následnou úpravou nebo změnou technologie během výroby. Tento přístup však vyžaduje porozumění ve vzájemných cílech a požadavcích a zejména ochotu spolupracovat a učit se něčemu novému. Vyžaduje rovněž otevřenou mysl v investicích a použití virtuálních nástrojů, které jsou nezbytným podpůrným nástrojem pro efektivní proces rozhodování. Tento multidisciplinární přístup již řadu let funguje v automobilovém a leteckém průmyslu, ale rozhodně je možné jej aplikovat i v projektech menšího rozsahu.

### Virtuální prototypování

Jedním z prvků virtuálního inženýrství je virtuální prototypování. Virtuální prototypování (VP) je soubor metodik zaměřený na podporu procesů ve fázi vývoje produktu. VP zahrnuje využití a kombinaci několika nástrojů, mezi které patří: počítačově podporovaný návrh (CAD), počítačově automatizovaný návrh (CAutoD) a počítačově podporované inženýrství (CAE) pro ověření návrhu před provedením fyzického prototypu. VP v oblasti odlitků je v zásadě konstrukční činnost vedoucí k optimálnímu návrhu tvaru odlitků. Ještě nedávno byly tvary odlitků navrhovány tak, aby splňovaly alespoň základní požadavky na technologičnost konstrukce. Jedná se o přizpůsobení konstrukce dílu způsobu výroby a vlastnostem materiálů s cílem zajistit efektivní a kvalitní výrobu. Technologičnost konstrukce se zaměřovala na způsob dělení modelu s ohledem na předem zvolenou výrobní technologii, soustřeďovala se na eliminaci tepelných uzlů pomocí ideálního napojení a přechodu stěn a v řadě případů reagovala na potřebu usměrněného tuhnutí se zřetelem na eliminaci slévárenských vad. Z uvedených důvodů byly tvary odlitků



**Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.**  
VUT v Brně, FSI, ÚST, odbor slévárenství  
krutis@fme.vutbr.cz



**Ing. Martin Madaj, Ph.D.**  
CAD Studio s.r.o., Brno  
martin.madaj@cadstudio.cz



**Ing. Vlastimil Kolda**  
MECAS ESI s.r.o., Brno  
Vlastimil.Kolda@esi-group.com

spíše konzervativní, tak aby vyhovovaly zejména požadavkům na funkčnost a zvolenou výrobní technologii. Rozvoj nových optimalizačních metod v 3D konstruování (včetně cloudových řešení), mezi které patří například topologická optimalizace či generativní design a rozvoj metod 3D tisku, posunul návrhy tvarů součástí až do oblasti, která v minulosti náležela pouze uměleckým odlitkům.

### Co je to generativní design?

Pojem „generativní design“ (GD) se v současné době skloňuje v mnoha různých oblastech průmyslu, a to zejména ve strojírenství a stavebnictví, nicméně GD proniká i do elektrotechniky a dalších oborů [1], [2]. GD představuje odlišný přístup k tvorbě návrhu s využitím genetických algoritmů, uvedených např. v [3], pomocí nichž je možné získat optimalizované výsledky s vysokou pravděpodobností splňující zadané požadavky, kterých by mnohdy bylo velmi obtížné, ne-li nemožné, dosáhnout klasickým „manuálním“ procesem návrhu. V případě strojírenství se může jednat např. o snížení počtu použitých komponent, tuhost nebo hmotnost; u stavebnictví např. o využití prostoru, množství denního světla nebo šíření zvuku v místnostech. Výstupy z generativního designu mohou zároveň splňovat i vysoké estetické nároky. Dle [4], [5] je GD technologie, která na základě mnoha různých specifických vstupů (max./min. rozměry, hmotnost, materiál, výrobní metoda, cena výroby atd.) a požadovaných výstupů umí vytvořit a vyhodnotit tisíce různých variant návrhů, z nichž pak může konstruktér/designér vybrat pro něj nejvhodnější alternativy. Generování takto velkého množství variant návrhů je možné díky poměrně masivnímu rozšiřování cloudových systémů, kde uživatel nemusí pro výpočet využívat vlastní pracovní stanici, ale používá „neomezený“

výkon cloudu. Snadná orientace uživatele ve výsledcích a výběr nejvhodnějších variant je pak zajištěna pomocí robustních filtrovacích nástrojů.

### Generativní design, nebo topologická optimalizace?

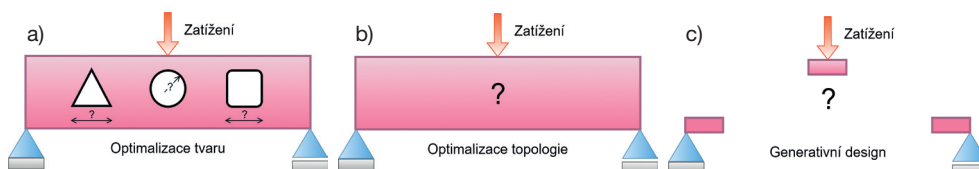
Na rozdíl od topologické optimalizace [6], kde je návrhová oblast přesně definována a řeší se tvar uvnitř této oblasti, není nutné, aby mezi vstupními parametry pro generativní navrhování nutně figurovala i počáteční geometrie modelu. V kontextu strojírenských součástí musí být přítomny pouze „připojovací“ oblasti, popř. oblasti, kterým se má návrh vyhnout. Zároveň je ale možné, aby počáteční geometrie tělesa byla definována. Topologická optimalizace je tedy součástí generativního designu, i když se často stává, že jsou oba pojmy zaměňovány. Srovnání oblasti návrhu generativního designu s topologickou optimalizací, doplněné o optimalizaci tvaru, při které se topologie zachovává, je vidět na **obr. 1**. Je patrné, že směrem od optimalizace tvaru ke generativnímu designu postupně „mizí“ přesná počáteční specifikace optimalizované/vytvářené geometrie. Na druhou stranu i u generativního designu je možné poměrně přesně stanovit hranice, ve kterých se má finální geometrie nacházet.

### Tradiční vs. generativní proces navrhování

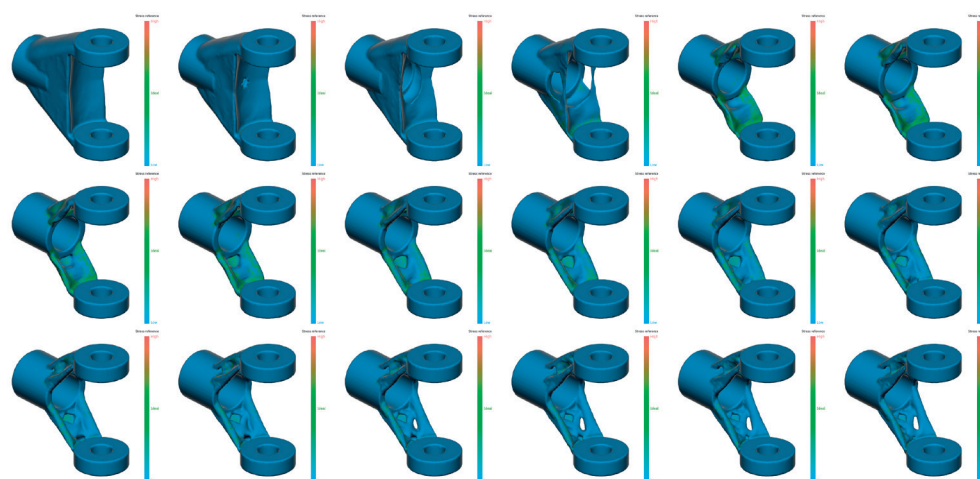
Při tradičním procesu návrhu musí inženýr přímo tvořit požadovanou geometrii, přičemž vychází ze zkušeností s předchozími návrhy a s požadavky danými budoucím využitím výrobku, použitým materiálem, plánovanou metodou výroby apod. Každá varianta návrhu poté musí být vyhodnocena a v případě, že jsou zjištěny nedostatky, je nutné provést korekce návrhu. Celý proces se poté opakuje až do doby, kdy je výrobek shledán způsobitelným k uvolnění do

výroby. V závislosti na složitosti výrobku se může jednat o mnoho desítek hodin práce.

Oproti tomu u generativního navrhování specifikuje konstruktér počáteční podmínky a omezení a GD následně s využitím evolučních algoritmů automaticky provede vyhodnocení mnoha desítek až tisíc variant, aby našel nejlepší řešení. V každém kroku je návrh testován, zda splňuje zadaná kritéria, a na základě výsledků testů jsou v dalším kroku aplikovány změny tak, aby bylo dosaženo optimalizovaného finálního stavu splňujícího požadovaná kritéria. Ukázka jednotlivých iterací návrhu se zobrazením výsledků pevnostní analýzy je na **obr. 2**. Ve srovnání s tradičními postupy tak generativní



Obr. 1. Optimalizační schémata, a), b) dle [6]

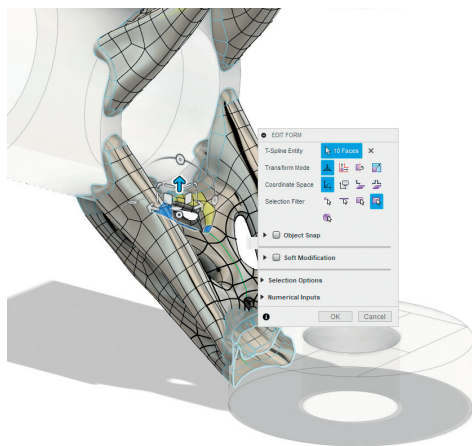


Obr. 2. Průběžná vyhodnocení jednotlivých iterací návrhů generativního designu

design umí vytvořit řádově větší počet variant návrhů za zlomek času.

### Základní principy generativního návrhu

Všechny návrhové problémy jsou inherentně vícerozměrné, přičemž jejich řešení musí splňovat množství často vzájemně protichůdných požadavků. Generativní design pro jejich řešení využívá umělou inteligenci ve formě metaheuristických, resp. vyhledávacích algoritmů, které jsou pro tuto činnost vhodnější než umělé neuronové sítě, které se nejprve potřebují naučit, jak zkoumaný model funguje. Algoritmus generativního designu naopak nemusí vědět, jak zkoumaný model funguje, ale umí se naučit, jak s daným modelem pracovat. Specifickým typem vyhledávacích algoritmů, které se v generativním designu uplatní, jsou evoluční/genetické algoritmy inspirované v Darwinově evoluční teorii. Pomocí výběru nevhodnějších kandidátů, křížení a mutací je tak opakovaně hledán nejvhodnější kandidát splňující vstupní požadavky na návrh [1]. Jak je patrné z **obr. 2**, tělesa vytvořená generativním navrhováním mají ve většině případů nepravidelné, organické tvary, které mohou být doplněné o exaktně definovanou geometrii vyplývající z počátečních omezujících podmínek. Toto s sebou nese již zmiňované výhody např. v podobě optimalizované hmotnosti, tuhosti, nebo netradičního vzhledu. Na druhou stranu mohou vznikat problémy spojené s potřebou dalšího využití modelu pro simulace nebo nutnosti přidání dalších geometrických prvků. Marinov a kol. [7] proto představili řešení, které výrazně usnadňuje manipulaci s výstupy generativního designu až do té míry, že kompletně odpadají manuální postupy spojené s převodem tvaru generovaného tělesa na hraniční reprezentaci (B-rep), které by tak vedly k dalšímu prodloužení fáze návrhu. Při tomto procesu jsou organické části geometrie parametrizovány a aproximovány pomocí T-NURCC ploch, jejichž hranice jsou následně protaženy do původních „připojovacích“ těles, a výsledkem je jediná uzavřená hraniční reprezentace objemového tělesa. Díky parametrizaci lze organický tvar modelu kdykoliv dodatečně upravit. Tato funkce je v současné době plně integrována v aplikaci Autodesk Fusion 360, jak je patrné z **obr. 3**.



**Obr. 3.** Editovatelný výstup z GD v programu Fusion 360

### Generativní design vs. metody výroby

S organickým tvarem tělesa mohou být spojena i určitá výrobní specifika. Pokud nejsou počáteční podmínky výroby specifikovány, jeví se jako nejvhodnější výrobní postupy aditivní metody výroby [4]. Aditivní výroba není omezena tvarovou složitostí a je tedy možné dosáhnout nejvhodnějších návrhů z hlediska minimální hmotnosti. Pro tento druh výroby lze zohledňovat např. směr nanášení vrstev materiálu, případně další parametry 3D tisku. Nástroje generativního designu rovněž umožňují definovat i konvenčnější metody výroby, jako např. frézování nebo řezání, samozřejmě se zahrnutím velikosti nástrojů. Mezi vstupními podmínkami pro generativní design lze nalézt i tlakové lití, které zohledňuje minimální tloušťku stěny, směr vytažení odlitku z formy a velikost úkosu. Při nastavení podmínek na obráběcí metody nebo tlakové lití mohou být generovány konvenčnější tvary návrhů, které určitým způsobem zohledňují technologičnost konstrukce. Ze současných slévárenských metod tomuto způsobu návrhu součástí nejvíce vyhovují tzv. hybridní technologie, které výrobu netrvalého modelu řeší 3D tiskem. Zde se uplatňuje zejména metoda odlévání do keramických skořepin za použití vytavitelného, případně spalitelného modelu.

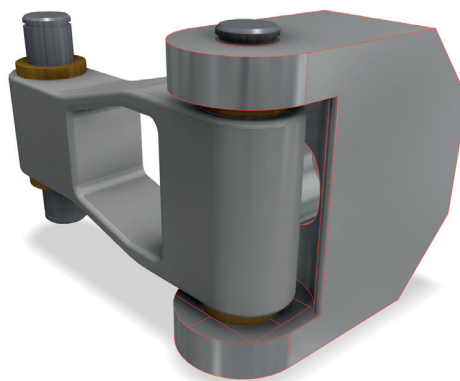
### Případová studie hliníkového závěsu

#### Původní tvar řešené komponenty

Jako příklad možnosti využití GD pro výrobu odlévaných součástí byl zvolen hliníkový závěs zatěžovaný hmotností břemene přes instalované rameno. Zvolená komponenta sestavy je na **obr. 4** zvýrazněna červeně.

Aby bylo zjištěno, zda pro danou komponentu existuje potenciál úspory hmotnosti a optimalizace tvaru tělesa, byla nejprve provedena pevnostní analýza pomocí metody konečných prvků (MKP). Pro daný, zjednodušený zátěžný stav (síla působící na spodní opěrnou plochu a síly – zatížení „ložisek“ působící v otvorech pro čep), bylo zjištěno, že maximální napětí von Mises (redukované napětí) dosahuje pro použitý materiál AlSi10Mg hodnoty cca 30 MPa, což odpovídá součiniteli bezpečnosti většímu než 8. Pevnostní analýza byla provedena pro databázové hodnoty materiálových vlastností v aplikaci Autodesk Fusion 360. Z výsledků

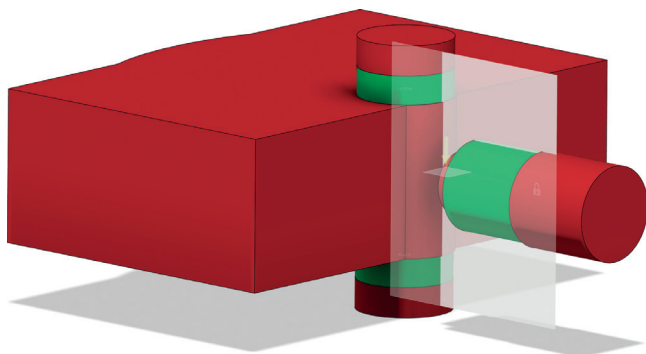
pevnostní analýzy vyplynulo, že potenciál pro úspory týkající se hmotnosti tělesa a optimalizaci tvaru existuje, a proto bylo přistoupeno k definici podmínek pro návrh nového tvaru tělesa pomocí modulu generativního designu v tomtéž programovém prostředí.



**Obr. 4.** Sestava řešeného odlitku

#### Kroky generativního návrhu

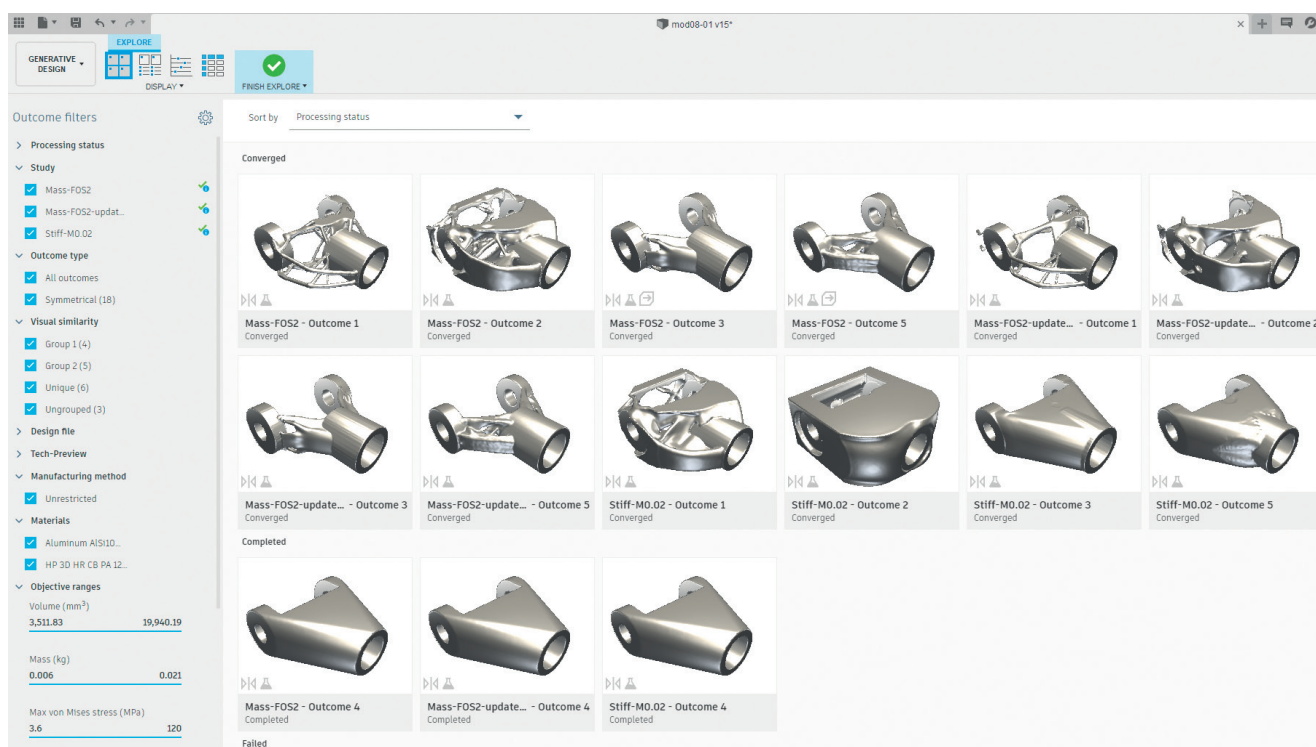
Prvním krokem definice je určení, jaké části geometrie zůstanou zachovány. V modelu vždy musí zůstat zachovány připojovací plochy tělesa – v tomto případě se



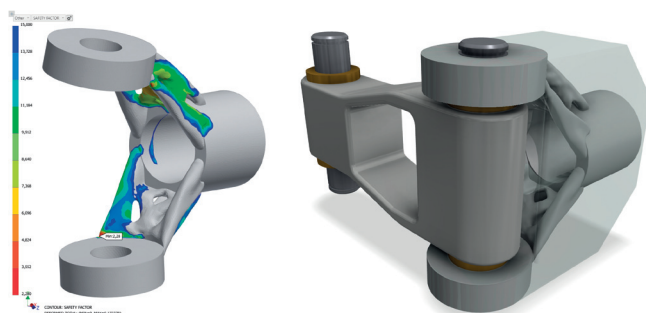
**Obr. 5.** Geometrické znázornění okrajových podmínek pro GD

jednalo o otvor pro šroub a otvory pro čepy. Na plochy určené k zachování se poté aplikují vazby a zatížení tělesa, které spolu s ostatními parametry modelu mohou výrazně ovlivnit výsledek generativního návrhu. Následuje určení překážek, tzn. oblastí, do kterých tvar vygenerovaného tělesa nesmí v žádném případě zasahovat. Vždy je nutné pečlivě uvážit, zda se v blízkosti tělesa nebudou vyskytovat pohyblivé části, popř. zda se samo těleso nebude v provozním stavu pohybovat. Tyto obálky pohybů je následně nutné při nastavování studie zohlednit. Volitelnou možností je definice počátečního tvaru komponenty (podobně jako u topologické optimalizace), nicméně v tomto případě nebyla uvedená možnost využita. Generované modely mohou být s ohledem na zátěžný stav použity ve studii tvarově nesymetrické. Symetrii je proto možné vynutit pomocí volby rovin symetrie. Finální definici geometrie včetně rovin symetrie a zatížení představuje **obr. 5**. Dalším krokem je definice cíle a limitů návrhu, které specifikují, jakých výsledků chceme v rámci generativního návrhu

dosáhnout. Kromě standardní minimalizace hmotnosti nebo maximalizace tuhosti (s definicí hodnoty součinitele bezpečnosti a požadované finální hmotnosti) lze přímo specifikovat i maximální hodnotu deformace (ať už celkovou nebo v dílčích osách souřadného systému), součinitel bezpečnosti vůči ztrátě stability, nebo dokonce minimální požadovanou hodnotu první vlastní frekvence návrhu. Pro případ popisovaný v tomto článku byla zvolena minimalizace hmotnosti s dosažením minimálního součinitele bezpečnosti na hodnotě 2. Nezbytnou součástí nastavení je i určení předpokládaných metod výroby generovaného tvaru. Fusion 360 umožňuje zvolit několik metod výroby: aditivní (3D tisk), frézování 2.5D-5D, 2osé vyřezávání a v současné době pro technologii odlévání pouze tlakové lití. Kromě uvedených metod výroby lze specifikovat i metodu tzv. bez omezení (unrestricted), která je vhodná k posouzení, jaké varianty splňují zadaná kritéria, avšak bez respektování technologických podmínek specifických výrobních metod. S ohledem na následnou volbu 3D tisku modelu a odlévání do skořepin na spalitelný model byla v tomto případě zvolena metoda „unrestricted“. Výpočet generativní studie je časově relativně náročný proces, který se v aplikaci Fusion 360 odehrává plně v cloudovém prostředí. V závislosti na počtu studií a kombinacích jejich parametrů může být vytvořeno několik set až tisíce výsledků, které je možné mezi sebou vzájemně porovnávat a filtrovat na základě různých kritérií (standardně např. podle studie, materiálu, výrobní metody nebo hodnot definovaných parametrů – součinitele bezpečnosti, hmotnosti apod.). Velmi zajímavá je i možnost filtrování dle vizuální podobnosti. V rámci výsledků generativního navrhování je možné v závislosti na definici výrobní metody, použitém materiálu a počtech vyráběných kusů přibližně odhadnout i budoucí výrobní náklady. Na **obr. 6** je znázorněn přehled výsledků z generativního návrhu.



**Obr. 6.** Přehled části výsledků z GD



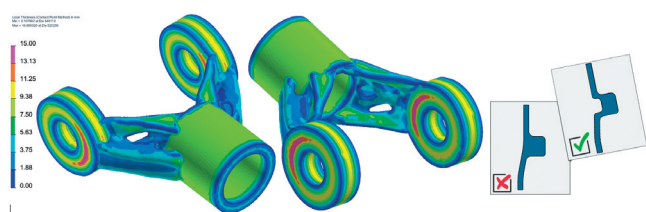
**Obr. 7.** Finalní ověření součinitele bezpečnosti a výsledný návrh v celkové sestavě

Na základě zhodnocení tvaru součásti a srovnání závislosti vypočteného součinitele bezpečnosti na hmotnosti návrhu byla vybrána varianta návrhu pro finální ověření pomocí MKP a pro následnou výrobu (**obr. 7**). Na tomto obrázku je rovněž srovnání vygenerovaného návrhu s původní variantou, přičemž původní hmotnost se z 1,277 kg snížila o téměř 67 % na 0,425 kg.

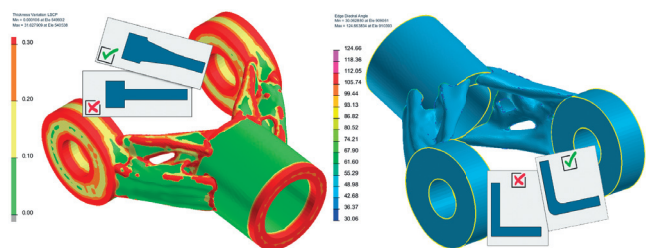
Jak bylo uvedeno výše, současné verze GD mají omezenou možnost volby výrobní technologie. Stále častěji se budeme setkávat s geometriemi, které jsou vhodné zejména pro 3D tisk kovu, případně pro hybridní technologie. V případě, že výrobek je tedy požadován jako odlitek, je nutné ověřit alespoň základní aspekty technologičnosti konstrukce. V tento okamžik vstupuje do hry know-how technologa, který má k dispozici opět řadu virtuálních nástrojů, které mu pomáhají určit kritická místa návrhu s ohledem na vyrobiteľnost a zdravost odlitku.

#### Virtual manufacturing – efektivní nástroje v rukou technologa

Nejen konstruktér, ale i technolog má k dispozici počítačovou podporu, která mu umožňuje pracovat s virtuálním modelem. Velkou výhodou GD je, že si uživatel může zvolit libovolný exportní formát (\*.igs, \*.stp, \*.stl, ...), který mu umožní přímé testování zaslaného návrhu, případně přímý 3D tisk modelu. Zvoleným nástrojem v této studii



**Obr. 8.** Zobrazení lokálních tlouštěk návrhu



**Obr. 9.** Analýza přechodu stěn

byl simulační program ProCAST a jeho speciální modul Co-Design.

Modul Co-design je nástroj pro posouzení konstrukce součásti z pohledu vyrobiteľnosti technologií lití. Použití sestává ze tří základních kroků:

- posouzení geometrie součásti;
- simulace tuhnutí;
- analýza výsledků.

#### Posouzení geometrie součásti

Optimalizovaná konstrukce součásti závěsu nebere v potaz její technologičnost výroby. Je třeba se na součást podívat z pohledu její vyrobiteľnosti, a to v našem případě pro metodu přesného lití. Uživatel modulu Co-Design má možnost provést analýzu tloušťky stěny součásti (**obr. 8**), na jejímž základě lze rozhodnout o konstrukční změně, případně o umístění zářezů a dalších technologických prvků.

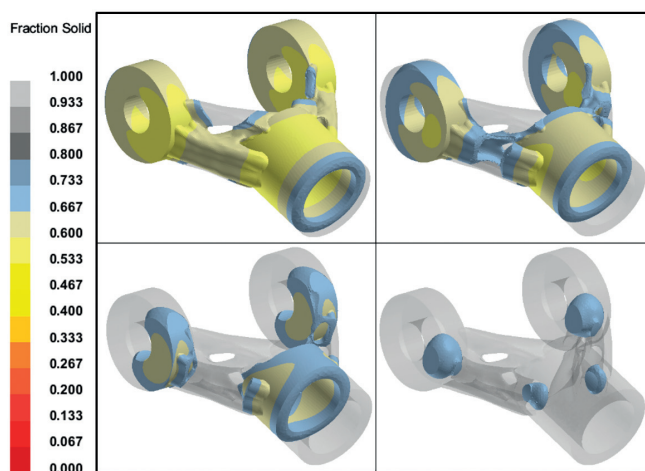
Dále lze provést analýzu přechodů stěn nebo ostroty úhlů a zvolených rádiů, kdy všechny tyto vlivy mohou při výrobě vést ke tvorbě tepelných uzlů, případně ke vzniku trhlin a prasklin (**obr. 9**).

Na základě měření zkosení vůči dané ose v rámci souřadného systému lze rozhodnout o vhodnosti volby dělicí roviny. To se však netýká přesného lití, tj. výrobní technologie zvolené v této studii.

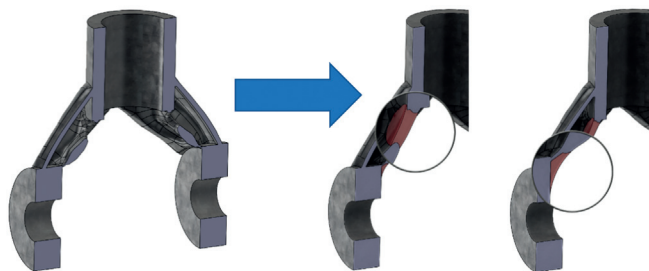
#### Simulace tuhnutí a analýza výsledků

Následuje spuštění zjednodušené simulace tuhnutí odlitku ve skořepině. Objem skořepiny je kolem odlitku vytvořen automaticky na základě volby její tloušťky. Všechny podmínky procesu, jako je přestup mezi odlitkem a skořepinou, případně ze skořepiny do okolí, se vytvoří automaticky. Uživatel pouze vyplní materiály jednotlivých domén a jejich počáteční teploty. Samotný výpočet proběhne v řádu několika minut a jeho cílem je pohled na způsob tuhnutí, formování oddělených tepelných uzlů, čas do ztuhnutí, predikce staženin a ředin a další základní typy výsledků.

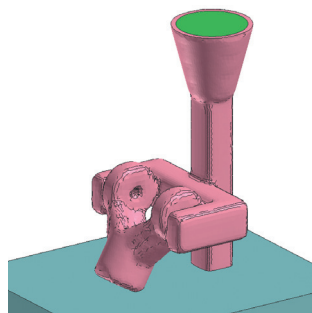
Největší tepelné uzly v okách závěsu byly vyhodnoceny jako vhodná místa k napojení vtokové soustavy, a to i z hlediska dosazování tekutého kovu. V odlitku byla detekována oddělená místa tuhnutí v oblasti napojení hřídele na ramena



**Obr. 10.** Analýza přechodu stěn



Obr. 11. Geometrická úprava modelu



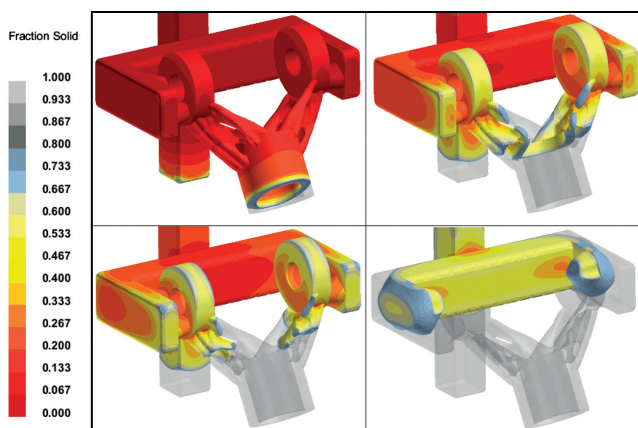
Obr. 12. Geometrie skořepiny a umístění odlitku na vtokovém systému

závěsu, což je patrné ze zobrazení postupu tuhé fáze na **obr. 10**. Na základě výsledků bylo rozhodnuto o konstrukční úpravě odlitku, a sice zaslepením otvoru ramene v napojení na středový nátrubek. S ohledem na přechod geometrie byl zvětšen rádius v napojení na oko závěsu. Změny byly diskutovány s konstruktérem a upraveny do varianty 2 (**obr. 11**).

V dalším kroku byla vytvořena vtoková soustava s uva-

žováním možností navazující výroby. S ohledem na výsledky výpočtu v modulu Co-Design byly zářezy vtokové soustavy napojeny v místech největších teplotních uzlů na oka závěsu. Pozice odlitku vůči vtokové soustavě zohledňovalo vlastní lití odlitku, stabilitu stromečku na licí loži a rovněž usměrňenost tuhnutí od chladnějšího podloží ve směru ke vtokové soustavě (**obr. 12**). Jelikož se jedná pouze o případovou studii, výrobu prototypu a nástin jednotlivých kroků, nebylo řešeno optimální rozložení více odlitků na vtokovém stromečku a některé další výrobní aspekty spojené s využitím kovu.

Návrh technologie byl ověřen finální simulací celého procesu zahrnující fázi přesunu skořepiny ze žíhací pece na licí lože (pre-heating), proudění kovu při plnění skořepiny z licí pánve a tuhnutí odlitku ve skořepině. Výsledky potvrdily správnost konstrukčních úprav odlitku. Tuhnutí začíná na spodní



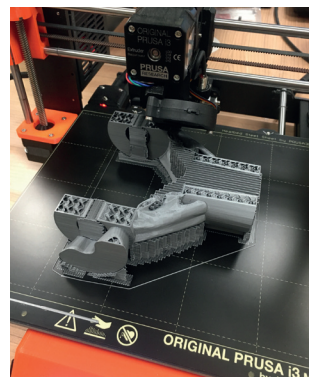
Obr. 13. Postup fronty tuhnutí u upraveného tvaru

straně nátrubku závěsu od licího lože a postupuje přes odlitek usměrňeně směrem ke vtokové soustavě, ze které probíhá dosazování kovu do odlitku (**obr. 13**). Z pohledu staženin je odlitek predikován jako „čistý“.

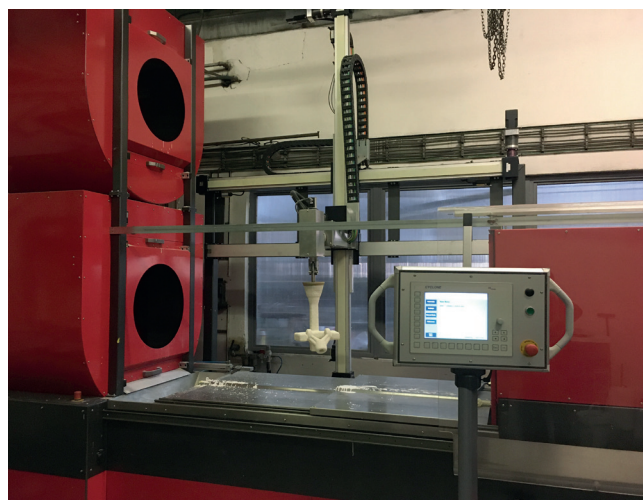
### Rychlá výroba prototypového odlitku

Výrobní metodou případové studie byla zvolena technologie odlévání do keramické skořepiny, a to s ohledem na komplikovaný tvar součásti a požadovanou rychlost výroby. Mluvíme o použití tzv. hybridní technologie [8], kde tištěný model nahrazuje finančně a zejména časově náročnou výrobu kovové matečné formy. S ohledem na časový rámec projektu byla zvolena metoda tisku FFF (Fused Filament Fabrication) z materiálu PLA. Tisk byl realizován na tiskárně Prusa i3 MK3S v rozlišení ultradetail 0.07mm a doba tisku byla 18 h. Na **obr. 14** je zachycen tisk modelu včetně podpor a použitých výplní modelu. Geometrie vlastní součásti včetně vtoků byla exportována z numerické simulace a načtena ve formátu \*.stl.

Následná výroba skořepiny probíhala ve vývojovém pracovišti firmy LANIK s.r.o. a VUT Brno, které nese pracovní název LaBUT. Toto pracoviště disponuje špičkovou technologií rychlé výroby skořepin na zařízení Cyclone od firmy MK Technology, které urychluje výrobu skořepin z několika dnů na několik hodin. Systém sušení je založen na rychlém a turbulentním proudění



Obr. 14. 3D tisk modelu z materiálu PLA



Obr. 15. Výroba skořepiny na VUT v Brně na zařízení Cyclone



**Obr. 16.** Prototypový odlitek závěsu po odstranění vtokové soustavy

vzduchu, který odvádí vlhkost. Infračervené světlo vyvažuje ochlazování a udržuje teplotu skořepiny stabilní při  $\pm 1$  °C. Zrcadlo uvnitř komory odráží infračervené světlo, aby rovnoměrně působilo ve všech částech skořepiny. Kontinuální rotace strohmečku zajišťuje velmi jemné a rovnoměrné zasychání, čemuž napomáhá i předsušený vzduch, který proces ještě urychluje [9]. Na výrobu skořepiny byla v našem

projektu využita keramická suspenze založená na vodní bázi a pojivu PrimeCoat a taveném  $\text{SiO}_2$  (-200 mesh). Jako první posyp byl využit zirkonový písek (50–80) a pro zesilovací obaly byl využit molochit (16–30). Skořepina se skládá ze šesti obalů a celková doba výroby skořepiny byla na zařízení Cyclone 5 h. **Obr. 15** dokumentuje výrobu skořepiny na popsaném zařízení.

V dalším kroku došlo k vypálení modelu v odporové peci s dospalkou, a to na teplotě 800 °C. Skořepina byla po zchladnutí ještě vypláchnuta vodou, následně opět žháná na teplotu 550 °C a odlita z teploty 720 °C. Na **obr. 16** je zachycen odlitý prototyp závěsu z materiálu AlSi10Mg, který byl odléván ve školní slévárně VUT v Brně.

## Závěr

Zpracovaný projekt představuje moderní postupy a benefity vyplývající z otevřené spolupráce mezi konstruktéry a technologií na projektu hliníkového závěsu. Pokusili jsme se prezentovat zapojení nových konstrukčních nástrojů, s nimiž se v budoucnosti budeme stále více setkávat. Zaměření GD na „lightweighting“, tj. maximální snížení hmotnosti, vedl ke snížení hmotnosti součásti o 67 % oproti původnímu návrhu. **Tab. I** shrnuje časovou náročnost použitých kroků, které byly pro tuto studii využity.

Požadavky na snižování celkové hmotnosti komponent budou nadále narůstat, a to zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Použití optimalizačních technik proto nabývá na významu. Roste rovněž potřeba efektivní komunikace mezi zákazníkem, konstruktérem a technologem, a to již od prvních krůčků v návrhu jednotlivých součástí. Zkrácení vývojových časů, snížení počtu re-designů, redukce počtu

kritických míst v odlitku a dalších technologických zásahů budou kritické body v oblasti snižování nákladů. Je zřejmé, že řadu tvarových návrhů zaměřených na minimalizaci hmotnosti budeme schopni vyrobit pouze se zapojením aditivních technologií, ať už se bude jednat o tisk modelů, tisk forem, nebo přímo 3D tisk kovu. Abychom neztratili krok s konkurencí, bude nutné tyto technologie zavádět jako jednu z alternativ výroby, případně bude nutné budovat vazby na firmy, které tyto služby poskytují, a tak nabídnout zákazníkům komplexní služby v podobě dodání finálního produktu.

## Literatura:

- [1] NAGY, D.; D. ZHAO; D. BENJAMIN: Nature-Based Hybrid Computational Geometry System for Optimizing Component Structure. In: De Rycke K. et al. (eds): *Humanizing Digital Reality*. Springer, Singapore, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6611-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6611-5_15).
- [2] Demystifying Generative Design, Autodesk, [online]. [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/solutions/generative-design/autodesk-aec-generative-design-ebook.pdf>.
- [3] ROHRMANN, J.: Design Optimization in Early Project Stages, Munich, 2019, Master thesis, Technical University of Munich.
- [4] Autodesk, The Next Wave of Intelligent Design Automation, Harvard Business review, June 04, 2018, [online]. [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/mech-engineering-center/assets/The%20next%20wave%20of%20intelligent%20design%20automation%20-%20white%20paper.pdf?av=20180524190036>.
- [5] MCKNIGHT, M.: Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer. *KnE Engineering* [online]. 2017, 2(2), 176–181 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: doi:10.18502/keg.v2i2.612. ISSN 2518-6841.
- [6] SMELL, M.; D. WEINBERG: Generative Design with Autodesk Nastran Topology Optimization, Autodesk presentation, [online]. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Generative-Design-Autodesk-Nastran-Topology-Optimization-2016#presentation>.
- [7] MARINOV, M.: Generative Design Conversion to Editable and Watertight Boundary Representation. *Computer-Aided Design*. 2019, 115, 194–205, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.05.016>
- [8] KUMAR, P.; I. P. S. AHUJA; R. SINGH: A Framework for Developing a Hybrid Investment Casting Process. *Asian Review of Mechanical Engineering*. 2013, 2(2), 49–55. ISSN 2249-6289.
- [9] KÜGELGEN, M.: From 7 days to 7 hours – Investment casting parts within the shortest time, 68th World Foundry Congress, 7.–10.02.2008, s. 147–151.

## Recenze | Peer-review

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

| Tab. I.                                       | Časová náročnost základních operací |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------|
| Proces                                        | čistý čas [h]                       |
| Posouzení původního designu – FEM analýza     | 1                                   |
| Generativní design – optimalizace             | 8                                   |
| CAD + re-design                               | 0,75                                |
| Co-Design                                     | 1                                   |
| FEM simulace lití a tuhnutí – finální ověření | 2                                   |
| 3D tisk modelu                                | 18                                  |
| Výroba skořepiny                              | 5                                   |