



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PÍST ZÁŽEHOVÉHO MOTORU VYRÁBĚNÝ ADITIVNÍ TECHNOLOGIÍ

PISTON OF A SPARK-IGNITION ENGINE PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martina Valtrová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lubomír Drápal

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka:	Bc. Martina Valtrová
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Lubomír Drápal
Akademický rok:	2021/22

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 diplomové práce:

Píst zážehového motoru vyráběný aditivní technologií

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce výpočtově–konstrukčního charakteru zaměřená na návrh a výpočtové ověření pístu zážehového přeplňovaného motoru vyráběného aditivní technologií.

Cíle diplomové práce:

Zpracovat stručnou rešerši v oblasti konstrukce a technologie moderních pístů zážehových přeplňovaných motorů a posoudit aktuální možnosti výroby těchto dílů aditivní technologií.

Pro motor zadaných parametrů provést konstrukční návrh pístu odpovídající konvenčním metodám výroby pístů. Upravit píst do nové varianty tak, aby jeho konstrukce zohlednila výrobu pomocí aditivní technologie a zvýraznila její výhody (žebrování apod.). Sestavit výpočtový model tepelně–mechanického zatížení a provést simulaci obou variant pístu. V případě potřeby upravit návrh „aditivního“ pístu tak, aby jeho namáhání vyhovovalo požadovaným hodnotám. Posoudit možnosti experimentálního ověření vlivu homogenity materiálu tištěného pístu na jeho pevnost, případně životnost.

Celkově vyhodnotit výhody a nevýhody pístu vyrobeného novou technologií v porovnání s konvenčními výrobními postupy.

Seznam doporučené literatury:

MAHLE, ed. Pistons and engine testing. 1st edition. Wiesbaden: Springer, 2012. ISBN 978-3-83-8-1590-3.

STONE, R. Introduction to internal combustion engines. 4th edition. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012. ISBN 978-0-230-57663-6.

CHUA, C. K., LEONG, K. F. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. 5th edition. New Jersey: World Scientific, 2017. ISBN 978-981-3146-75-4.

MTZ Motorentechnische Zeitschrift. Wiesbaden: Springer, 1939-. ISSN 0024-8525.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo zpracování rešerší na téma aktuálně vyráběných pístů spalovacích motorů a o aktuálním vývoji v oblasti aditivních technologií, a na základě získaných informací zhodnocení nejvhodnější kategorie pístů pro využití aditivních technologií. S ohledem na výsledky rešerše bylo třeba zhotovit návrh konvenčně vyráběného pístu spadajícího do vybrané kategorie. Dalším cílem byla konstrukční úprava pístu navrženého pro výrobu konvenčním způsobem tak, aby bylo optimálně využito výhod poskytovaných využitím aditivní technologie. Pro konstrukční úpravu byla vytvořena i optimalizační úloha, jejímž výsledkem bylo získání rozložení materiálu podle jeho procentuálního namáhání. Následná konstrukční úprava pístu byla rozdělena do tří variant, a to varianty nejkonzervativnější, varianty, která využívá výhod aditivních technologií více a nebyla by možná vytvořit konzervativní technologií výroby s přídavným obráběním, a variantu, která na spektru spadá mezi tyto dva extrémy. Pro modely všech navržených pístů byla vytvořena termálně-strukturální analýza při maximálním zatížení motoru a při přeběhových otáčkách. Z dat získaných termálně-strukturální analýzou bylo vyhodnoceno, zda je užití aditivní technologie v tomto případě vhodnější než využití konvenčních metod výroby.

KLÍČOVÁ SLOVA

Spalovací motor, píst, 3D tisk, aditivní technologie, anisotropie materiálu, termální analýza, strukturální analýza

ABSTRACT

The first objective of this thesis was compiling research about currently produced pistons for internal combustion engines and about additive manufacturing and based on the acquired information deciding which type of piston makes the most of the advantages. Following this research, the next step was creating a design adjustment of a piston, which was previously designed with the conventional methods of manufacturing in mind, in a way that would make the best use of the different possibilities of additive manufacturing. There was also an optimisation carried out, which depicted the densities of material elements in the piston, showing where the material was less important. There were three variants of the additive manufactured piston created, ranging from a relatively conservative design, which could be theoretically produced by conventional methods with a more substantial subtraction of material added, to a design which could only be produced via additive manufacturing. A thermo-structural analysis at maximum engine load was carried out for all these piston models. Based on these data, a conclusion was made, whether the use of additive manufacturing was justified over the use of the conventional subtractive methods.

KEYWORDS

Combustion engine, piston, 3D printing, additive manufacturing, material anisotropy, thermal analysis, structural analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VALTROVÁ, Martina. *Píst zážehového motoru vyráběný aditioní technologií* [online]. Brno, 2022 [cit. 2021-08-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137239>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Lubomír Drápal.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením pana inženýra Lubomíra Drápala a pana inženýra Zsolta Tánczose a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 13. srpna 2021

.....

Bc. Martina Valtrová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce panu Ing. Lubomíru Drápalovi, odbornému vedoucímu panu Ing. Zsoltovi Tánczosovi, panu Ing. Michalu Vlasákovi a dalším kolegům za jejich rady, trpělivost a čas který mi věnovali při řešení dané problematiky. Také bych ráda poděkovala rodině, přátelům za pomoc a za podporu.

OBSAH

Úvod	11
1 Píst zážehového motoru	12
1.1 Funkce.....	12
1.2 Požadavky.....	14
1.3 Zatížení.....	14
1.3.1 Tlaky ve spalovacím prostoru při provozu motoru	15
1.3.2 Setrvačné síly	15
1.3.3 Normálové síly	16
1.3.4 Opotřebování třením.....	16
1.3.5 Tepelné namáhání	16
1.4 Teplota pístu a chlazení	17
2 Moderní písty	19
2.1 Dnes používané materiály	19
2.1.1 Hliníkové slitiny	19
2.1.2 Železité materiály	20
2.1.3 Povlakování.....	20
2.2 Technologie výroby	21
2.2.1 Odlévání.....	21
2.2.2 Kování	21
2.2.3 Obrábění z bloku materiálu	22
2.2.4 Tváření plochého polotovaru	23
2.3 Příklady typů dnešních pístů používaných u zážehových motorů	24
2.3.1 Autothermic.....	24
2.3.2 Autothermatik.....	24
2.3.3 Box-type	25
2.3.4 EVOTEC®.....	25
2.3.5 Kované písty.....	25
3 Aditivní technologie.....	26
3.1 Technologie.....	29
Dnes se aditivní technologie pracující s kovy dělí na tyto typy, použitelné pro tuto práci: PBF (DMLS a EBM), DED, metoda tryskání pojiva a laminování plátů.....	29
3.2 Materiály	31
3.3 Možnosti 3D tisku	32

4	Porovnání možnosti uplatnění u pístů různých typů motorů.....	34
4.1	Píst vysokovýkonného zážehového motoru.....	36
4.1.1	Síťování modelu.....	39
4.2	Termální analýza.....	41
4.3	Strukturální analýza	44
4.4	Píst přizpůsobený pro 3D tisk.....	51
	Porovnání variant.....	52
4.4.1	Varianta A.....	53
4.4.2	Varianta B	55
4.4.3	Varianta C.....	57
5	Zhodnocení výsledků analýz.....	60
	Závěr.....	62
	Použité zdroje.....	63

ÚVOD

Spalovací motory, jak je známe, mají momentálně nejistou budoucnost, neboť v zájmu zpomalení či zvrácení globálního oteplování vyspělý svět ustupuje od nadměrného využívání fosilních paliv. Hladina oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů v atmosféře je nyní důležitým bodem zájmu jak jednotlivých vlád, korporací a firem, tak také nadnárodních organizací, jež si kladou za cíl jejich snížení. Tím pádem je kladen důraz na snížení spotřeby paliva a produkce emisí spalovacích motorů. V dnešní době je z těchto důvodů budoucnost spalovacích motorů ohrožena nástupem motorů elektrických, je zapotřebí věnovat pozornost jejich zefektivňování a využití všech dostupných technologií pro jejich vylepšení. Nedojde-li v dohledné době k výraznému zefektivnění spalovacích motorů, dá se předpokládat jejich vymizení z osobních automobilů v následujících letech.

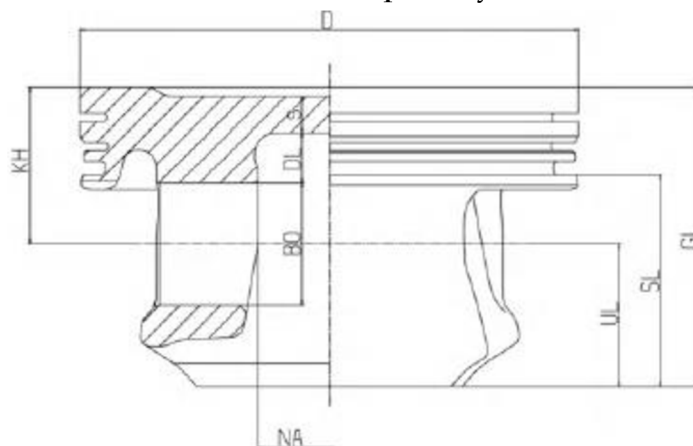
U vznětových motorů je jejich další vývoj pravděpodobněji spíše pro použití ve stavebních a dopravních užitkových strojích, traktorech a nákladních vozidlech. Využití vznětových motorů u osobních automobilů je do budoucna nepravděpodobné, zvláště s přihlédnutím k tomu, že již dnes dochází lokálně k omezování či zakazování jejich užívání.

Zážehové motory mají výhled do budoucnosti pravděpodobně o něco méně dramatický. Jejich využívání bude pravděpodobně pro pohon osobních automobilů postupem času sice taktéž výrazně omezeno, ale jejich výhodou a pravděpodobně do střednědobé budoucnosti největším využitím zážehových motorů bude spárování s elektromotorem do hybridní pohonné jednotky.

Dnes se písty vyrábí nejčastěji odléváním, u vysoce namáhaných pístů kování, a následným odebráním materiálu. Tyto konvenční technologie požadují relativně jednoduchý design z důvodu proveditelnosti, případné složitější detaily konstrukce vznikají odebráním materiálu, čímž dojde k nevyužití části materiálu, navýšení ceny výroby produktu a také k prodloužení doby výroby. Využitím aditivních technologií je možné navrhnout součásti tvarově složitější. Využití bude možné například mřížkové struktury nebo žebrování na vnitřní straně pístu, které by mohlo zlepšit chlazení i pevnost.

1 PÍST ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

Píst spalovacího motoru má několik důležitých funkcí a jsou na něj obecně kladeny velké požadavky. V této práci je kladen důraz na odlehčení pístu, neb je-li lehčí píst, působí na ostatní části motoru menší setrvačné síly od posuvných částí motoru a motor celý může být lehčí, čímž se dá docílit nižší spotřeby.

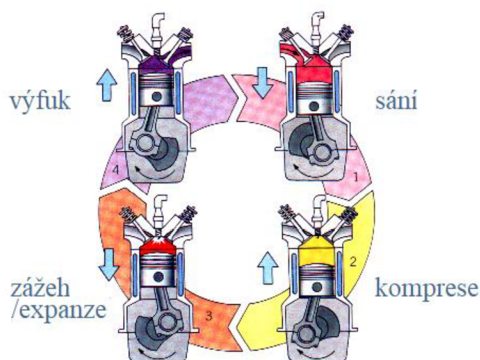


Obr. 1 - schéma pístu zážehového motoru odlitého z lehké hliníkové slitiny: BO – průměr pístního čepu, D – průměr pístu, DL – expanzní výška, GL – celková výška, KH – komprese, NA – vzdálenost mezi nálitky pro pístní čep, s – tloušťka pístního dna, SL – délka pláště, UL – výška spodní části pístu [1]

1.1 FUNKCE

Nejdůležitějšími funkcemi pístu jsou:

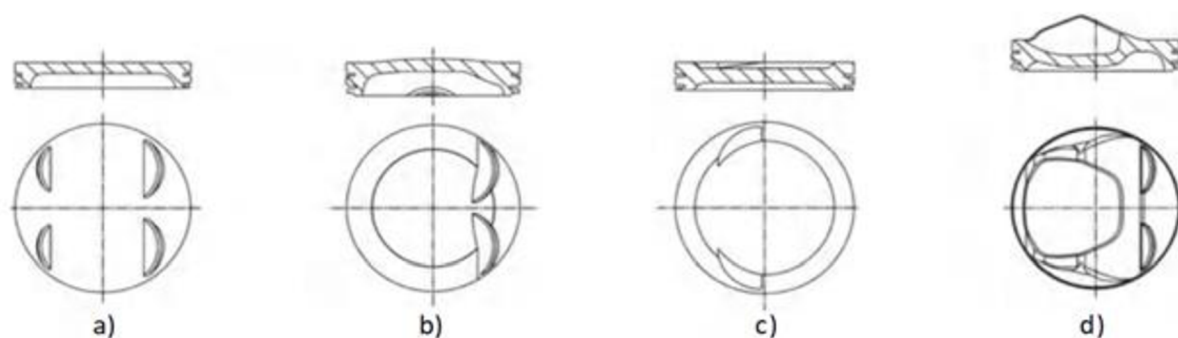
- přenos sil
- cyklická změna objemu spalovacího prostoru, jeho plnění a vyprazdňování
- utěsnění spalovacího prostoru
- vedení ojnice (u některých motorů)
- odvod tepla
- podpora tvorby optimální palivové směsi
- vedení a podpora pístních kroužků.



Obr. 2 - cyklická změna objemu spalovacího prostoru – schéma [17]

Síly od tlaku plynů působící na dno pístu jsou přenášeny z pístu přes čep a ojnici na klikový hřídel. Tak dochází ke změně translačního pohybu na pohyb rotační a také k přenosu pohybu z motoru směrem ke kolům.

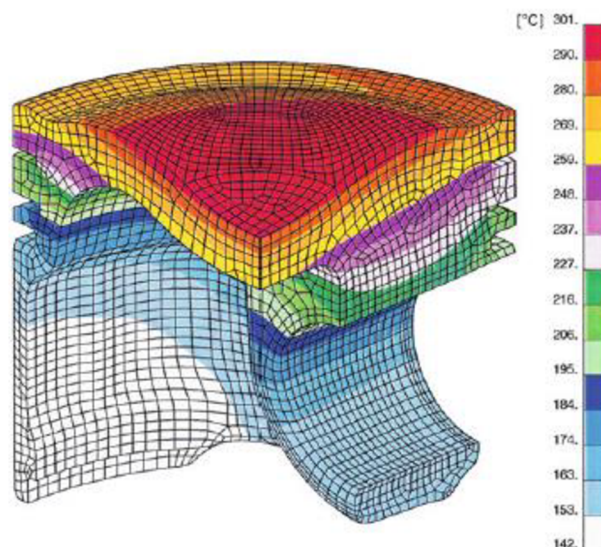
Utváření spalovacího prostoru, včetně jeho cyklických změn, je další velmi důležitou úlohou pístu. Spalovací prostor je tvořen dnem, které bývá speciálně tvarováno, aby napomáhalo optimálnímu průběhu hoření, plnění a vyplachování. U dvoudobých motorů navíc píst má ještě funkci, která taktéž souvisí s plněním, prouděním a vyplachováním, kdy vesměs píst svým pohybem nahrazuje ventily a ovládá i přepouštěcí kanál. [1], [2], [3]



Obr. 3 - příklady dna pístu u čtyřdobých zážehových motorů a), b), c) - vícebodové vstřikování paliva, d) přímé vstřikování paliva do spalovacího prostoru [1]

Utěsnění spalovacího prostoru je potřebné nejen z důvodu toho, aby nedocházelo k úniku plynů ze spalovacího prostoru do klikové skříně, čímž by docházelo ke snížení užitečného přetlaku ve spalovacím prostoru, ale také z toho důvodu, aby se do spalovacího prostoru nedostával lubrikační a chladicí olej, jež bývá rozstříkovan ze spodní strany pístu. V případě, že se do spalovacího prostoru olej dostává, znatelně se zvyšují emise motoru. Za utěsnění spalovacího prostoru stojí především pístní kroužky – dva těsnící a jeden stírací, jež musí být dimenzovány tak, aby utěsnily vůle jak při chodu "za studena", tak v případě, kdy je píst vlivem různých teplotních roztažností materiálů více tepelně zdeformován nežli vložka válce, ale aby nedošlo k zadření či vysokému tření. Největší problém s těsněním a zamezením "profuku" plynů ze spalovacího prostoru nastává právě při chodu "za studena". Z důvodu měnících se vůlí a rozměrů jsou kroužky předepínány pružinami. [1], [2], [3]

Píst a pístní kroužky se také účastní chlazení spalovacího prostoru a odvodu tepla díky chladicímu oleji. V případě chlazení nástřikem oleje ze spodní strany pístu je odvod tepla méně výrazný než v případě implementace chladicího kanálku či chlazeného nosiče pístních kroužků. Každopádně tato funkce pístní skupiny je taktéž důležitá, neb bez chlazení by došlo k velkému zahřátí jak součástí spalovacího prostoru a k jejich možnému poškození a kolizi. Navíc při spalování při příliš vysoké teplotě může dojít k výraznému navýšení nebezpečných emisí. [1], [2], [3]



Obr. 4 - běžné rozložení teplot u pístu zážehového motoru [1]

1.2 POŽADAVKY

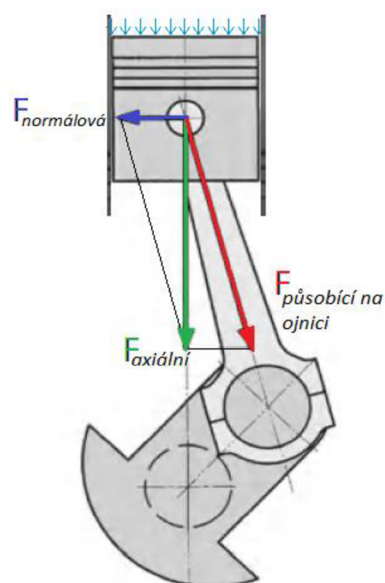
Vzhledem k již zmíněným požadavkům je u pístů potřeba splnit požadavky na:

- vysokou pevnost materiálu
- odolnost
- schopnost pracovat v různých zátěžových podmínkách
- nízké tření na kontaktu s vložkou válce
- odolnost vůči opotřebení
- odolnost vůči zadření.

[1], [2]

1.3 ZATÍŽENÍ

Vzhledem k velkému namáhání pístů a pístních kroužků jak mechanicky, tak tepelně, musí být výroba i materiály velmi kvalitní. Navíc se jedná o cyklická zatížení s velkými počty opakování. Písty bývají tedy velmi vysoce namáhány na únavu. Z důvodu složitého kombinovaného namáhání jsou pro výpočty nezbytná měření teplotních roztažností materiálů, "hot pulse" testy, kdy se měří vliv zahřátí a prudkého ochlazení na materiál, testy únavové pevnosti a studie vlastností závislých na teplotě. Obdobně důležité jsou i zkoušky na běžících motorech a testy prováděné za "běžného provozu". [1], [2], [3]



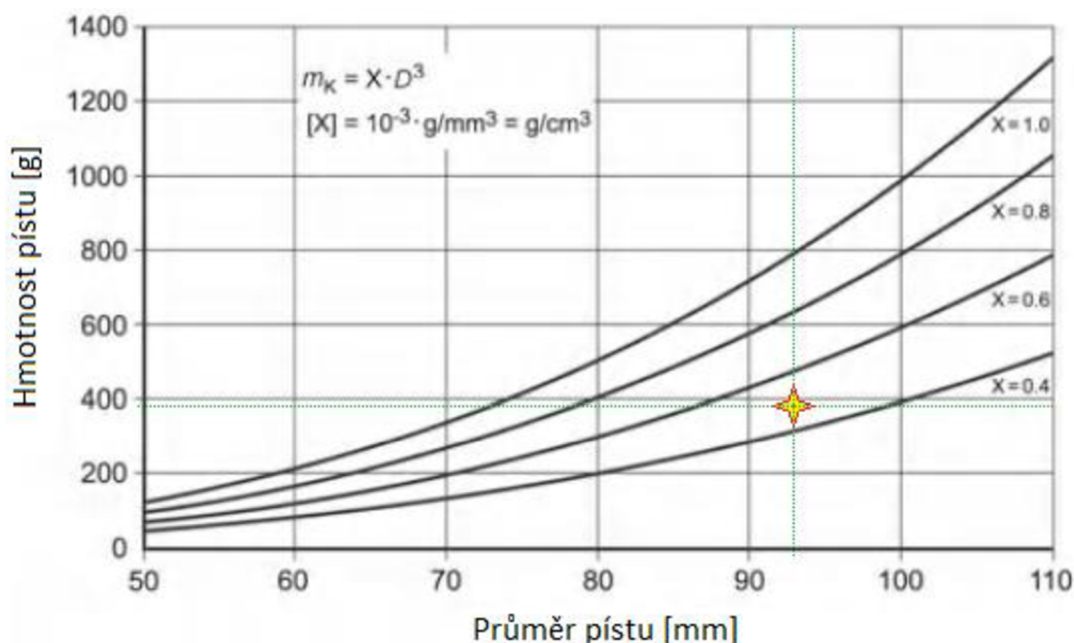
Obr. 5 - schéma sil působících na píst [1]

1.3.1 TLAKY VE SPALOVACÍM PROSTORU PŘI PROVOZU MOTORU

Tlak souvisí nejen se tvarem spalovacího prostoru, předstihu zapalování, umístění zážehových svíček a vstřikovacích trysek, ale také na složení palivové směsi. Průměrný tlak ve spalovacím prostoru je několiknásobně převyšován tlakem maximálním, ten může u zážehového motoru dosahovat až 80 barů a u vznětových motorů až 160 barů, aniž by docházelo ke klepání. Tlak od spalin způsobuje axiální síly působící na píst. Průměrný tlak ve spalovacím prostoru se pohybuje většinou mezi šesti a třinácti bary u čtyřdobých zážehových a mezi osmi a dvaceti u vznětových čtyřdobých motorů. [1], [3]

1.3.2 SETRVAČNÉ SÍLY

Spolu s tlakem od plynů setrvačné síly mají výrazný vliv na velikost axiálních sil působících v ose válce. K největšímu zrychlení hmoty pístní skupiny dochází vždy v úvratích. Zrychlení závisí na otáčkách motoru, zdvihu a poměru zdvihu vůči délce ojnice. Skládají se s působením sil tlakových, například v horní úvratí působí proti nim. Právě v této složce axiálních sil se výrazně projevuje hmotnost pístní skupiny, jejíž snížení je důležitým cílem této práce. [1]



Obr. 6 - závislost hmotnosti pístu na vrtání u osobních automobilů – zvýrazněný bod je označení pístu zpracovaného v této diplomové práci (vrtání – 93 mm, hmotnost – 384 g) - hmotnostní koeficient X je přibližně 0,48 [1]

Tab. 1 - typické hodnoty X pro osobní vozidla s písty z hliníkových slitin [1]

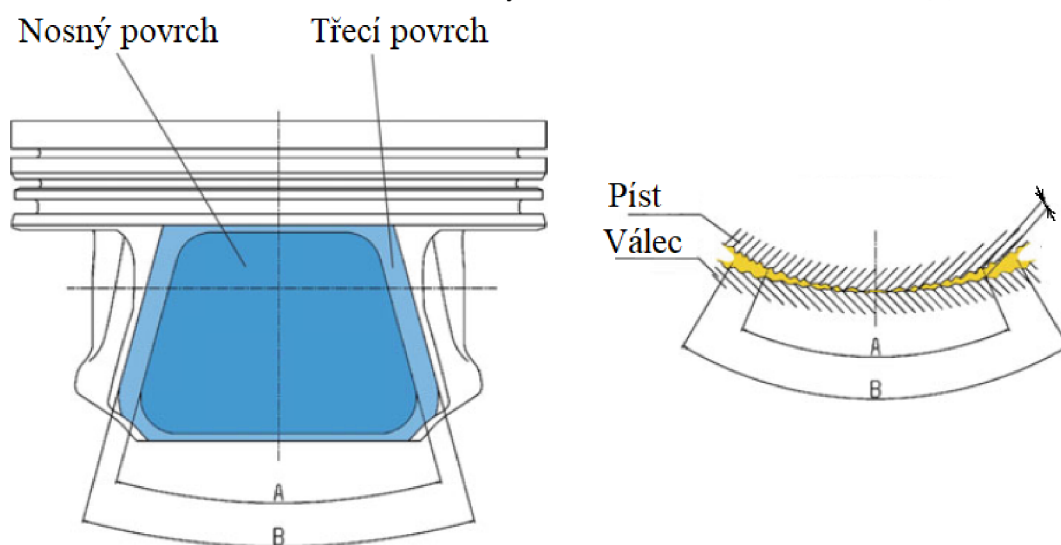
Typ motoru	Hmotnostní koeficient X (m_k/D^3)
Dvoudobý zážehový	0,5-0,7
Čtyřdobý zážehový s nepřímým vstřikem	0,4-0,6
Čtyřdobý zážehový s přímým vstřikem	0,45-0,65
Čtyřdobý vznětový	0,9-1,1

1.3.3 NORMÁLOVÉ SÍLY

V závislosti na úhlu natočení klikového hřídele vznikají působením výše zmíněných axiálních sil i síly působící v rovině kolmé na osu válce. Tyto síly způsobují laterální napětí v pístu. Tyto normálové síly jsou závislé na silách axiálních a úhlu, který svírá v daném bodě natočení klikového hřídele ojnice s osou válce. V úvratích by měly být nulové (neuvažujeme-li excentrický píst. Tyto síly mohou způsobit v případě velké vůle pístu ve válci zvýšenou hlučnost chodu motoru, opotřebení pístu a vložky válce, případně může dojít až k poškození samotného válce zapříčiněnému kavitací. [1]

1.3.4 OPOTŘEBOVÁNÍ TŘENÍM

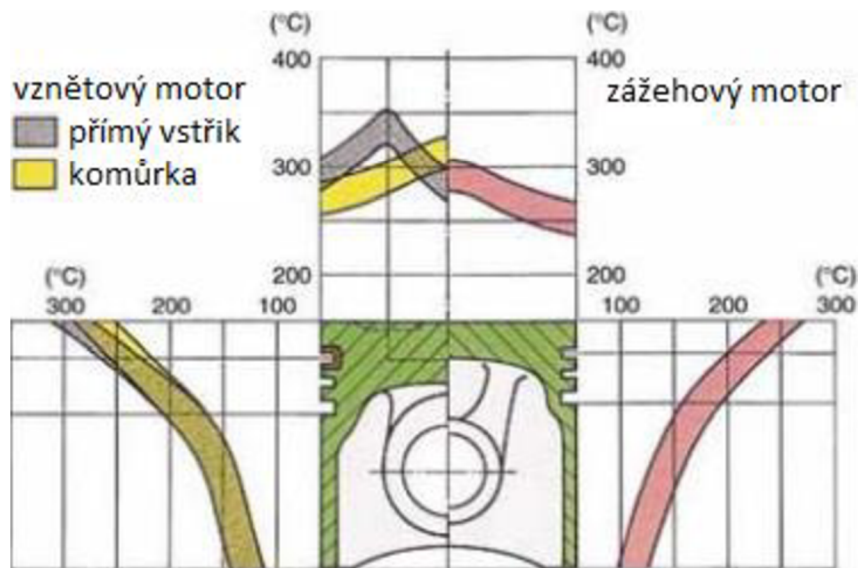
Tření je důležitý faktor při návrhu pístu a jeho vůlí ve válci. Třecí síly mezi pláštěm a vložkou válce mají výrazný vliv na hladkost chodu motoru. Není cílem mít tření co nejnižší a kontaktní povrchy co nejhladší, povrchy bývají honovány či jinak upravovány. Ideální hrubost povrchu pláště je 2,5–5 μm . Správné hodnoty zlepšují charakteristiku chodu motoru při záběhu, zamezují abrazivnímu opotřebení, zabraňují zadření motoru a tvoří ideální prostředí pro tvorbu olejového filmu mezi pláštěm a vložkou válce. Na povrchu pláště se často využívá povlakování (např. MAHLE GRAFAL), ke snížení tření a zvýšení odolnosti vůči zadření. [1]



Obr. 7 - mezera na hranici mezi pístem a válcem [1]

1.3.5 TEPelnÉ NAMÁHÁNÍ

Rozložení teplot v pístu je značně nerovnoměrné, čímž dochází ke vzniku napětí, která působí na píst spolu s napětími od mechanických sil. Navíc zvýšená teplota výrazně ovlivňuje vlastnosti použitých materiálů. Přestup tepla mezi plyny ve spalovacím prostoru, které mohou dosahovat teplot až kolem 2000°C, závisí na lokálním rozdílu teplot a na koeficientech přenosu tepla a tepelné vodivosti. Tyto koeficienty jsou výrazně ovlivněny kvalitou a vlastnostmi povrchu a tvaru dna pístu a případným obsahem zbytků po spalování. [1], [3]



Obr. 8 - typické rozložení teplot na pístu z hliníkové slitiny [8]

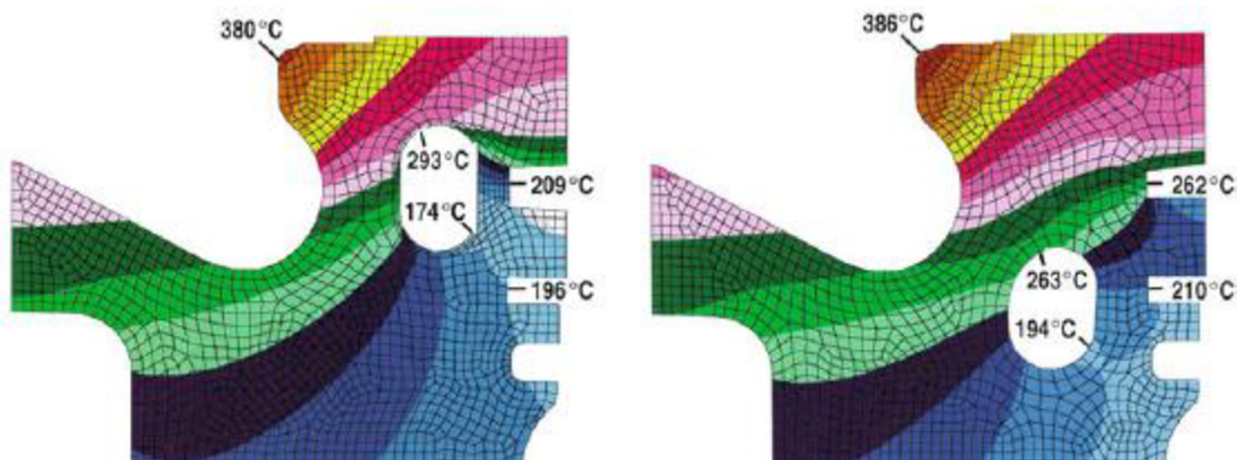
Teplota pístu se odvíjí od typu cyklu (zážehový vs. vznětový motor, čtyřdobý vs. dvoudobý motor), typu vstřikování, chlazení motoru a na provozních podmínkách. Také velice záleží na vlastnostech pístu jako takového, jako například schopnost absorbovat teplo, tepelná vodivost, rozměry průřezů ploch, kterými je teplo vedeno a disipací tepelné energie do okolí, především do chladicího oleje či do válce. Pokud teplota překročí lokálně určitou hranici, může dojít ke vzniku trhlin nebo k částečnému natavení, pokud k tomuto dojde v oblasti pístních kroužků, může docházet ke karbonizaci či tuhnutí oleje, který pak brání pohybu kroužků. Pokud se kroužek nemůže volně pohybovat, zvyšuje se tím riziko tzv. "blow-by", tedy "profuku" plynů ze spalovacího prostoru do prostoru klikové skříně, kde tímto dochází k oteplení a zhoršené lubrikaci pístní skupiny a kontaktu s válcem. [1], [3]

Materiálové vlastnosti jsou zpravidla výrazně závislé na teplotě, především u hliníkových slitin, tepelné zatížení především výrazně ovlivňuje únavové namáhání pístu. U zážehových motorů je kritickou oblastí napojení nálitku pro pístní čep na dno pístu. [1], [2], [3]

1.4 TEPLOTA PÍSTU A CHLAZENÍ

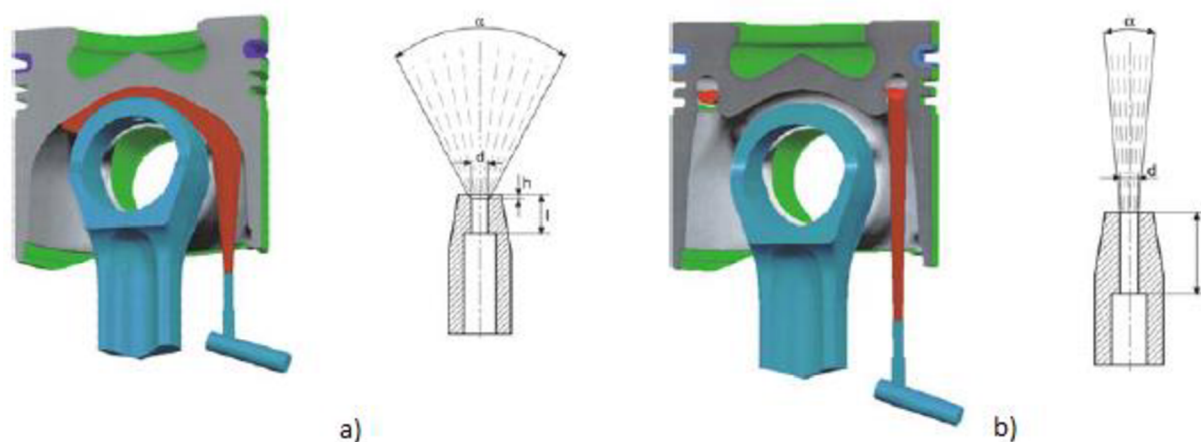
Teplota pístu je ovlivňována několika proměnnými, jež závisí na motoru a jeho zatížení. Při konstantních otáčkách motoru se dá říct, že je teplota úměrně závislá na středním tlaku pracovního cyklu. Pokud je naopak konstantní střední tlak, roste teplota úměrně k otáčkám, ale není výrazněji ovlivněna změnou kompresního poměru. Dalším faktorem, který teplotu výrazně ovlivňuje je například bod zážehu, průběh spalování (například teploty mohou narůstat při klepání nebo špatnému promíchání palivové směsi), geometrie spalovacího prostoru a koruny, rychlost proudění plynů ve spalovacím prostoru a chlazení motoru a pístu.

U dnešních motorů je obvyklé, že je píst chlazen minimálně nástřikem oleje spodní strany pístu, ale u motorů s vyššími výkony či přeplňováním se používají písty s chladicími kanálky, neboť takovýto systém chlazení je schopen odvést výrazně více tepla. [1]



Obr. 9 - porovnání teplot pístu při použití a) chlazeného nosiče pístních kroužků a b) kanálku vzniklého zalitím solného jádra u vznětového motoru, reference pro ilustraci toho, jak pozice kanálku ovlivní výslednou teplotu koruny a prvních dvou drážek pro pístní kroužky [1]

Různé typy chlazení jsou různě efektivní ve snižování teploty pístu, například v drážce pro první pístní kroužek je teplota snížena o 5°C-15°C při chlazení pomocí chlazené ojnice, o 10°C-32°C v případě použití chlazení nástřikem pístu stacionární tryskou, o 25°C-50°C při využití kanálku vytvořeného solným jádrem, který bývá a úrovni stíracího kroužku, a až o 75°C-100°C v případě použití chlazeného nosiče pístních kroužků, který bývá efektivnější než kanálek vytvořený zalitím solného jádra, neb bývá umístěn blíže dna pístu a tedy blíže drážce prvního pístního kroužku. [1], [3]

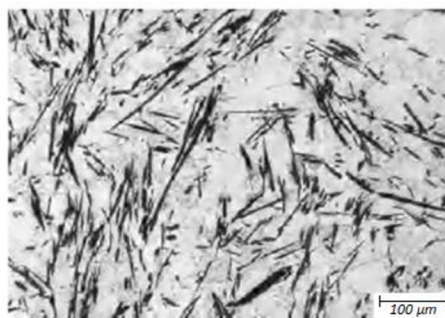


Obr. 10 - porovnání tvaru olejových trysek v případě a) chlazení nástřikem a v případě b) chlazení pomocí olejového kanálku formovaného solným jádrem [1]

2 MODERNÍ PÍSTY

2.1 DNES POUŽÍVANÉ MATERIÁLY

Na materiály pro výrobu pístů je kladena spousta požadavků jako je nízká měrná hmotnost, vysoká mechanická odolnost a trvanlivost, teplotní roztažnost korespondující s roztažností materiálu vložky válce (většinou ocel či ocelová slitina), s litinou (v případě válce bez vložky), a také s materiálem pístního čepu, odolnost proti otěru, dobrá tepelná vodivost a dobrá obrobiteľnosť. Nalezení jednoho materiálu, který bude mít všechny tyto požadované vlastnosti co nejlepší, bývá problematické, často záleží na tom, která kritéria budou brána jako rozhodující. Materiály s dobrou obrobiteľnosťou jsou vhodné pro výrobu ve velkých sériích, jejich obrábění je levnější a jednodušší. Veškeré výrobní procesy mají za cíl vyprodukovat výrobek s co nejvyšší kvalitou materiálu a co nejmenším "hluchým" objemem materiálu, který je třeba opracovat. [1]



Obr. 11 - slitina M124 s keramickými mikrovláknami [1]

2.1.1 HLINÍKOVÉ SLITINY

Z důvodu nízké měrné hmotnosti je k výrobě pístů například velmi často využíváno **hliníkových slitin**, ale ty mají ve srovnání třeba s ocelovými slitinami horší mechanické vlastnosti a velkou teplotní roztažnost. Pro zmenšení tepelné roztažnosti se do hliníkových slitin často přidává křemík, který zároveň zvyšuje odolnost proti otěru a zlepšuje kluzné/třecí vlastnosti pístu. Pro zlepšení pevnosti a odolnosti materiálu se přidává do slitiny měď a hořčík s křemíkem, jež po vytvrzení propůjčí slitině lepší vlastnosti. V případě, že ani takto vylepšená hliníková slitina lokálně nedostačuje, využívá se zalití ocelových nebo litinových částí do odlitku z hliníkové slitiny tak, aby došlo ke zpevnění v nejvíce namáhaných oblastech, například se používá vkládaná drážka pro první pístní kroužek. Další vynikající vlastností hliníkových slitin je jejich tepelná vodivost, která je výrazně vyšší než u šedé litiny. Díky této vlastnosti jsou písty schopné odolat teplotám vyšším, než je teplota tavení dané slitiny. Nejvyšší teploty ve spalovacím prostoru mohou teplotu tavení až trojnásobně převýšit, ale průměrná teplota plynů je "pouze" asi 700°C, tedy na srovnatelné úrovni jako teplota tavení, ale hliníkové slitiny zvládají odvádět teplo do chladicího oleje či do okolí dostatečně rychle na to, aby nedošlo k jejich tavení. Naopak obrobiteľnosť u hliníkových slitin není ideální, neb relativně měkká matrice hliníku v sobě má velmi tvrdé krystaly, což způsobuje zvýšené namáhání obráběcích nástrojů.

Další využívanou variantou zpevnění hliníkových slitin je použití keramických vláken. Tím dojde k výraznému zvýšení odolnosti vůči mechanickému i tepelnému namáhání, snížení teplotní roztažnosti a zvýšení Youngova modulu pružnosti, ale také k navýšení měrné hmotnosti a snížení tepelné vodivosti. Dalším způsobem vylepšení vlastností hliníkových slitin jsou tepelné úpravy materiálu, slitiny se mohou nechat zestárnout na pokojové teploty, nebo se dá proces urychlit zvýšením teploty (mezi 100°C až 300°C), čímž dojde ke zvýšení tvrdosti a pevnosti. [1], [2], [3]

2.1.2 ŽELEZITÉ MATERIÁLY

V případě, že jsou požadavky na odolnosti vyšší, než jsou hliníkové litiny schopny splnit, využívá se železných materiálů, buď **litin** nebo **kovaných ocelí**, a to coby částí použitých k lokálnímu zpevnění či k výrobě kompletního pístu. U železných materiálů je nejdůležitějším komponentem, jež se železem tvoří slitiny, uhlík. V Fe-Fe₃C diagramu jsou vidět jednotlivé typy ocelí a litin, z nichž se nejčastěji používají k odlévání litiny s kuličkovým a lamelárním grafitem, a k odlévání či kování zpevňujících částí či pístů oceli s obsahem grafitu méně než 0,8 %, které je třeba například precipitačně vytvrdit, temperovat, nebo do slitiny přidat například molybden a chrom. Se zdokonalením technologie kování se v poslední době začalo častěji využívat ocelí ke kování. Jejich velkou nevýhodou je, že měrná hmotnost železných materiálů je mnohem vyšší než u materiálů hliníkových. Tato nevýhoda je ovšem poněkud zmírněna tím, že díky lepším mechanickým vlastnostem a obrobitelnosti mohou být ocelové kované písty méně objemné díky slabším stěnám a nižším žebrům, čímž dochází jak k šetření materiálu, tak ke zmírnění nárůstu hmotnosti zapříčiněné volbou materiálu s vyšší hustotou. [1], [2], [3]

2.1.3 POVLAKOVÁNÍ

Plášť pístu bývá povlakován, aby bylo zamezeno vzniku lokálních svarů mezi pláštěm a válcem, případně mezi pláštěm a vložkou válce, a zadření pístu. Povlakování nebývá určeno k omezení opotřebení pístu či vložky otěrem. Za normálních okolností při běžném provozu motoru nebývá povlakování pláště nutné, ale pro případ extrémních podmínek (nedostatečná lubrikace, deformace válce, nezajetý motor) provozu je často aplikováno. Materiál musí být vybrán na základě vhodnosti použití s materiálem válce či vložky, což bývá nejčastěji hliník nebo litina. [1], [3]

V případě, že je válec z litiny, se často používá grafitový (GRAFAL) či cínový povlak. Výhodou grafitu je, že má samomazné vlastnosti a lépe zabraňuje zadření pístu, navíc jeho vrstva bývá cca desetkrát silnější než vrstva cínová. Za normálních podmínek se grafitový povlak moc neopotřebovává, ale v případě zvýšeného tlaku může dojít k lokálnímu opotřebení. Cínový povlak se používá spíše coby zlepšení podmínek při používání nezajetého motoru, vzhledem k jeho měkkosti se relativně rychle opotřebí. [1]

Je-li válec z hliníku, používají se povlaky železa, případně s přidanou tenkou svrchní vrstvou cínu (Ferrostan, FerroTec, FERROPRINT). Pokud by došlo k použití výše zmiňovaných povlaků, došlo by k rychlému opotřebení a zadírání. Tyto povlaky jsou odolné opotřebení a mají vynikající spolehlivost za chodu. Tyto povlaky bývají použity výhradně u zážehových motorů osobních automobilů, neb u vznětových motorů se nepoužívají hliníkové válce. [1]

Krom povlakování pláště se užívá i povlakování tvrdými oxidy či plátky chromu u drážek prvního pístního kroužku a fosfátování či povlakování grafitem děr pro pístní čepy, které může nahradit kluzné ložisko. [1], [3]

2.2 TECHNOLOGIE VÝROBY

Ideální technologie by měla umožňovat výrobu pístů s komplexní geometrií s použitím minima materiálu (tedy co nejméně obrábění), zajistit co nejvyšší kvalitu materiálu, a to levně.

2.2.1 ODLÉVÁNÍ

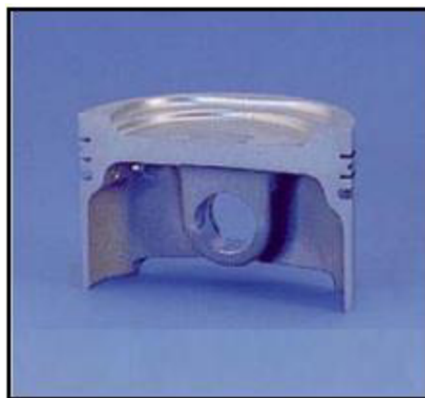
Odléváním jsou nejčastěji vyráběny písty ze slitin hliníku, případně ze šedé litiny. Nejčastěji se používá odlévání do pevných kovových forem s vkládanými jádry nebo se solnými jádry, která jsou po odlití rozpuštěna, přičemž za sebou ponechají chladicí kanálky. Výhodou odlévání do kovové formy je relativně nízká cena a možnost dosažení poměrně komplexní geometrie odlitku. Naopak nevýhodami jsou počáteční cena výrobních strojů a forem a možnost vzniku vad v materiálu při procesu. [1], [3]

2.2.2 KOVÁNÍ

Velmi výkonné motory a motory s velkým vrtáním mívají písty kované, nejčastěji z hliníkových slitin nebo z oceli. Kováním vzniká kvalitnější a pevnější materiál, než vzniká odléváním. Výkovky musí mít jednodušší geometrii než odlitky, složitější tvarové prvky se poté opracovávají. Vyrábí se též písty z kovaného materiálu, kdy

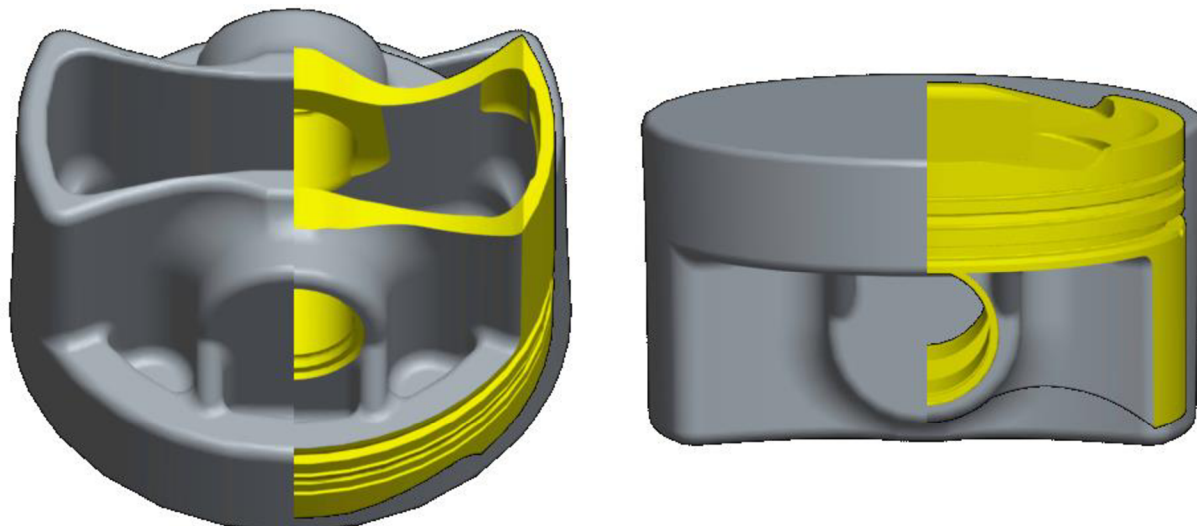


Obr. 12 - píst obroběný z odlitku [8]



Obr. 13 - píst obroběný z výkovku

z bloku kované oceli s příměsí odebíráním materiálu vznikne píst s komplexnější geometrií, s vynikající odolností a odolností vůči vysokým teplotám. Cena pístu je ve srovnání s odlitými písty o něco vyšší. [1], [3]



Obr. 14 - výkovek a obrobek přeplňovaného zážehového motoru

2.2.3 OBRÁBĚNÍ Z BLOKU MATERIÁLU

Ve vzácných případech se dají vyrobit písty například odebíráním materiálu z bloku karbonových materiálů, ale tato technologie a materiál není u spalovacích motorů příliš využívaná. Karbonové písty neodvádí ze spalovacího prostoru teplo dostatečně účinně, ale některé specializované firmy takto vytváří například karbonové pláště pro hybridní písty. Výzkum možností pístů z uhlíkových kompozitních materiálů pro spalovací motory byl v roce 1994 proveden NASA, která má v tomto směru několik



Obr. 15 - píst vyrobený subtraktivní metodou [21]

patentů. [20] V neobvyklých případech se k této technologii přistupuje u pístů závodních vozů, kdy jsou písty obráběny z válcového výkovku, který je kován do nejjednoduššího tvaru a výsledný píst vzniká kompletně subtraktivními metodami, kování má za cíl pouze zlepšit vlastnosti materiálu. [21]

2.2.4 TVÁŘENÍ PLOCHÉHO POLOTOVARU

Pomocí tváření plochých polotovarů tažením lze vytvořit konstrukčně velmi jednoduché, lehká a levné písty pro motory, kde nebudou vystaveny vysoké zátěži. U pístu, na němž byla studie provedena, došlo k úspoře téměř jedné čtvrtiny původní hmotnosti a výsledek měl uspokojivou toleranci a výrobní proces odpovídal předpokladům ze simulací. [19]

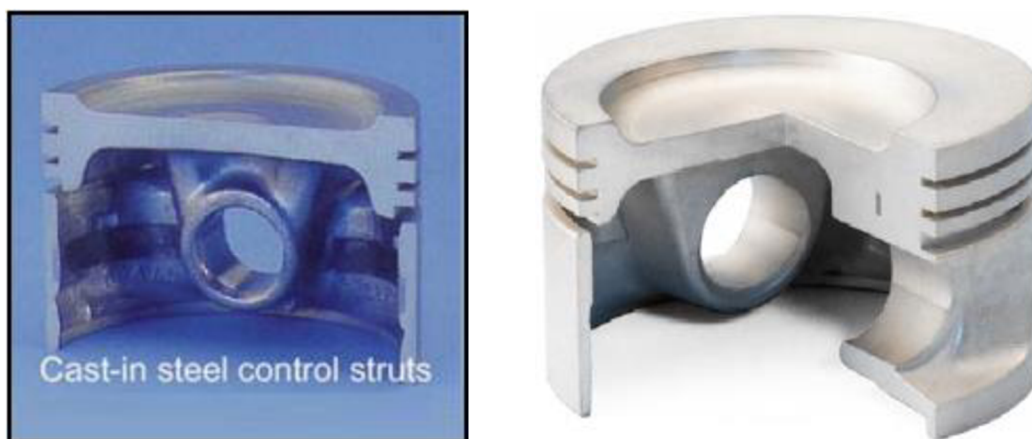


Obr. 16 - schéma výrobního postupu taženého pístu [19]

2.3 PŘÍKLADY TYPŮ DNEŠNÍCH PÍSTŮ POUŽÍVANÝCH U ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ

2.3.1 AUTOTHERMIC

Tyto písty mají na přechodu mezi korunou a pláštěm litinovou vložku na úrovni drážky pro stírací olejový kroužek. Tato vložka zabraňuje rozpínání hliníkového pístu, neb má menší teplotní roztažnost. Vyznačují se tichým chodem. Kvůli této vložce a drážce, která je k zavedení potřeba, mají nižší odolnost a nejsou téměř využívány. [1]



Obr. 17 - Authothermic píst [8], [1]

2.3.2 AUTOTHERMATIK

Tyto písty fungují na podobném principu jako písty Autothermic, ale nemají na přechodu mezi pláštěm a korunou drážku. Kombinují výhodu využití prvku kontrolované expanze s vyšší odolností, proto se stále využívají. [1]



Obr. 18 - Autothermatik píst [8], [1]

2.3.3 BOX-TYPE

Tyto písty mají nízkou hmotnost, dobrou tuhost a mírně hranatým, zaobleným a často mírně oválným tvarem pláště. V případě, že je na straně s vyšším zatížením bočních sil větší šířka pláště, jedná se o asymetrický box-type píst. Tyto písty mohou být odlévané i kované. [1]



Obr. 19 - písty Box type– asymetrické [1]

2.3.4 EVOTEC®

EVOTEC® design je píst typu box-type, který má plášť, který se zužuje směrem ke koruně. Je nesymetrický a méně zatížená strana pláště menší tloušťku stěny mezi pláštěm a nálitkem pro pístní čep. Tento typ pístu také využívá tvrzeného nosiče pístních kroužků. [1]



Obr. 20 - písty EVOTEC [1]

2.3.5 KOVANÉ PÍSTY

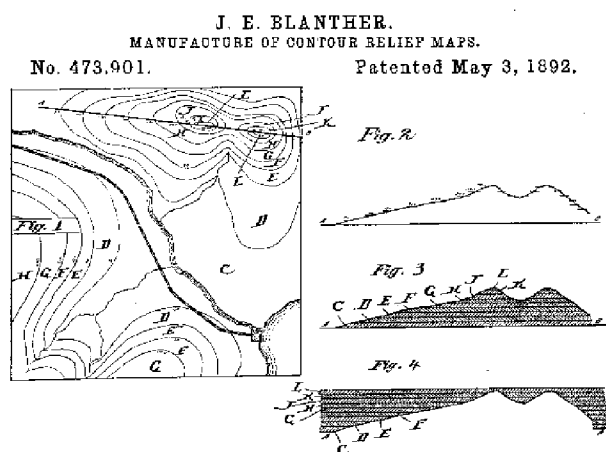
U vysokovýkonných motorů, v nichž jsou písty vysoce zatížené, jako jsou přeplňované zážehové motory sportovních automobilů, je kladen vyšší nárok na odolnost zatížení. Výhoda kovaných pístů je v tom, že kovááním vzniká kvalitnější materiál nežli odléváním. Takto vyrobené písty lépe odolávají vysokým zátěžím. Kované písty jsou dražší a výkovek musí mít jednodušší geometrii než odlitek. [1], [2]



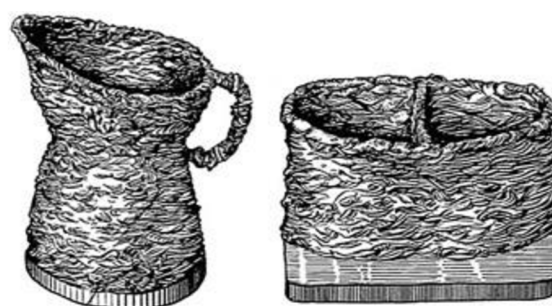
Obr. 21 - kované písty – vlevo z Formule 1 [1], vpravo z McLarenu MP4-12C

3 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Prvopočátky 3D tisku kovových materiálů se datují minimálně do devatenáctého století, budeme-li akceptovat tvorbu forem skládáním plechů jako počátek tohoto trendu. Od skládání plechů (cca 1860) do reliéfů (viz Obr. 22), přes navařování vrstev kovu za účelem vytvoření prostorového objektu (patent z roku 1925), se aditivní technologie kovových materiálů dostala až ke dnes používaným výrobním procesům. Od roku 1972 bylo podáno několik patentů, které obsahovaly popis technologie slinování vrstev kovového prášku usměrněným paprskem energie za účelem vytvoření prostorového dílu na základové desce, ovšem obecně se za počátek historie dnešního 3D tisku kovových prášků bere rok 1986, kdy byl patentován první posléze komerčně prodáváný stroj. V roce 2016 vypršela platnost některých důležitých patentů, jež se týkaly 3D tisku kovů, díky tomu došlo ke snížení cen tiskáren, a tedy ke zvýšení zájmu veřejnosti o jeho využití. [9], [12]



Obr. 22 - jeden z prvních předchůdců dnešních aditivních technologií – patent na výrobu 3D reliéfních map [22]



Obr. 23 - patent z roku 1925 na tvorbu 3D objektu postupným navařováním vrstev [31]

V roce 2014 Koenigsegg oznámil využití aditivních technologií v *the One:1*, bylo vyrobeno Urbee - vozidlo s "tisknými" okny a částmi karoserie, Local Motors představilo Strati - vozidlo vyrobené ze 3D tištěných součástí (krom pohonné jednotky). V roce 2015 Airbus oznámil, že i v novém Airbusu se vyskytují součásti vyrobené aditivní technologií. V roce 2017 oznámilo GE Aviation, že má v plánu navrhnout a vyrobit motor pro helikoptéru pouze ze 16 částí (místo 900), díky užití 3D tisku. 3D tisk se také využívá již několik let k reprodukci legendárních vozů, jako Audi 1938 Grand Prix nebo třeba Lotus 340r. [12], [34]

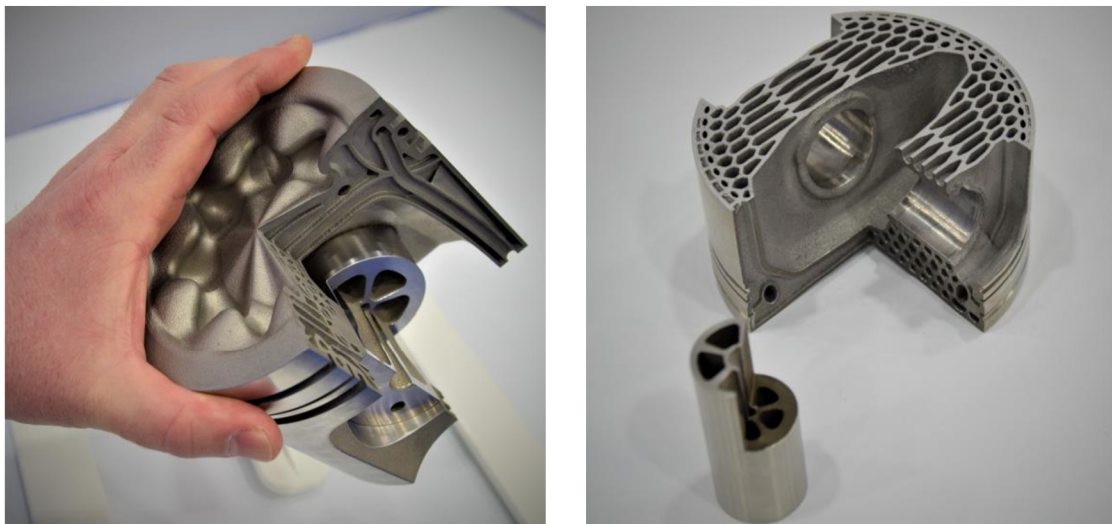


Obr. 24 - Edag Soulmate (2016) [34]



Obr. 25 - Urbee 2 [33]

Na obrázku 26 je vidět, že aditivní technologie poskytují větší možnost využití složitých struktur již ve výrobě před opracováním. Takovýmto způsobem lze navrhnout píst se složitým a důmyslným systémem chladicích kanálek nebo s velkou plochou k chlazení obstríkem. S optimálním využitím možností by měl být výsledek lehčí, lépe chlazený a s menším množstvím obrábění. Také je jejich výhodou, že mohou urychlit proces výroby v počátečních stádiích, kdy se design ještě může měnit. [23]



Obr. 26 - ukázka 3D tištěného pístu – vlevo pro vznětový motor (víceero chladicích kanálek), vpravo zážehový motor [23]

Jedním z problémů ležících v cestě širšímu používání aditivních technologií je to, že chybí internacionální a všeobecně uznávané normy, kterými by se výroba a konečné výrobky řídily. Absence norem způsobuje, že zákazníci nemají jistotu, zda výsledný produkt splňuje očekávané požadavky například na kvalitu materiálu, geometrické a rozměrové tolerance, drsnosti povrchu atp. V roce 2016 navrhla ASTM (American Society for Testing and Materials) ve spolupráci s ISO (International Organization for Standards) rámcovou normu, podle níž se standardy pro 3D tisk kovových materiálů dělí na obecné standardy (platící pro všechna použití a koncepty), standardy pro širší kategorie materiálů, procesů/vybavení a hotových výrobků, a specializované standardy pro specifické materiály, procesy či uplatnění. Kompletní norma sice vydaná není, ale ASTM a ISO vydaly alespoň standardy a směrnice pro geometrické specifikace a obecné principy, týkající se výrobků získaných pomocí aditivních technologií. Několik organizací se v průběhu let pokusilo o vytvoření norem, jež by byly použitelné v jejich užší zájmové oblasti, například ASME, AWS a SAE. Na základě těchto norem s užším zaměřením se pravděpodobně dočkáme ucelené verze, která bude platná pro široké spektrum aplikací aditivních technologií kovových prášků, nejen pro užší oblasti zájmu. Na začátku roku 2018 bylo založeno Centrum pro dokonalé aditivní technologie (volný překlad, anglicky Additive Manufacturing Center of Excellence), které má za úkol především výzkum pro umožnění efektivní zavedení průmyslových standardů, podpora vzdělávání a zaučování lidí v těchto oborech, testování zdatnosti a certifikace. [15], [18]

Porsche, IAV, BMW i další výrobci očekávají v nedaleké budoucnosti větší míru využívání aditivních technologií pro automobily, včetně pohonných jednotek. Někteří výrobci již takové součásti pro své modely vyrábí a prodávají, ale většinou se nejedná o části pohonných jednotek. Tyto jsou většinou pouze za účelem předvedení, kam se v budoucnu budou ubírat trendy. Například Porsche vytvořilo tištěný píst pro svůj model GT2 RS, který je o 10% lehčí a zvedl výkon motoru. Jedním dechem ale z Porsche dodávají, že se bude aditivní technologie využívat až poté, co dojde ke ustálení kvality těchto výrobků. [30], [23], [13]



Obr. 27 - porovnání kovaného a tištěného pístu pro motor Porsche GT2 RS [30]

Geometrické tolerance a dodržování přesných rozměrů při výrobě závisí na tloušťce vrstev tisku a na směru tisku, tedy na volbě natočení normály roviny tisku. Tolerance musí být voleny s uvažováním těchto vlivů. Při definování tolerancí je také potřeba brát v potaz nutnost tisku podpor pro převisy materiálu, které mohou svou přítomností a tepelnou roztažností ovlivnit napětí v okolním materiálu. Při odebrání podpor při opracování dílu poté dochází ke změně struktury povrchu. Dalším nynějšími standardy těžko popsatelným problémem je vzor výplně, neb je problém popsat velikost, tvar a tolerance pro různé buňky, vzhledem k chybějícím symbolům a značkám. Také je problém definovat a popsat přechod výplně do jednolitého materiálu bez buněk. [15], [18], [25], [26], [27]

Měření externích rozměrů a drsností povrchu u objektů vzniklých aditivní technologií je obtížné, a to především z důvodu složitých nepravidelných tvarů, charakteristického drsného povrchu, často se vyskytujících špatně přístupných míst a široké škály používaných materiálů, u nichž se vyskytují různé optické a povrchové vlastnosti a charakteristiky. Pro zkoumání případných defektů vyskytujících se těsně pod povrchem výrobku bude v budoucnu možné použít ultrazvuk, akustickou spektroskopii, nebo termografii, ale zatím jsou takovéto pokusy pouze součástí studií.

V některých případech je nutné použít metodu rentgenování, která nutně nemusí být příliš přesná a může být problém s opakovatelností měření, neb je také třeba správně zvolit metodu pro rozlišení hrany povrchu. V případě zvolení různých metod (uživatelé zvolené rozhraní, rozhraní, rozhraní definované normou ISO-50, či volení rozhraní na základě gradientu) vychází různé výsledky, může například dojít buď k odsazení povrchu získaného měřením od povrchu reálného, nebo ke zvětšení nerovností a defektů povrchu. Různé způsoby zpracování naměřených dat přináší různé výsledky a chyby měření. Z již výše zmiňovaného důvodu drsného povrchu bývá zvláště velký rozdíl mezi měřeními kontaktním a bezkontaktním. Tento fakt velmi komplikuje opakovatelnost měření a vůbec kontrolu dodržování tolerančních mezí. Povrchy vzniklé aditivními technologiemi většinou není třeba měřit nejpřesnějšími možnými systémy, neb bývají dále opracovávány konvenčními subtraktivními technologiemi za účelem dosažení potřebné kvality povrchu a přesného rozměru podle tolerančních polí. Na površích tištěných částí vniká tzv. otisk metody (případně otisk tiskárny), kdy vznikají defekty jako shluky prachových částic přichycených na při tisku natavený materiál nebo drobné trhliny vzniklé v důsledku tepelného namáhání. Počet defektů vzniklých na povrchu souvisí s metodou a se směrem a úhlem tištění. [15], [24]

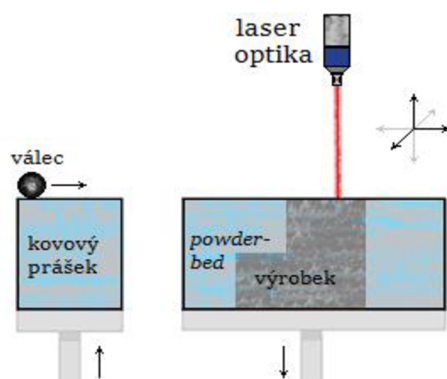
Byly provedeny studie, jejichž cílem bylo například zkoumání závislosti mechanických vlastností, jako je pevnost, elasticita a mez únavy, zkoumání vlivu použití různých typů výplní a v neposlední řadě i vliv povrchových úprav (kuličkování, broušení, opětované natavení povrchu) na vlastnosti vytištěné součásti. U popisu drsnosti povrchu je sice nejčastěji používaným parametrem R_a , ale podle studií by bylo vhodnější používat buď plošné drsnosti, nebo drsnosti s méně filtrovanými parametry, jako např. P_a , které lépe odlišují povrchy vytvořené kolmým paprskem od povrchů, u nichž byl paprsek skloněn. [11], [25], [26]

3.1 TECHNOLOGIE

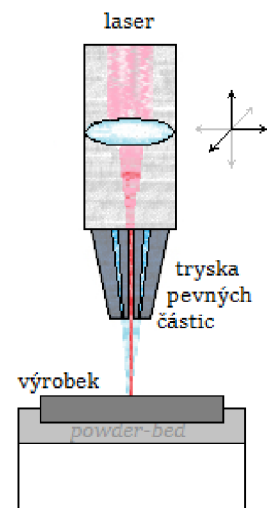
Dnes se aditivní technologie pracující s kovy dělí na tyto typy, použitelné pro tuto práci: PBF (DMLS a EBM), DED, metoda tryskání pojiva a laminování plátů.

PBF – tedy fúze práškového lůžka, anglicky *powder bed fusion* – spočívá v přesném tavení kovového prášku usměrněným proudem energie. Dříve bylo možné takto používat především práškové směsi kovů s nižší teplotou tavení (měď, cín, olovo atp. a jejich směsi), ale v devadesátých letech došlo k vývinu LPBF (nebo SLM – selective laser melting, tedy selektivní tavení laserem), tedy použití laseru. Tímto bylo umožněno použití technicky zajímavějších a lépe využitelných kovů.

DED – řízené ukládání energie, tedy anglicky *directed energy deposition* – spočívá v rozprašování kovového prášku do proudu energie, nyní nejčastěji do proudu paprsku laseru. Tato technologie nevyžaduje rovnou plochu pro slinování vrstev, proto je ideální pro použití při hybridní výrobě, tudíž například v případě, že by byla vyrobena kovaná koruna, by bylo možné na tuto korunu "dotisknout plášť" s chladicími a podpůrnými žebry.



Obr. 28 – schéma Powder Bed Fusion

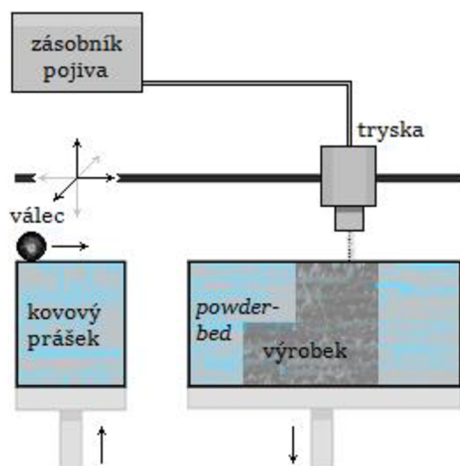


Obr. 29 – schéma DED
- Direct Energy Deposition

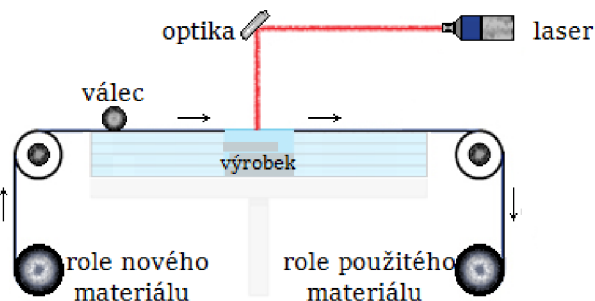
Laminování plátů – anglicky *sheet lamination* – je spojování plátů předem "vystřižených" do kýženého tvaru, s pláty pod nimi, většinou svařováním nebo, což je proces využívaný v poslední době, ultrazvukem. hranice plátů jsou poté opracovány a takto je vytvořen díl.

Tryskání pojiva – anglicky *binder jetting* – je výroba produktů spojením práškového materiálu tekutým pojivem a následným slinováním.

Zdroje použité v této kapitole: [10], [12], [14], [15], [16]



Obr. 30 – schéma tryskání pojiva



Obr. 31 – schéma laminování plátů

3.2 MATERIÁLY

Z podstaty samotné výroby částí 3D tiskem plyne, že chování materiálu je mírně anizotropické. Při samotném procesu výroby vzniká v materiálu napětí vyvolané teplotní roztažností. Součinitel teplotní roztažnosti se u jednotlivých kovů, vyjma wolframu a olova, příliš neliší. Zbytkové napětí v materiálu závisí na jeho modulu napětí, na teplotě a průběhu teploty okolí a také na materiálu a vlastnostech základové podložky. U některých částí dochází při nevhodném navržení a vytištění části k jejímu zdeformování po odebrání ze základové desky. Materiál vzniklý metodou přímého slinování kovového prášku laserem (DMLS – patří do skupiny PBF), vzniká tavením kovového prášku bez příměsi plastu či materiálů s nízkou teplotou tavení. Vysoké nároky na kvalitu materiálu brzdily vývoj aditivních technologií, ale s pokračujícím vývojem a novými možnostmi využití materiálů, došlo k umožnění výroby dílů s podstatně vylepšenými pevnostními vlastnostmi, a tedy k možnosti využití takovéto technologie pro výrobu sériových dílů, nikoli pouze k rychlé výrobě prototypů. Materiál vzniklý laserovým slinováním má vyšší porozitu než materiál vzniklý konvenčními metodami, ať již kováním či odléváním. Podle studie popsané ve článku *Study of Materials Produced by Powder Metallurgy Using Classical and Modern Additive Laser Technology*, nemá vyšší porozita materiálu díky převážně sférickému tvaru pórů, tedy menšímu počtu koncentrátorů napětí v materiálu, výraznější vliv na výsledky tahových zkoušek. Studie také popisuje, že materiály mají podobnou strukturu, ale v případě použití konvenčních metod se vyskytuje méně mikrotrhlin a ve výsledku je materiál homogennější. Z hlediska mechanických vlastností se materiály liší poměrně výrazně, byť nekonzistentně. V případě využití DMLS měl materiál větší tvrdost a pevnost v tahu, ale menší pevnost kluzu. Také jsou vlastnosti ovlivněny tím, jaký byl úhel sklonu ukládání materiálu vůči základové desce a materiál je mírně anizotropní. Anizotropie materiálu se dá využít tak, že se bude tisknout v takovém sklonu osy, aby vznikl výrobek s vyšší pevností ve směru, kde bude větší napětí, ale více se dá předpokládat snaha o snížení anizotropie tepelným zpracováním a obrobením hotové součásti po dokončení tisku. [16], [25], [26], [27], [29], [33]



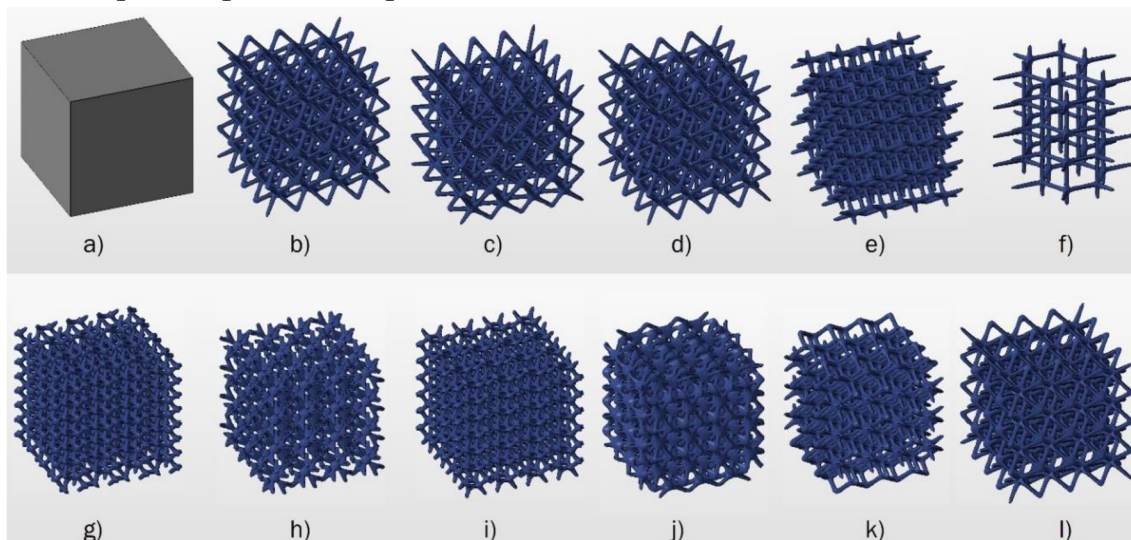
Obr. 32 – píst Porsche vyrobený aditivní technologií včetně obrobení [30]

Aditivní technologie pomáhají ve výrobě s úsporou materiálu, čímž se snižuje dopad na životní prostředí. Při dopadu laseru na kovový prášek, je část znehodnocena a odvedena z pracovního prostoru. Tento materiál se nedá pro výrobu použít a musí být speciálně způsobem recyklován, aby nesnižoval kvalitu materiálu z něj vyrobeného. Množství takto znehodnoceného materiálu je poměrně nízké, pohybuje se pod 0,5 % původního objemu. Při některých typech aditivních procesů musí mít vyráběné části podpory, které se se znehodnoceným práškem, dále recyklují pro další využití. [32]

Pro experimentální porovnání vlivu anizotropie materiálu na celkovou životnost by bylo ideální vyrobit několik prototypů, které by se od sebe lišily pouze úhlem, pod kterým by byly vrstvy materiálu ukládány. Je pravděpodobné, že by se výsledky mírně lišily. Anizotropie se snižuje rekrytalizací nebo různými typy tepelného zpracování.

3.3 MOŽNOSTI 3D TISKU

3D tisk kovových prášků může vytvářet nejen strukturální opory v podobě žebrování, ale i mřížkové struktury. Ideální mřížka pro využití pro 3D tisk má nízkou hmotnost, aby mohl celý motor být subtilnější konstrukce, velký povrch, který napomůže odvodu tepla ze spalovacího prostoru, a dobře odolává namáhání.



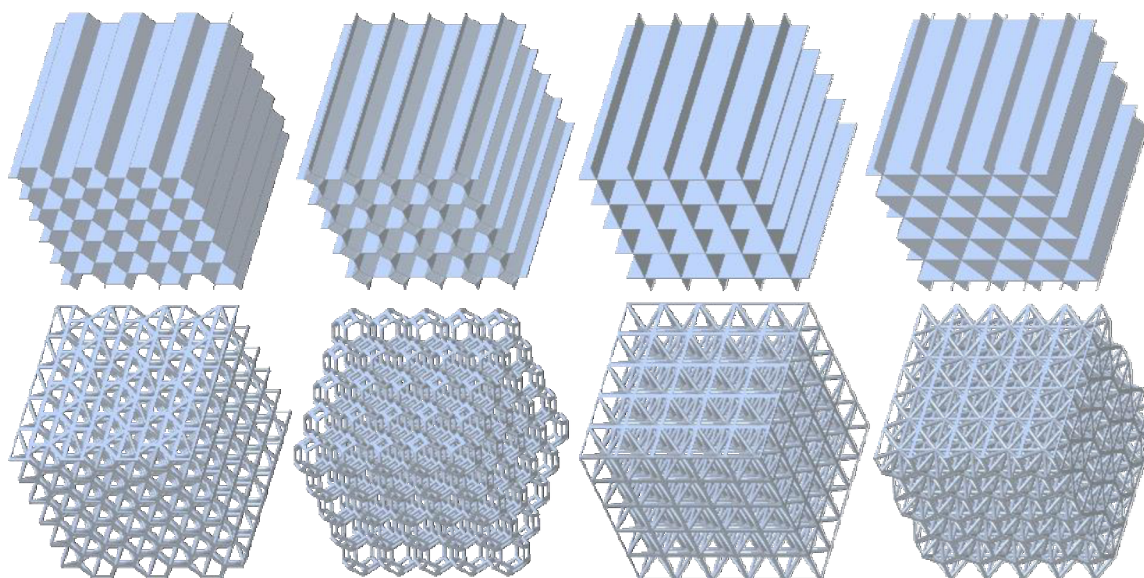
Obr. 33 – mřížkové struktury vytvořené v programu Autodesk NetFabb: a) původní krychle materiálu; b) X; c) W; d) star; e) soft box; f) hexa-grid; g) hexagon; h) octagon; i) hex profile; j) icosahedron; k) rhombic dodecahedron; l) tetra

Pro návrh a zpracovávání modelů, které využívají mřížkovou strukturu, existuje několik programů, které jsou více či méně uzpůsobené k tvorbě dílů pro aditivní technologie. Některé programy, jako například *Creo 4.0*, mají široké spektrum využití, ale jejich použitelnost pro specifické struktury je omezená. Naopak například program *NetFabb* od společnosti *Autodesk* je úzce zaměřen na tvorbu dílů obsahujících mřížkové struktury, ale není tak vhodný pro jiné účely. Přestože je *NetFabb* určen pro tvorbu struktur ke 3D tisku, nebyl užit, neb byl problém se zpracováním v jiných programech.

Tab. 2 - porovnání mřížek z programu NetFabb

100 x 100 mm cubes - different lattice types						
100x100mm		krychle	rhom. dod.	icosahedron	hex profile	soft box
identifikace		a)	j)	i)	h)	e)
Δ povrch	%	0	382	647,4	453,4	325,6
Δ hmota	%	0	86,6	71,3	87,6	89,6
100x100mm		star	W	hexagon	hexa-grid	X
identifikace		d)	c)	g)	f)	b)
Δ povrch	%	353	296,1	504,8	26,6	300,8
Δ hmota	%	88,2	89,9	85,9	97,5	90,8

Některé typy mřížek jsou pro využití pro tisk pístu méně vhodné. Mřížky, které mohou využít pro návrh pístu jsou mřížky, které umí tvořit program *Creo 4.0*, protože u programu *NetFabb* byl ve studentské verzi problém dostat mřížku použitelnou ke spojení s pevnou korunou a následným analýzám zatížení.

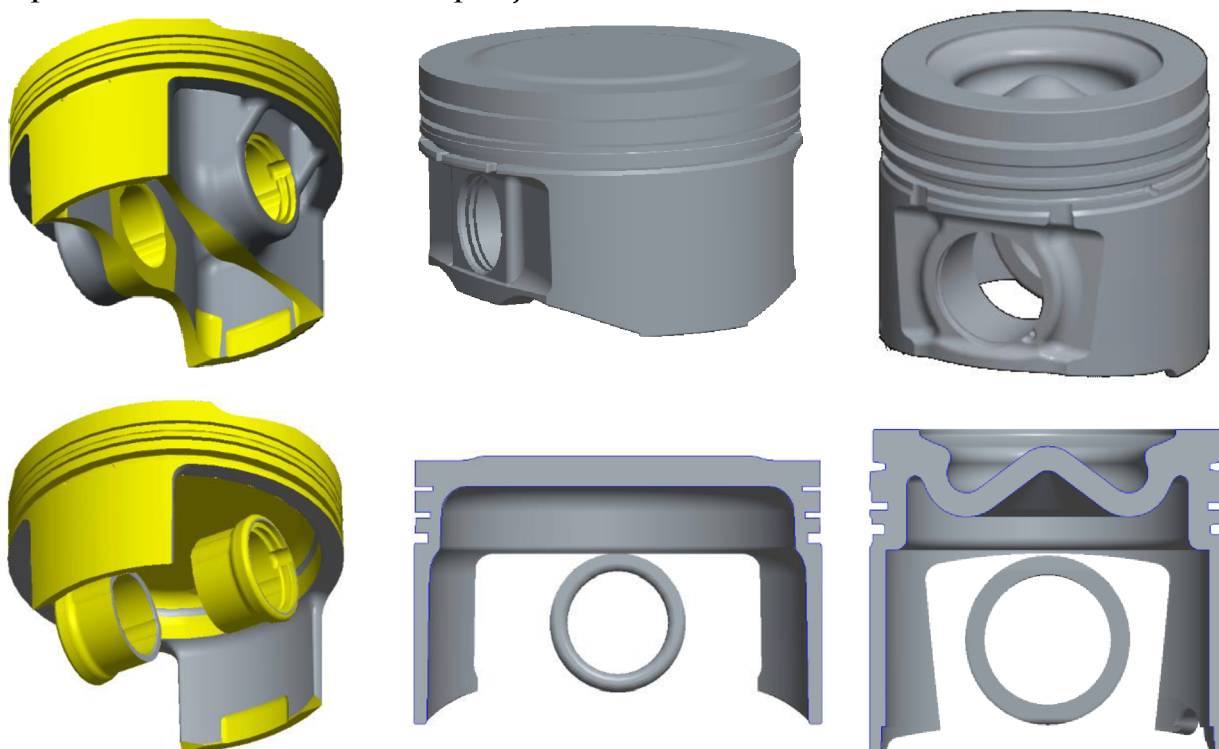


Obr. 34 – příklad mřížkových struktur vytvořených v programu *Creo 4.0*
Zleva: hexagon, oktagon, čtverec, trojúhelník. První řádek 2,5D, druhý řádek 3D.

V programu *Creo 4.0* lze vytvořit mřížky se základem čtvercovým, trojúhelníkovým, šestiúhelníkovým a osmiúhelníkovým. Mohou být různě zkosené či natočené. Dalším parametrem mřížek je v tomto programu to, zda jde o 3D mřížku, či o takzvané 2,5D mřížku. U 3D mřížek je možnost přidávat či ubírat jednotlivé paprsky. V porovnávací tabulce byly všechny paprsky navíc odstraněny, vždy zůstaly paprsky základní a vnější vertikální a horizontální. U 2,5dimenzionálních mřížek je také možné nadefinovat otvory pro průchod oleje, které zároveň při výrobě pomáhají s odvodem nevyužitého kovového prášku.

4 POROVNÁNÍ MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ U PÍSTŮ RŮZNÝCH TYPŮ MOTORŮ

Pro toto porovnání byly vybrány písty z motorů z vozidel různých tříd. Prvním zástupcem je motor ze sportovního vozidla se zážehovým motorem, u nějž je předpoklad že je navržen pro vysokou zátěž a dobré chlazení. Druhým zástupcem je píst z automobilu nižší třídy se zážehovým motorem, u nějž je předpoklad jednodušší konstrukce, levnější výroby a není kladen tak velký důraz na snížení hmotnosti a dobré chlazení, neboť u motoru není předpokládána tak vysoká zátěž jako u sportovního automobilu. Třetí píst je z motoru vznětového.



Obr. 35 - porovnání původních pístů s vytvořeným minimem – pouze nezbytné funkční plochy s minimální tloušťkou materiálu – zleva: sportovní zážehový motor, zážehový motor nižší třídy, výkonný vznětový motor

K porovnání efektivity rozložení hmoty, která netvoří funkční plochy, byly vytvořeny „písty“ vytvořené jenom spojením funkčních ploch o minimálních tloušťkách. Hmotnost takto vytvořených pístů byla porovnána s hmotností původních pístů před odlehčením, stejně byla porovnána původní plocha povrchu s plochou osekáných pístů. Efektivita rozložení je porovnání přidané hmoty versus přidané plochy povrchu u funkčních pístů oproti pístům složeným z funkčních ploch.

V dnešní době je pořizovací cena dostatečného množství 3D tiskáren pro velkosériovou výrobu příliš nákladná, pokud by mělo k jejímu využití dojít při výrobě motorů pro vozidla nižší třídy. Navíc u zážehového motoru nižší třídy je hmota rozložena tak, že s přidanou hmotou roste úměrně i plocha, skrze kterou může píst odvádět ze spalovacího prostoru teplo, tudíž by využití 3D tisku pro takovýto píst nebylo lukrativní.

U pístu vznětového motoru bylo naopak rozložení přidané hmoty poměrně nevhodné, přestože má původní píst chladicí kanál vyrobený pomocí zalití solného jádra, stejně je původní plocha menší nežli plocha minima vzniklého z funkčních ploch. V případě využití aditivních technologií by bylo možné v koruně vytvořit více kanálků, případně žebrování, tudíž by se výrazně zlepšilo chlazení pístu. Takovéto typy motoru se nedostávají do tak vysokých otáček jako motory zážehové, zde by bylo využití výhodné především z pohledu chlazení, neb u vznětových motorů je ve spalovacím prostoru vyšší teplota a využitím vícero kanálků by se tento problém dal dobře řešit. Vyšší počáteční náklady by ale mohly být problematické, navíc se již z důvodu vysokého tlaku ve spalovacím prostoru často využívá kovaných pístů, případně kovaných korun spojených s litými plášti. V takovémto případě by bylo vhodné využití DED k tvorbě hybridního pístu.

Kategorie, u které je cena nové technologie nejmenší problém, je zážehové motory sportovní/vyšší třídy. Navíc nejde o rychlou výrobu takového množství částí, proto by bylo jednodušší kontrolovat dosažené parametry a kvalitu. U drahých automobilů se dá předpokládat, že si zákazník připlatí za novou technologii, která přináší do vozu něco lepšího. Díky tomu, že se motory často pohybují v extrémně vysokých otáčkách, zde hraje úspora hmotnosti velkou roli. Možnost zlepšení chlazení a snížení hmotnosti pístu, čímž také dojde ke snížení celkové hmotnosti motoru, je u motorů sportovních automobilů výraznou motivací k využití aditivní výroby. Z tohoto důvodu byla tato kategorie vybrána jako nejvhodnější.

Tab. 3 - porovnání rozložení hmotnosti u tří pístů zástupců vybraných tříd

		Velikost povrchu		
		Sportovní zážehový motor	Zážehový motor nižší třídy	Výkonný vznětový motor
Původní	mm ²	45861	97448	60724
Minimum	mm ²	43027	61354	62854
Rozdíl	%	11,8%	37%	-3,5%
		Hmotnost		
		Sportovní zážehový motor	Zážehový motor nižší třídy	Výkonný vznětový motor
Původní	g	381	272	672
Minimum	g	227	171	448
Rozdíl	%	40,4%	37%	33,3%

Efektivita rozložení hmoty (poměr rozdílu hmotnosti vůči rozdílu ve velikosti povrchu) je u pístu sportovního zážehového motoru přibližně 29%, u zástupce zážehového motoru nižší třídy téměř 100% a u zástupce třídy vznětových motorů došlo přidáním materiálu dokonce ke snížení celkové plochy povrchu pístu, tudíž je efektivita negativní (přibližně -10,5%).

4.1 PÍST VYSOKOVÝKONNÉHO ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

Informační zdroje využité v této kapitole: [1], [4], [6], [28].

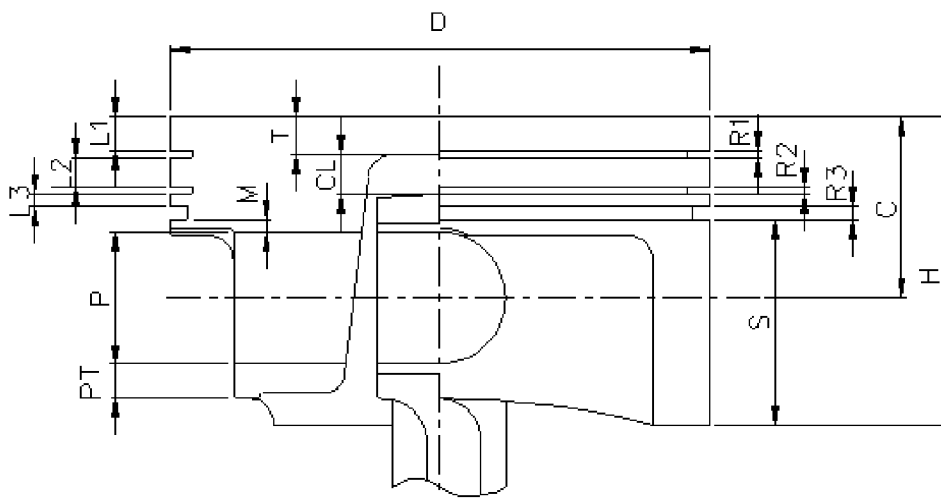
Píst navržen na základě pístu z motoru M838T, který je používán v McLarenu – a to v modelu MP4-12C, pro který byl původně navržen, a s úpravami v modelech 560S, P1 atp. V některých případech použití je zážehový motor spárován s motorem elektrickým. Jedná se o osmiválcový motor s objemem 3799cm³, dvojitým přeplňováním a výkonem 368–588 kW. Vrtání tohoto motoru je 93 mm, zdvih je 69,9 mm. Celkově pohonná jednotka váží necelých 200 kg. Tento motor byl vybrán proto, že jde o dobře navržený píst, který je dobrým reprezentantem, co se týče kategorie sportovních zážehových motorů s velkým výkonem. Motor byl navržen s cílem dosažení dobrého chlazení a vysoké odolnosti při zatížení. Firma *Ricardo plc* tento motor zkonstruovala a navrhla v průběhu pouhých 18 měsíců, ale s využitím aditivních technologií by bylo pravděpodobně možné i takto krátký proces návrhu a uvedení do výroby urychlit.

Při návrhu jsou kladeny tyto cíle:

- Dostatečná odolnost,
- Nízká hmotnost,
- Malá kompresní výška,
- Nízké tření.

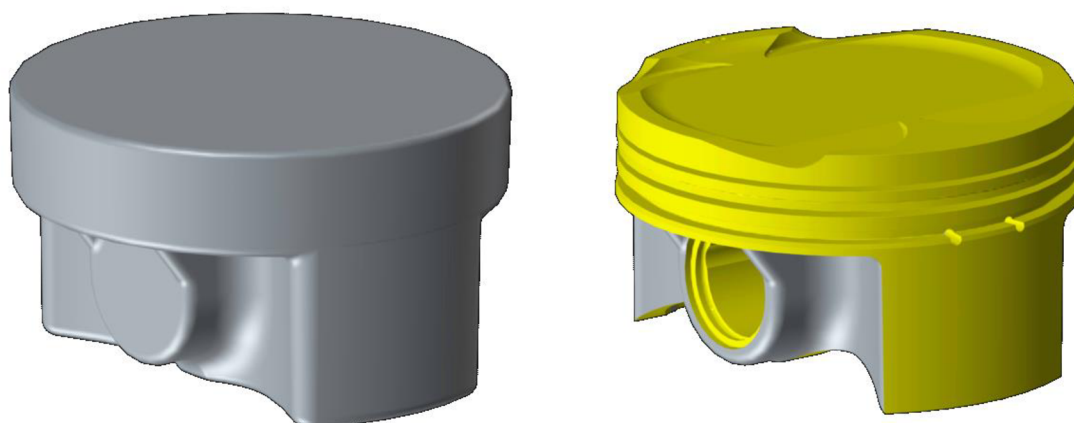
Tab. 4 - základní parametry konvenčního pístu

Parametr pístu	Značka	Rozměr [mm]	
Rozměry jednotlivých můstků a drážek v oblasti pro pístní kroužky	L ₁	5,5	parametry konzervativní, podle směrnice Ricardo plc
	R ₁	1,2	
	L ₂	4,2	
	R ₂	1,2	
	L ₃	2,8	
	R ₃	2	
Délka pláště	S	37	parametry poupravene podle referenčního pístu
Výška pístu	H	56	
Průměr otvoru pro pístní čep	P	23	
Kompresní výška	C	30	
Tloušťka dna	T	7	
Průměr pístu	D	93	
Výška pístu	H	52,45	
Průměr otvoru pro pístní čep	P	23	
Kompresní výška	C	34	
Délka pláště	S	33,45	
Výška oblasti pro pístní kroužky	L ₁ +L ₂ +L ₃ +R ₁ +R ₂ +R ₃	18	



Obr. 36 - základní parametry pístu zážehového motoru [4]

Rozměry vypočtené pomocí *Ricardo plc* směrnic jsou konzervativní, hodnoty jsou udávány pouze orientačně, tudíž byl model upravován podle referenčního pístu, u něž je ověřené, že i přesto, že má některé rozměry nižší, splňuje náročné požadavky na provoz. Píst byl navržen jako výkovek, z něž bylo při následném obrábění odstraněno přibližně 37% materiálu.

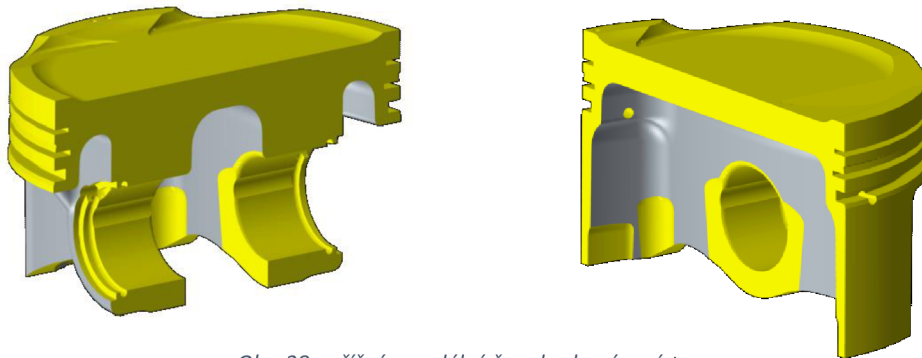


Obr. 37 - píst vyráběný konvenční metodou: vlevo výkovek, vpravo finální obrobek

Píst má tři drážky pro pístní kroužky, první dva těsnící, třetí kroužek je stírací. Ze drážky pro stírací pístní kroužek je olej odváděn vrtanými kanálky do vnitřního prostoru pístu. Chlazení je řešeno nástřikem mazacího oleje na dno pístu, přestože se jedná o píst dvojit přeplňovaného motoru, u kterého by bylo vhodné využít chlazení pomocí olejového kanálku.

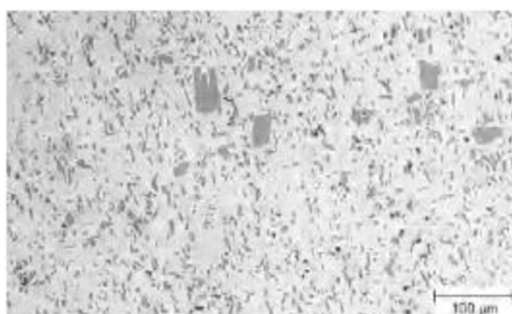
Vnější průměry pístu nejsou shodné u pláště a přechodu pláště do koruny, protože se budou při zatížení tyto rozměry nestatejně rozpínat v závislosti na teplotě a tímto se zamezí zadření motoru. Rozměry se pohybují mezi 92,25 v oblasti nejbližší koruně a 92,95 v oblasti pláště. Plášť se rozpíná nejméně, neb se jedná o menší vrstvu materiálu a není vystaven tak vysokým teplotám.

Vybrání pro ventily má na straně sacích ventilů průměr 38,4 mm a na straně výfukových ventilů má průměr 33,2 mm. Počet ventilů pro jeden píst je dva ventily sací a dva výfukové.



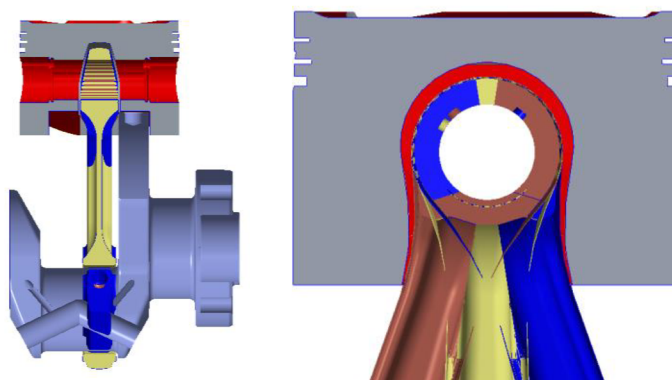
Obr. 38 - příčný a podélný řez obrobeným pístem

Výsledný píst je navržený jako výkovek z hliníkové slitiny MAHLE M124P. Jedná se o eutektickou slitinu, která je v posledních několika desetiletích nejčastěji používanou hliníkovou slitinou na výrobu pístů. Oproti odlévané slitině MAHLE M124 má větší pevnost a vyšší duktilitu. Tato slitina má dobré vlastnosti pro využití k výrobě vysoce namáhaného kovaného pístu. Materiál je po kování vystaven po určitou dobu teplotě zvýšené na, aby zestárlnul. Stárnutí musí být provedeno za předem definovaných podmínek, aby nedošlo k nežádoucímu nárůstu objemu tepelně ošetřované součásti.



Obr. 39 - mikrostruktura kované slitiny M124P [1]

Pro následnou optimalizaci byl vytvořen „píst“, který má stejný profil a dno jako píst původní, ale veškerý prostor, ve kterém by mohlo dojít k vytvoření nových struktur, aniž by docházelo ke kolizím s ojnicí v krajních polohách, čepem nebo klikovou hřídelí v dolní úvrati, byl ke stávajícímu pístu přidán coby materiál vhodný k optimalizaci,



Obr. 40 - obálka pístu

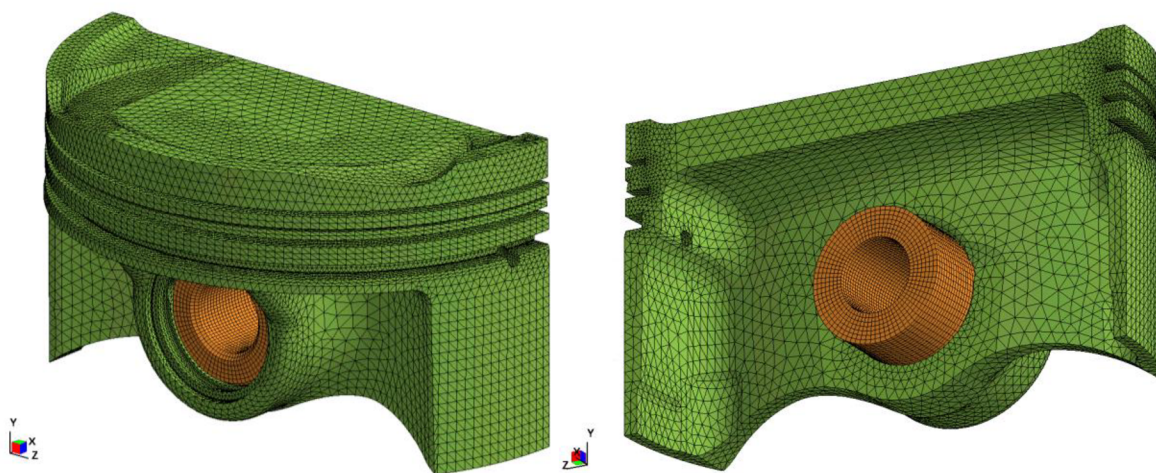
například s využitím mřížkových struktur. Tato obálka byla vytvořena spojením nezbytných funkčních ploch s výplní pevným materiálem. Z tohoto spojení poté byl oříznut prostor, který zabírá čep, ojnice v krajních polohách, a kliková hřídel v dolní úvrati. U všech odebraných objemů byla přidána tolerance o tloušťce 1-3 mm (největší mezi ojnicí a vnitřní straně dna pístu).

4.1.1 SÍŤOVÁNÍ MODELU

K diskretizaci a přípravě modelu byl využit program Altair® HyperWorks® ve verzích 2017, 2018 a 2020. K vytvoření sítě byl využit program HyperMesh™ ©.

V tomto programu lze vytvořit kvalitní 3D síť, která je místech, kde jsou na modelu důležité detaily malých rozměrů, jako zkosení, nebo radius, zjemněná. Před síťováním byla odstraněna některá zkosení a povrchy byly rozděleny do setů. Pro síťování je vhodné mít i na drobných detailech alespoň dva elementy i přes nejmenší rozměr. Pro vytvoření 2D sítě byly využity prvky typu tria druhého řádu. U všech byl zkontrolován jakobián a nejmenší úhel, aby následně vygenerovaná 3D síť měla prvky v dobré kvalitě. Kvůli nutnému zjemnění na drobných detailech se velikost prvků pohybuje od 0,125mm do 3,5mm. U ploch, které jsou geometricky jednodušší a není na nich předpoklad vysokého zatížení či teplotního namáčení, byly prvky ponechány větší, aby došlo ke zkrácení doby potřebné na výpočet.

3D prvky se pohybují přibližně od 50μm do 5mm. Každá stěna musí mít přes tloušťku alespoň dva prvky, kvůli přesnosti výpočtu. Celkový počet prvků je pro model poloviny pístu lehce přes 730 tisíc, počet uzlů je něco přes jeden milion.



Obr. 41 - 3D síť vytvořená v programu HyperMesh™ ©

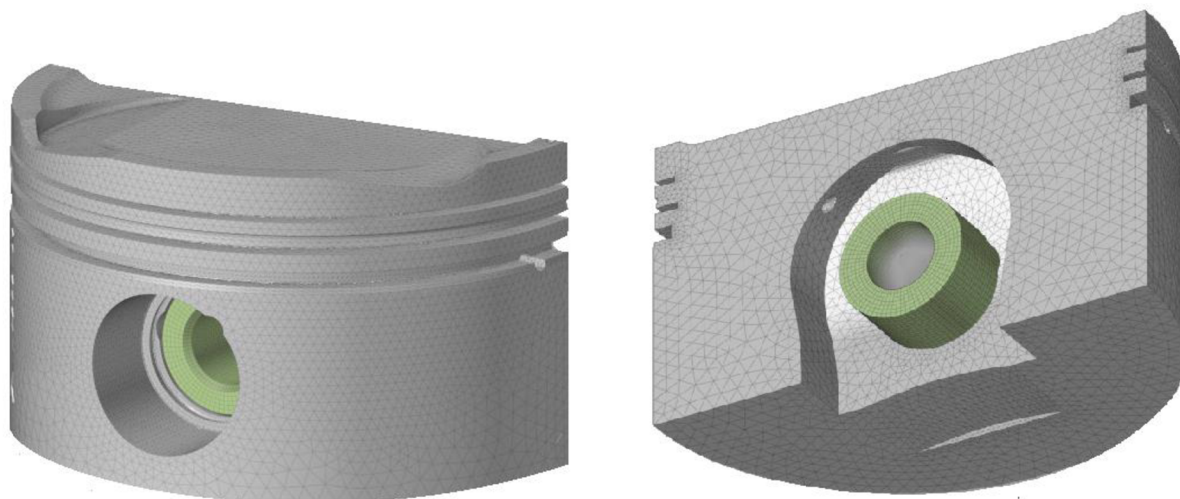
Dále byl také diskretizován pístní čep, u něž není třeba zvýšené přesnosti pro výpočet, tudíž byla použita jednodušší síť. Síť byla vytvořena rotováním 2D sítě poloviny řezu, pouze kvůli kontaktu s nálitkem pro čep bylo třeba, aby měly elementy na čepu a na pístu podobnou velikost.

Diskretizace obálky pístu probíhala obdobným způsobem. Před síťováním byly opět odstraněny některé detaily jako zkosení a některé povrchy byly sloučeny. Poté byly povrchy opět rozděleny do setů, aby byly vysíťovány podobně hrubými prvky. Opět byly zkontrolovány parametry jako minimální úhel a jakobián. Při kontrole 3D sítě byly prvky, které měly zjištěn nevyhovující jakobián, upraveny posunutím prostředních uzlů.

Minimální velikost elementů je v této vytvořené diskretizaci asi $55\mu\text{m}$, maximální délka hrany elementu je přibližně $4,25\text{mm}$. Prvky jsou – krom síťování malých rádiusů a zkosení – menší nežli u předchozí diskretizace. Elementy byly u obálky tvořeny tak, aby byl rovnoměrnější a aby ve spodní části nebyly elementy příliš hrubé, což by později stěžovalo získávání početních výsledků z optimalizací. Jemnější a menší elementy při optimalizaci lépe vykreslí, kde je třeba materiál zachovat a kde je možné jej odebrat, či nahradit mřížkovou strukturou. Celkový počet elementů je cirká 802 tisíc a celkový počet uzlů je přibližně 1,1 milionu.

V případě pístu i obálky je plošné síťování provedeno pomocí prvků tria6 (CTRIA6) a síťování objemové je provedeno prvky tetra10 (CTETRA). Čep byl plošně síťován na polovině řezu prvky quad4 (CQUAD4) a na zkosení byl vždy použit prvek tria3 (CTRIA3). Objemová síť čepu je tvořena prvky penta6 (CPENTA) na zkoseních a hex8 (CHEXA) ve zbytku objemu.

Čep se skládá z přibližně 18 tisíc objemových prvků.

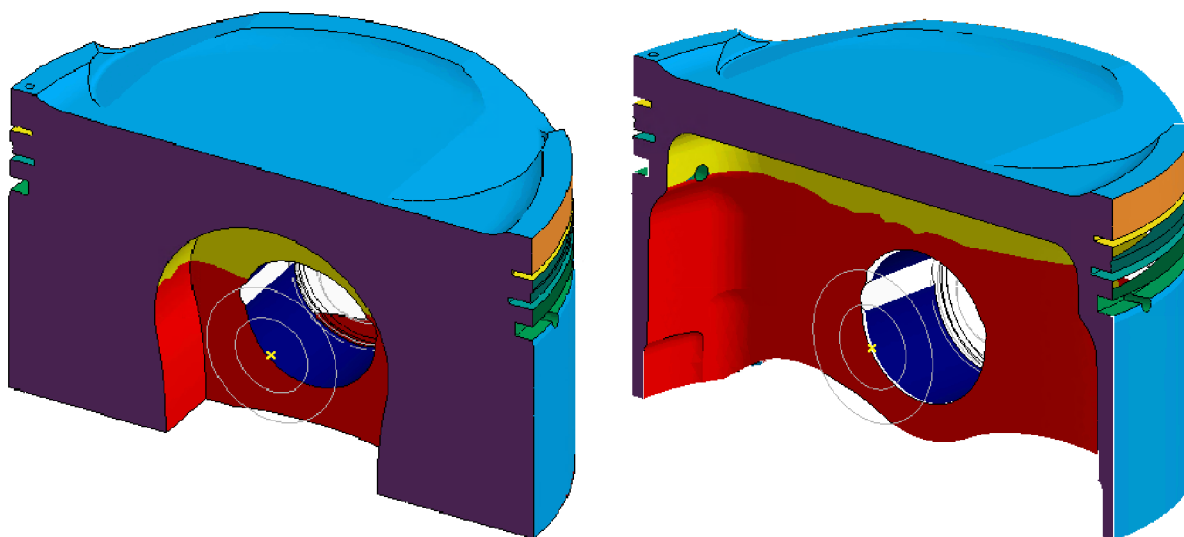


Obr. 42 - 3D síť vytvořená v programu HyperMesh™ ©

Model byl z důvodu úspory výpočtového času a docílení symetrického výsledku tvořen pouze poloviční. Symetrie bylo v analýzách docíleno pomocí okrajových podmínek, tudíž by nemělo dojít k nechtěnému ovlivnění výsledků.

4.2 TERMÁLNÍ ANALÝZA

Termální analýza byla provedena pomocí programu FEARCE (Ricardo Software). V tomto programu byl povrch pístu opět rozdělen na sety, přes které poté bude analýza definována. K definování je třeba pro každý set mít dvě hodnoty – teplotu, která na tento set působí, a koeficient přestupu tepla.



Obr. 43 - ukázka rozdělení modelů na sety – porovnání mezi obálkou (vlevo) a původním pístem (vpravo)

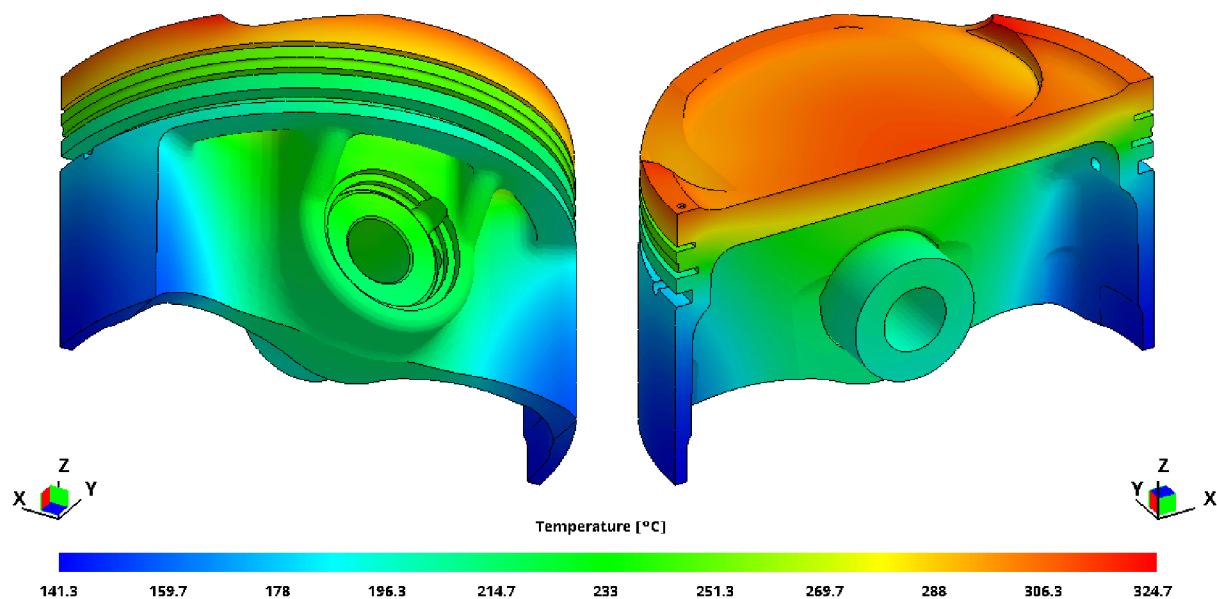
Tab. 5 - koeficienty přestupu tepla pro jednotlivé povrchy [28]

Plocha	Teplota [°C]	h_{ef} [W/m ² K]
Dno pístu	1007	955
Drážka pro 1. pístní kroužek	236	5470
Drážka pro 2. pístní kroužek	210	4900
Drážka pro 3. pístní kroužek	175	8500
Plášť - vložka válce	100	1200
Plášť - olej	90	297,5
Dno pístu - olej	83	2740

Část tepla z pístu také odchází přes kontakt s pístním čepem a dále do ojnice. Teplotní vodivost materiálu M124P je 155W/m·K (kolem teploty 300°C je vodivost kolem 165W/m·K, velmi pozvolně roste v závislosti na teplotě). [1] Teplotní vodivost materiálu pístního čepu je 45W/ m·K. [28]

Symetrie bylo dosaženo použitím vazby *symmetry*. Vazba mezi čepem a pístem je typu *thermal contact* s definovaným přestupem tepla.

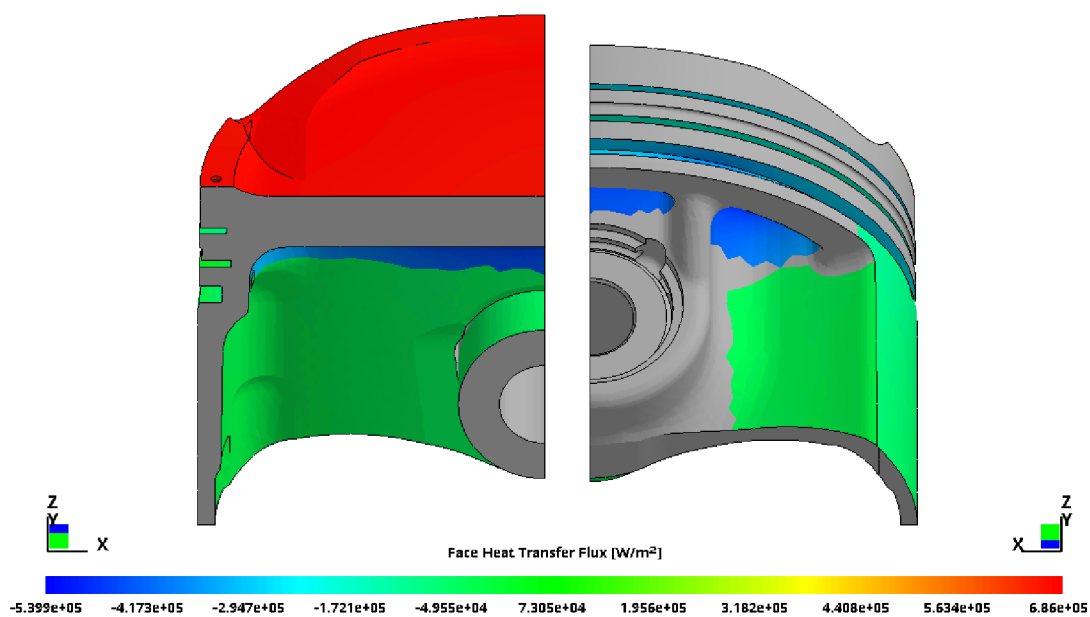
Z takto definované termální analýzy vyšlo, že se teplota pístu pohybuje mezi cca 141°C a 325°C.



Obr. 44 - rozložení teplot na pístu

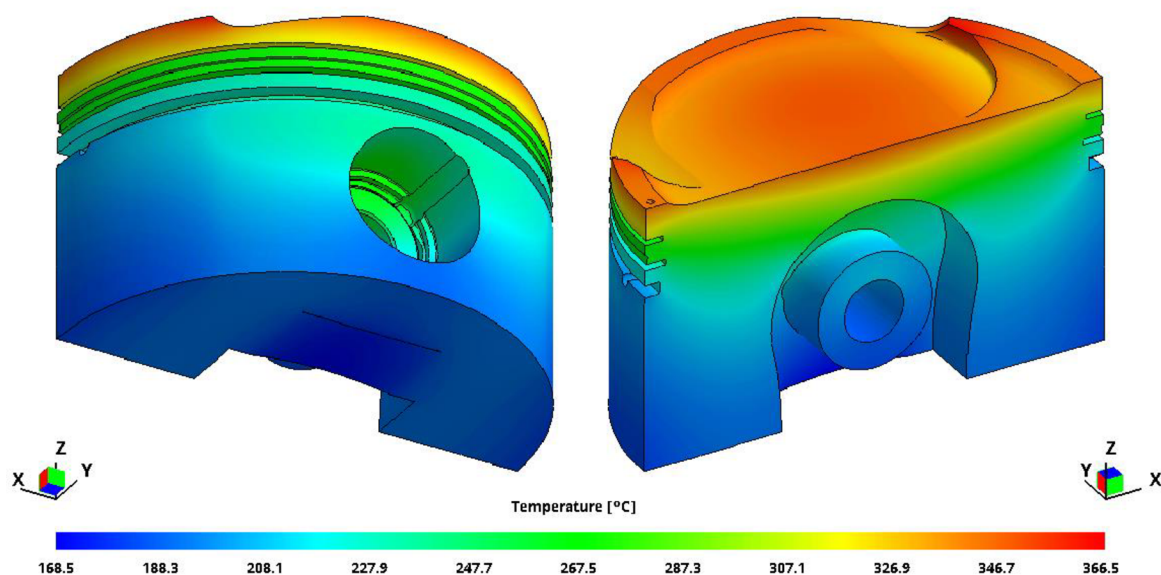
Tab. 6 - tepelné toky skrz vybrané plochy

Plocha	Tepelný tok [W/m ²]
Dno pístu	6,5-6,9·10 ⁵
Drážka pro 1. pístní kroužek	6-30·10 ⁴
Drážka pro 2. pístní kroužek	3-20·10 ⁴
Drážka pro 3. pístní kroužek	2-37·10 ⁴
Plášť - vložka válce	5-12·10 ⁴
Plášť - olej	1,5-4,5·10 ⁴
Dno pístu - olej	28-54·10 ⁴



Obr. 45 – tepelné toky vybranými plochami

Tyto koeficienty a teploty byly použity i pro přibližnou termální analýzu obálky.

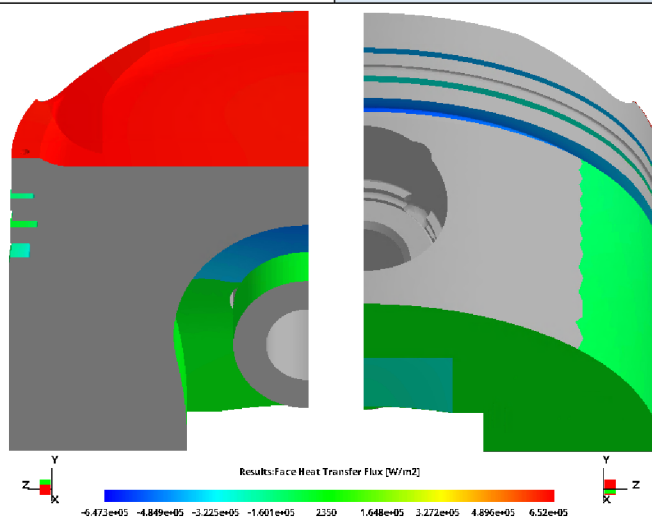


Obr. 46 - termální analýza obálky pístu z programu FEARCE (Ricardo software)

Z provedených termálních analýz je vidět, že tento 750 g vážící obálka má o necelých 42°C vyšší maximální teplotu vlivem horšího chlazení, vliv mělo i to, že pro jeho analýzu byl použit jiný materiál než pro píst původní (místo materiálu MAHLE M124P byly použity hodnoty pro tiskový AlSi10Mg). [35],[36]

Tab. 7 - tepelné toky skrz vybrané plochy

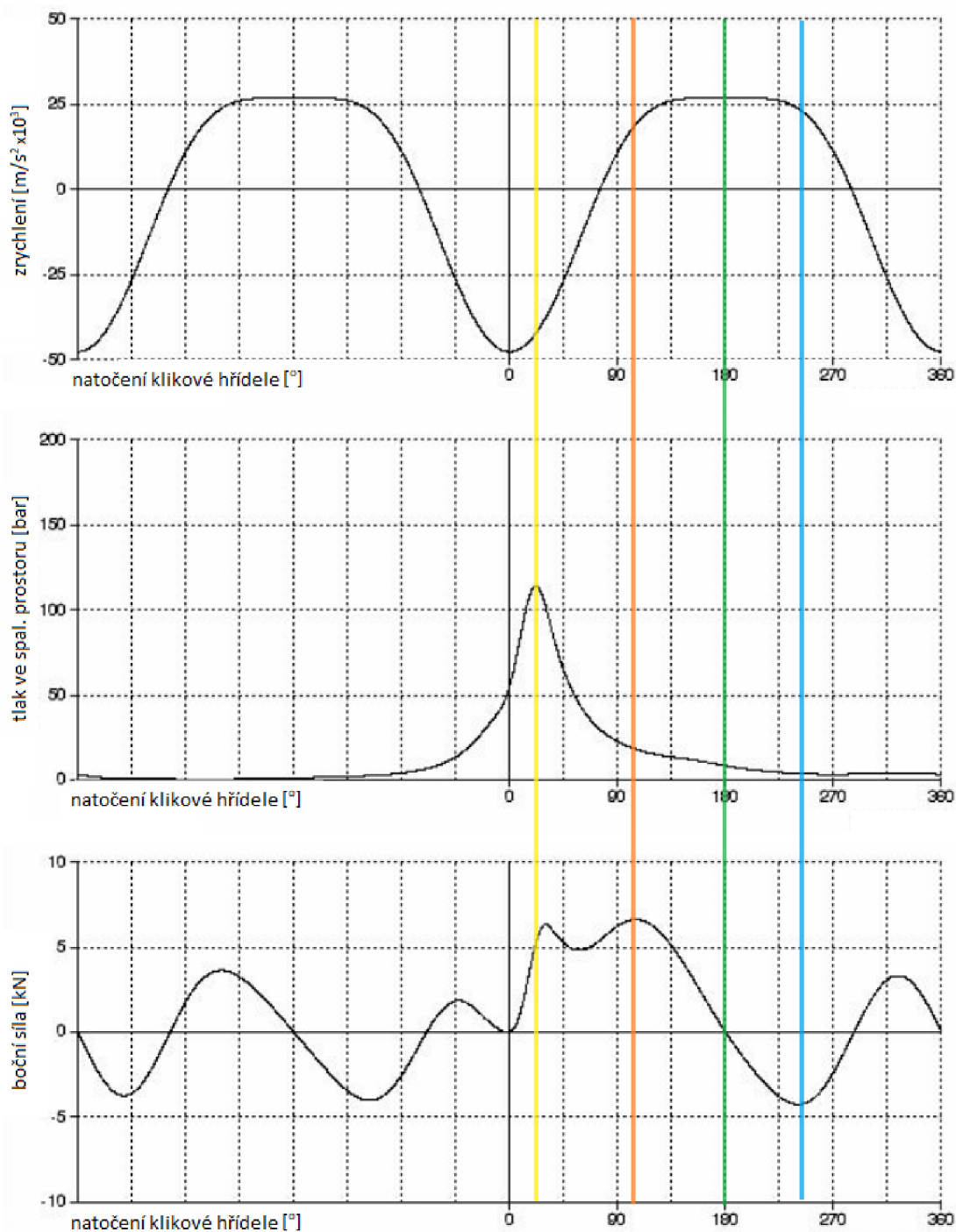
Plocha	Tepelný tok [W/m ²]
Dno pístu	6,1-6,5·10 ⁵
Drážka pro 1. pístní kroužek	1,5-4,6·10 ⁵
Drážka pro 2. pístní kroužek	0,6-3·10 ⁴
Drážka pro 3. pístní kroužek	1,9-6,5·10 ⁵
Plášť - vložka válce	1-1,4·10 ⁵
Plášť - olej	2,3-4·10 ⁴
Dno pístu - olej	2,3-5,6·10 ⁵



Obr. 47 - tepelné toky vybranými plochami

4.3 STRUKTURÁLNÍ ANALÝZA

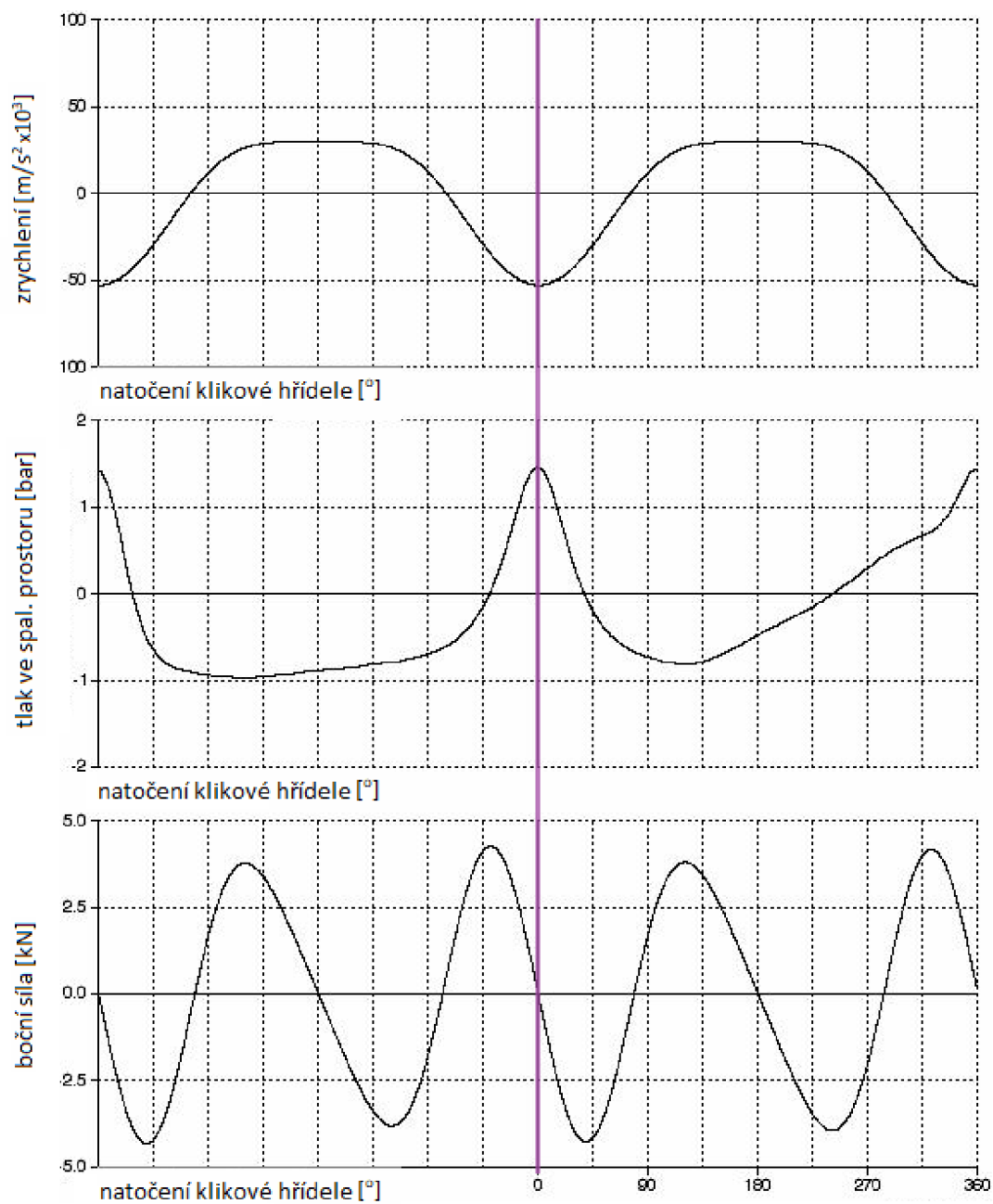
Model pro strukturální analýzu byl stejně jako termální analýza vytvořen v programu FEARCE. Do modelu byly načteny výsledky termální analýzy coby teplotní zatížení. Dále byla do modelu vložena zatížení spočítaná v programu ENGDYN (Ricardo Software). Zatížení byla spočtena pro motor MP4-12C, v němž byl použit referenční píst. Zátěžové stavy byly vzaty pro nejvyšší hodnoty jednotlivých složek sil působících na píst při maximálních otáčkách motoru a jeden zátěžový stav byl vzat pro překročení maximálních otáček bez zatížení.



Obr. 48 – průběh zrychlení, tlaku ve spalovacím prostoru a boční síly v závislosti na natočení klikové hřídele z programu ENGDYN (9 500 ot/min)

Tab. 8 – zátěžné stavy

Natočení KH	Zrychlení	Tlak ve SP	Boční síla	Otáčky
°	$m/s^2 \times 10^3$	bar	N	min^{-1}
0	-53	1,46	0	10000
22	-42	120	5,2	9500
105	19	18	6,6	9500
180	24	15	0	9500
241	23,5	4	-4,2	9500



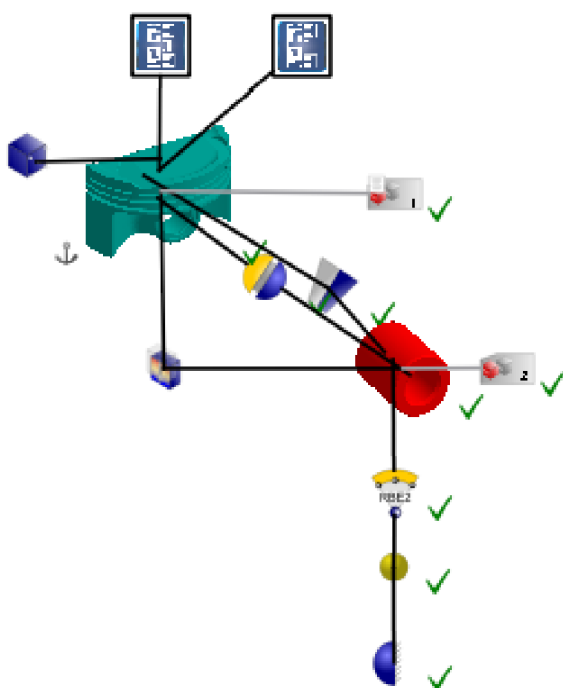
Obr. 49 - průběh zrychlení, tlaku ve spalovacím prostoru a boční síly v závislosti na natočení klikové hřídele z programu ENGDYN (10 000 ot/min)

V programu FEARCE byl tedy vytvořen model, který se sestával z diskretizovaného modelu pístu, čepu, importovaných zatížení vypočtených v programu ENGDYN, importovaných výsledků termální analýzy, vazby symetrie vložené na rovinu řezu pístu a čepu, vazba mezi pístem a čepem (kontakt s vůlí) na ploše jejich kontaktu, pevný bod ve středu čepu, k němuž byl čep vázán pevnou vazbou RIGID COUPLING (NODE-FACE). Tato vazba provázala pevně středový bod s vnitřní plochou čepu, jež koresponduje s vnější plochou, na které má čep kontakt s ojnicí. Také byl modelům pístu a čepu přiřazen soubor s materiálovými vlastnostmi.

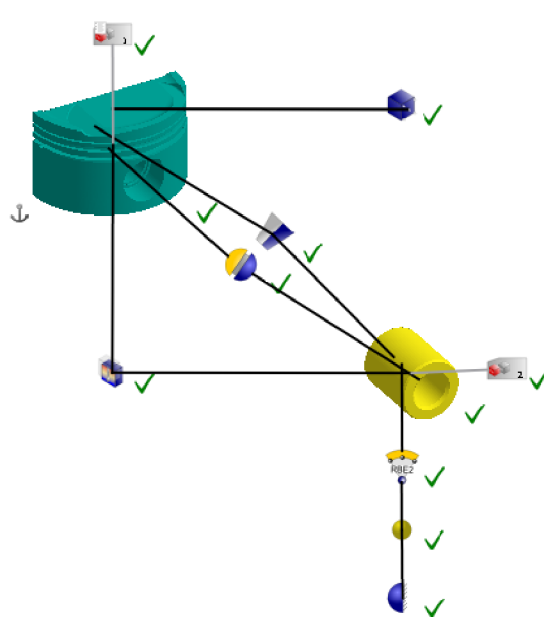
Takto vytvořený model byl exportován pro výpočet v programu *Abaqus*.

Pro optimalizaci obálky pístu byl v programu FEARCE vytvořen model, který se sestával z diskretizovaného modelu obálky, čepu, importovaných výsledků termální analýzy, vazby symetrie položené do roviny řezu obálky a čepu, vazba mezi pístem a čepem na jejich kontaktu, pevný bod ve středu čepu, k němuž byl čep vázán pevnou vazbou RIGID COUPLING (NODE-FACE). Také byl modelům pístu a čepu přiřazen soubor s materiálovými vlastnostmi, tentokrát byl materiál pro obálku s hodnotami pro tištěný AlSi10Mg namísto původního MAHLE M124P.

Po exportu pro optimalizaci v programu Optistruct byl v textovém editoru vytvořen soubor se zatížením, který bylo nutné s takto exportovaným modelem propojit mimo program FEARCE, neb se neshodují rozměry a hmotnosti těchto dvou částí. Bylo využito namáhání, které působí na původní píst proto, aby vyšlo najevo, kde je možné materiál odebrat, či případně lépe rozložit tak, aby došlo k navýšení pevnosti výsledného pístu.



Obr. 50 - schéma modelu v programu FEARCE před exportem pro řešení v programu Abaqus



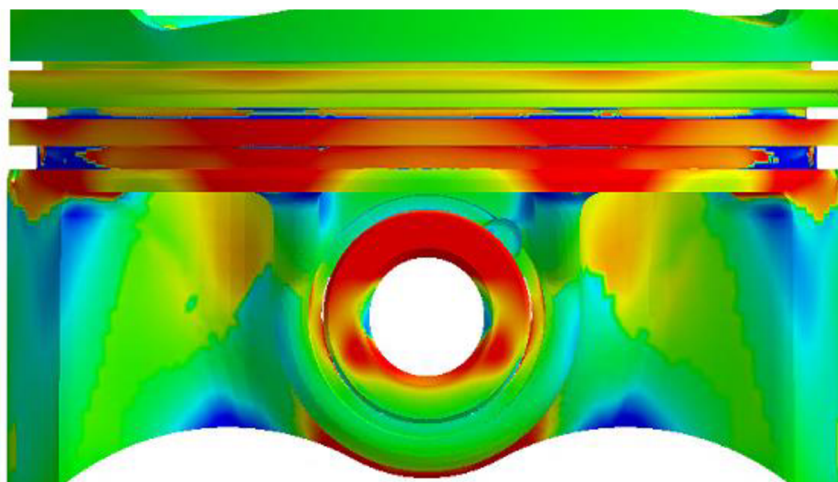
Obr. 51 - schéma modelu v programu FEARCE před exportem pro optimalizaci v programu Optistruct

Výsledky výpočtu namáhání pístu jsou zapsány v následující tabulce a zobrazeny v následujících obrázcích.

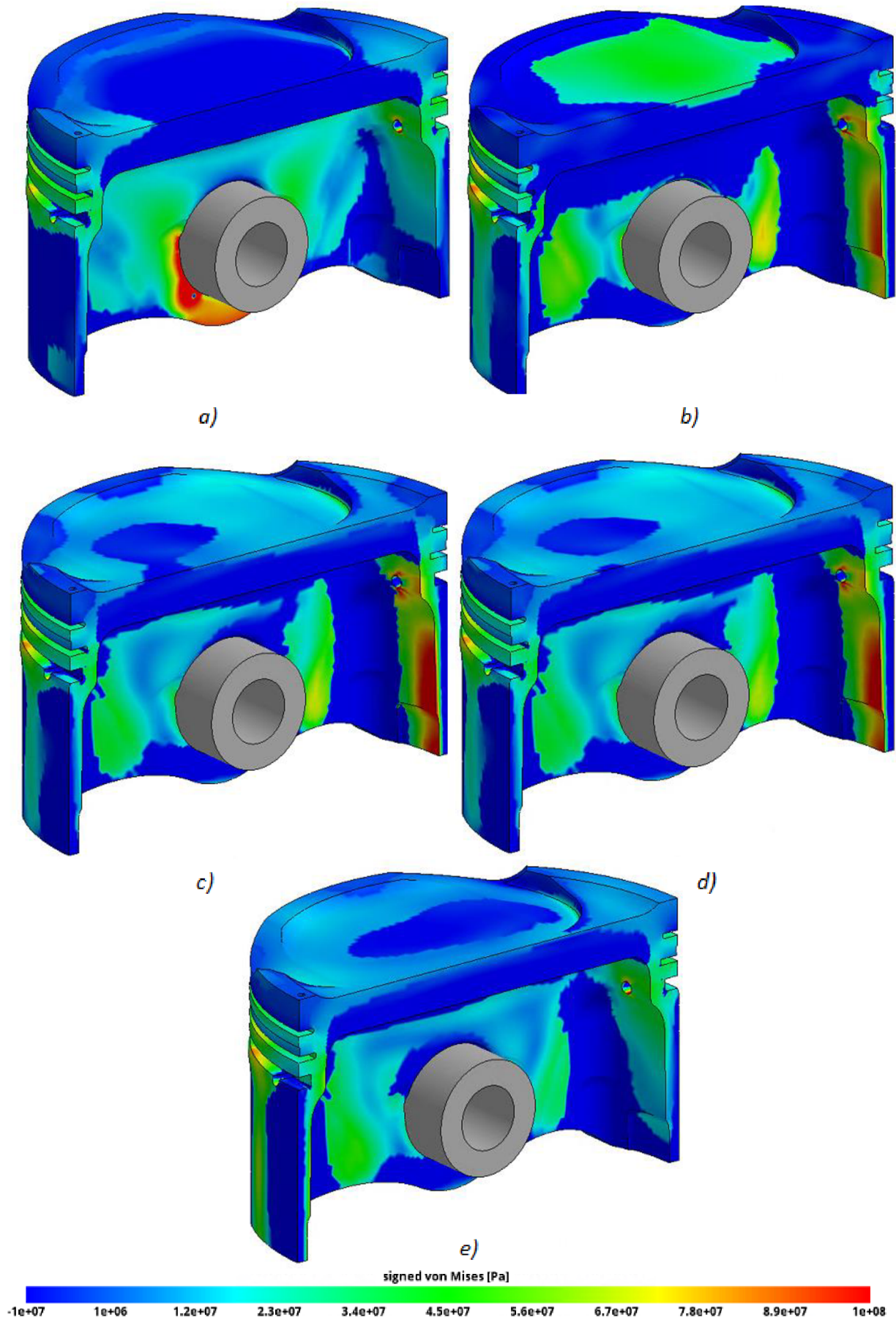
Tab. 9 - napětí a deformace původního pístu

Zátěžný stav		Napětí (Signed Von Mises) [MPa]		Deformace [m]	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1	Přetočení otáček	-344	208	$1,2 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-4}$
2	Maximální tlak	-293	175	$2,7 \times 10^{-5}$	3×10^{-4}
3	Max. boční síla	-210	180	$3,3 \times 10^{-5}$	3×10^{-4}
4	Max. zrychlení	-210	173	$3,3 \times 10^{-5}$	3×10^{-4}
5	Min. boční síla	-176	141	$3,8 \times 10^{-5}$	3×10^{-4}

Z výsledků je vidět, že zatížení na straně sacích ventilů a na straně sacích ventilů se liší, teoreticky bude jedna stěna spojující nálietek pro pístní čep s pláštěm pístu méně namáhána. Z tohoto důvodu by se dalo v této oblasti využít asymetrického designu s větším množstvím materiálu na straně, kde dochází k přenosu maximální boční síly. Při zobrazení byly skryty hodnoty pro čep, neb ty byly vždy výrazně ovlivněny okrajovými podmínkami. Pro ilustraci na obrázku 52 je napětí pro pít i čep, přičemž minimální napětí je stejné, jako v tabulce 9, ale maximální napětí v bodě zamezení pohybu bylo přibližně 3,6GPa.

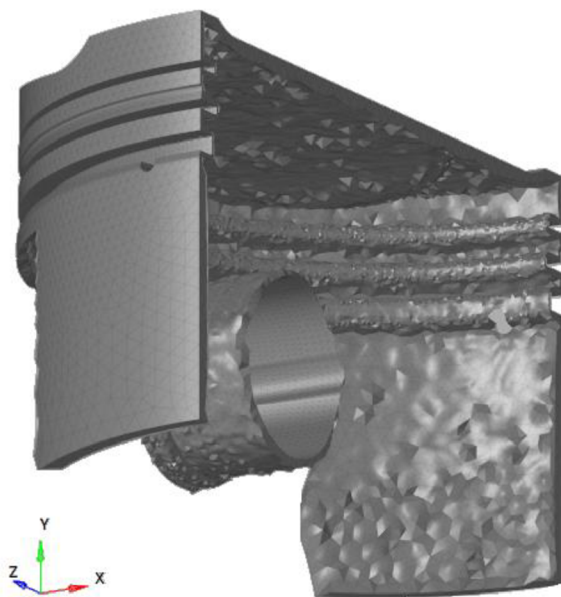


Obr. 52 - zkrslení výsledku při zobrazení napětí na model včetně čepu (zátěžový stav 1)

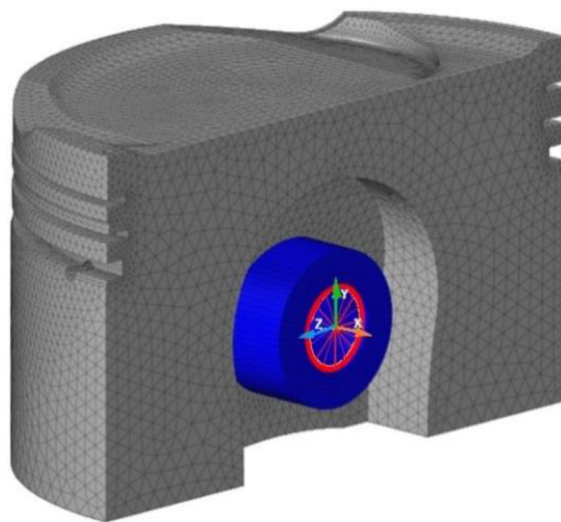


Obr. 53 - napětí a deformace pro a) první, b) druhý, c) třetí, d) čtvrtý a e) pátý zátěžový stav (deformace vždy v měřítku)

Exportovaný a zatížený model byl poté otevřen v programu Altair® HyperMesh™, tentokrát s uživatelským prostředím programu Optistruct. Zde byly definovány podmínky pro následnou optimalizaci. Byla vybrána optimalizace TOPOLOGY s hlavním cílem snížení hmotnosti, přičemž byl kladen stejný důraz na všechny zátěžné stavy (viz Tab. 8). Před samotnou optimalizací také bylo v programu potřeba určit v modelu obálky elementy, které při optimalizaci není možné odebrat, neb se jedná o nezbytné funkční plochy.



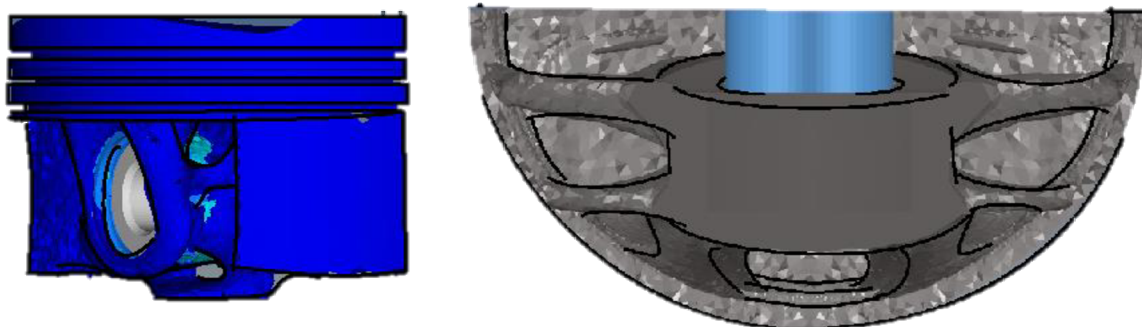
Obr. 54 – elementy označené za neměnný materiál



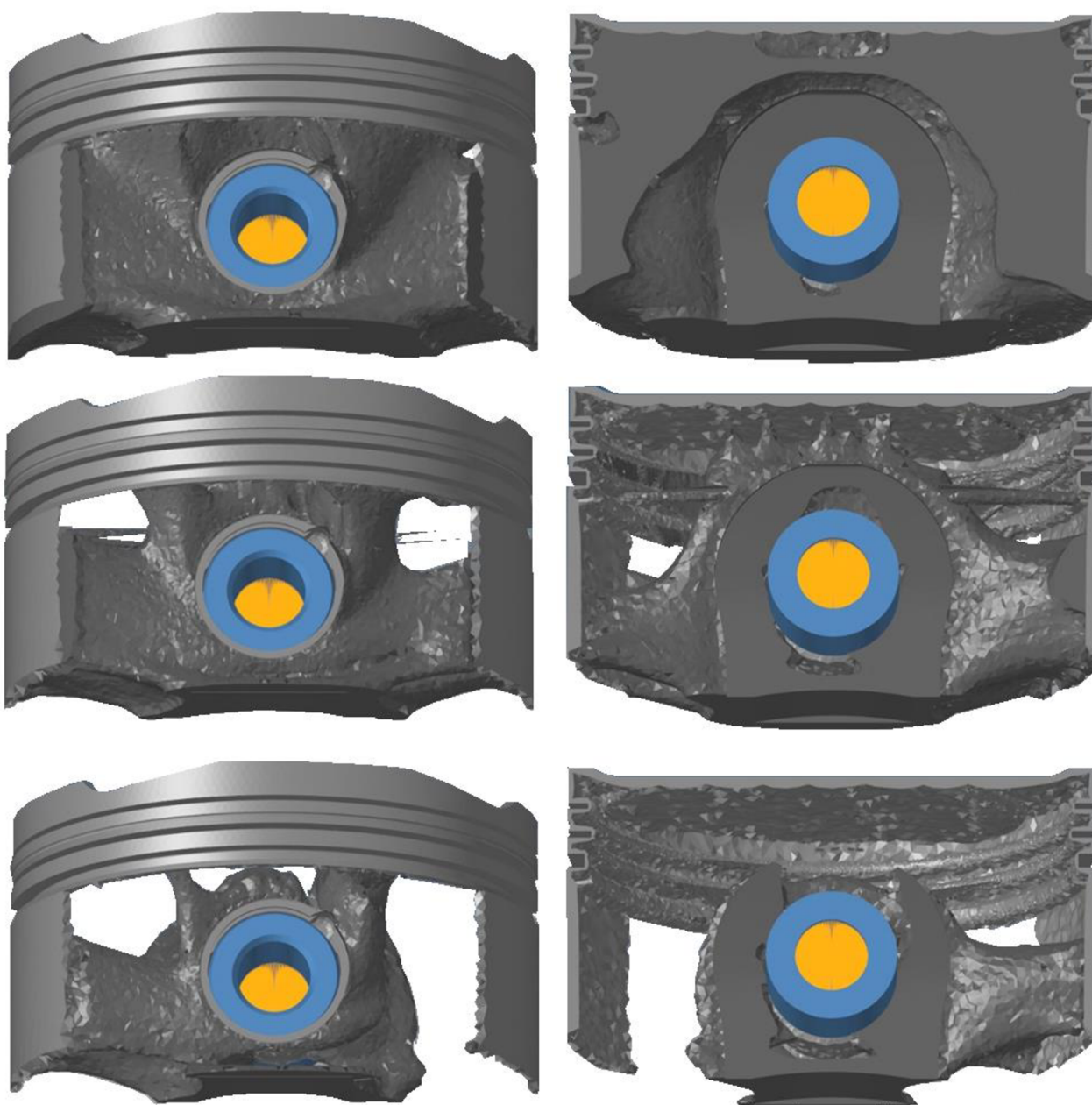
Obr. 55 - píšť k optimalizaci v programu Optistruct

Program Optistruct má možnost získat coby výsledek optimalizace tzv. hustotu prvku, která značí, jak moc je procentuálně element zatížený oproti ostatním.

Výsledkem bylo také rozložení napětí a deformace obálky pro všech pět zátěžových stavů, vždy byly zobrazovány pouze komponenty obálky jako takové, neb čep byl opět – stejně jako u analýzy konvenčně vyrobeného píšť – výrazně ovlivněn okrajovými podmínkami. Prvky tvořící funkční plochy byly z optimalizace vynechány.



Obr. 56 - náčrt optimalizovaných tvarů pomocí zobrazení elementů s určitou hustotou



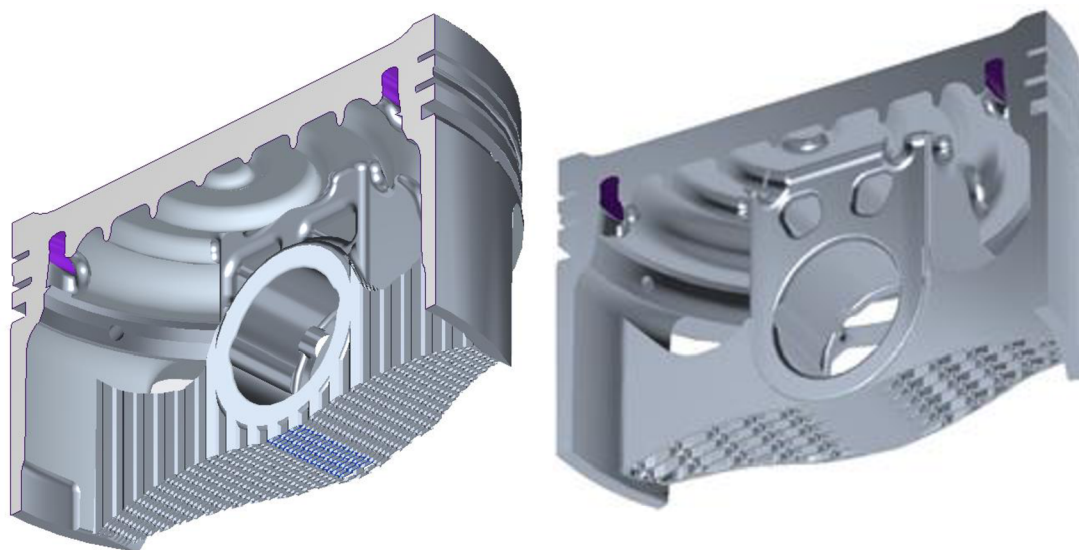
Obr. 57 - výsledek optimalizace obálky pístu – hustoty elementů

Na obrázku 57 je vidět, jak se měnilo rozložení a množství elementů podle zvolené hustoty, nad kterou se mají elementy zobrazovat. Z takto získaných tvarů byl interpretován základní tvar pro následné navržení pístu, který by mohl lépe využít výhod aditivní výroby a nemusel se omezovat designovými omezeními konvenční výroby s použitím subtraktivního obrábění. Částečně byl tento výsledek ovlivněn vrtnými drážkami pro odvod oleje, jejichž tvar a umístění mělo být z materiálu pro optimalizaci pravděpodobně vynecháno. Při návrzích nového tvaru pístu byly zohledněny krom výsledků optimalizace i směrnice pro návrh pístu společnosti *Ricardo plc*. Zachovány byly především doporučené minimální tloušťky dna pístu a pláště pístu.

4.4 PÍST PŘIZPŮSOBENÝ PRO 3D TISK

Díky volnosti, kterou nabízí aditivní technologie, je možné využít výrazněji členěné stěny pístu, které propojují nálietek pro pístní čep s pláštěm. Zároveň je také možné navrhnout žebrování dna pístu, případně u motorů, u kterých to dává smysl, využít chlazení pomocí jednoho či více chladicích kanálků. Pro píst vysokovýkonného zážehového motoru se běžně chlazení pomocí olejového kanálku nevyužívá, ale pro účel této práce byl tento prvek využit, pro zdůraznění výhod využití aditivních technologií.

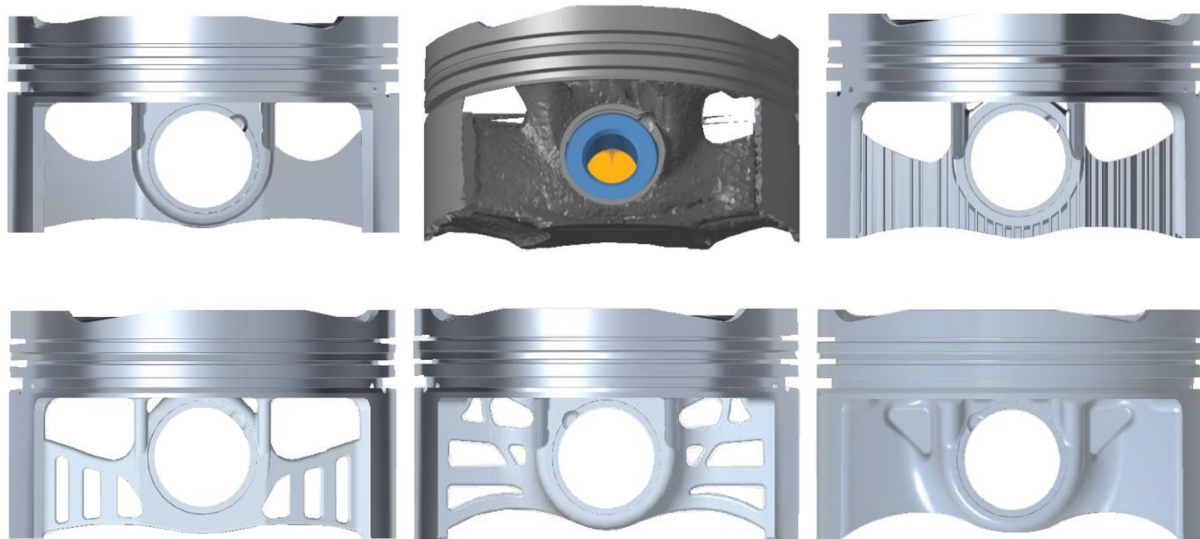
Zváženo bylo několik možných směrů, kterými se mohl návrh pístu ubírat. Všechny vytvořené písty zachovávaly stejný profil pláště, dna pístu a uložení pístního čepu jako píst původní. U všech byl změněn tvar spodní strany dna pístu, na němž bylo u několika návrhů vytvořeno kruhového žebrování pro zvýšení pevnosti dna pístu, zvětšení jeho plochy pro dosažení lepšího chlazení a také bylo využito možnosti vytvoření chladicího kanálku. Nejkonzervativnější návrh využíval pouze příčné žebrování v oblasti mezi nálitky pro pístní čep v maximální možné výšce, s níž žebra nezasahovala do prostoru, v němž by došlo ke kolizi s ojnicí, chladicí kanálek pro tento návrh využít nebyl.



Obr. 58 - písty s využitím mřížkové struktury – vlevo mřížka šestiúhelníková, vpravo osmiúhelníková

Jednou z možností bylo využití mřížkových struktur, ale kvůli technické náročnosti na software a hardware s touto možností nebylo možné příliš dobře pracovat. Mřížky tvořené programem Creo 4.0 se dělí na mřížky třídimenzionální a mřížky takzvané dvou-a-půl-dimenzionální. Třídimenzionální mřížku nebylo z technických důvodů možné využít pro návrh, ale byly vytvořeny dva jednodušší návrhy. Oba využívaly mřížkové struktury typu 2,5D. První z nich využíval mřížku tvaru šestiúhelníku, druhý využíval mřížku tvaru osmiúhelníku.

Výhodou mřížkové struktury je výrazné zvýšení povrchu zároveň s nízkou hmotností oproti plnému materiálu. Nevýhodou je ale velká modelová a výpočtová náročnost. Zvláště při tvorbě zaoblení mřížkových struktur, aby nebyl model plný ostrých hran, které by mohly působit coby koncentrátoři napětí, je modelování pro programy náročné. Z tohoto důvodu nebylo možné s těmito modely dále pracovat a mřížková struktura nebyla v práci dále bohužel využita.



Obr. 59 – porovnání navržených pístů s mřížkovou strukturou s optimalizovaným pístem – horní řada zleva – osmiúhelníková, optimalizovaný píst, šestiúhelníková mřížka; spodní řada zleva – varianta A, varianta B, varianta C

Podrobněji se tato práce zabývala třemi navrženými modely bez mřížkové struktury. Tyto písty byly označeny varianta A, varianta B a varianta C.

POROVNÁNÍ VARIANT

Dá se předpokládat, že nejvyšší narůst napětí oproti originálnímu pístu nastane u varianty A. Zde byl předpoklad extrémních hodnot, neb jde o simulaci lineární a v reálu by již docházelo u tenkých prutových oblastí k deformaci, v simulaci tento vliv zahrnut není. V tabulce je vždy porovnáno napětí v

Tab. 10 - srovnání analýz variant vyskytujících se v této práci

Varianta	Povrch	Hmotnost	Teplota	
			Min.	Max.
-	[%]	[%]	[%]	[%]
Původní píst	100	100	100	100
Varianta A	116,6	81,4	80,0	95,3
Varianta B	114,3	85,7	87,1	93,0
Varianta C	105,6	93,1	87,3	95,4

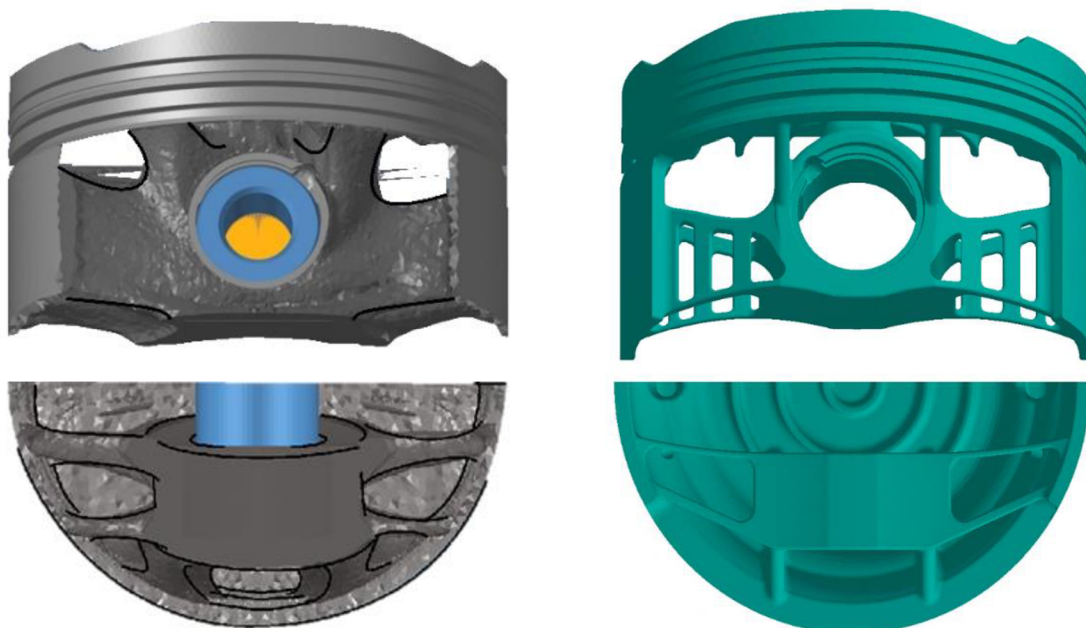
4.4.1 VARIANTA A

Tvar prvního z navržených modelů je na první pohled jednoznačně nejvíce ovlivněn tvarem, který vzešel z optimalizace pístní obálky. U varianty A byla nížena tloušťka dna pístu, neb bylo předpokládáno, že kruhové žebrování zvýší pevnost. Propojení nálitku pro pístní čep s pláštěm pístu bylo vytvořeno velmi odlehčeným způsobem, který zohledňoval rozložení materiálu s nejvyšší hustotou po optimalizaci v programu *OptiStruct*. Skládá se ze dvou relativně tenkých stěn, které byly dále odlehčeny přidáním otvorů. Jak již bylo zmíněno, tento píst také využívá chlazení olejovým kanálkem mírně trojúhelníkového průřezu. Napojení nálitku pro pístní čep na korunu bylo taktéž odlehčeno otvory, ovšem zde bylo odebrání materiálu o něco méně drastické nežli u propojení s pláštěm. Rozměry pláště pístu byly ponechány beze změny, přestože při optimalizaci byly z pláště odebrány koruně nejvzdálenější řady elementů.

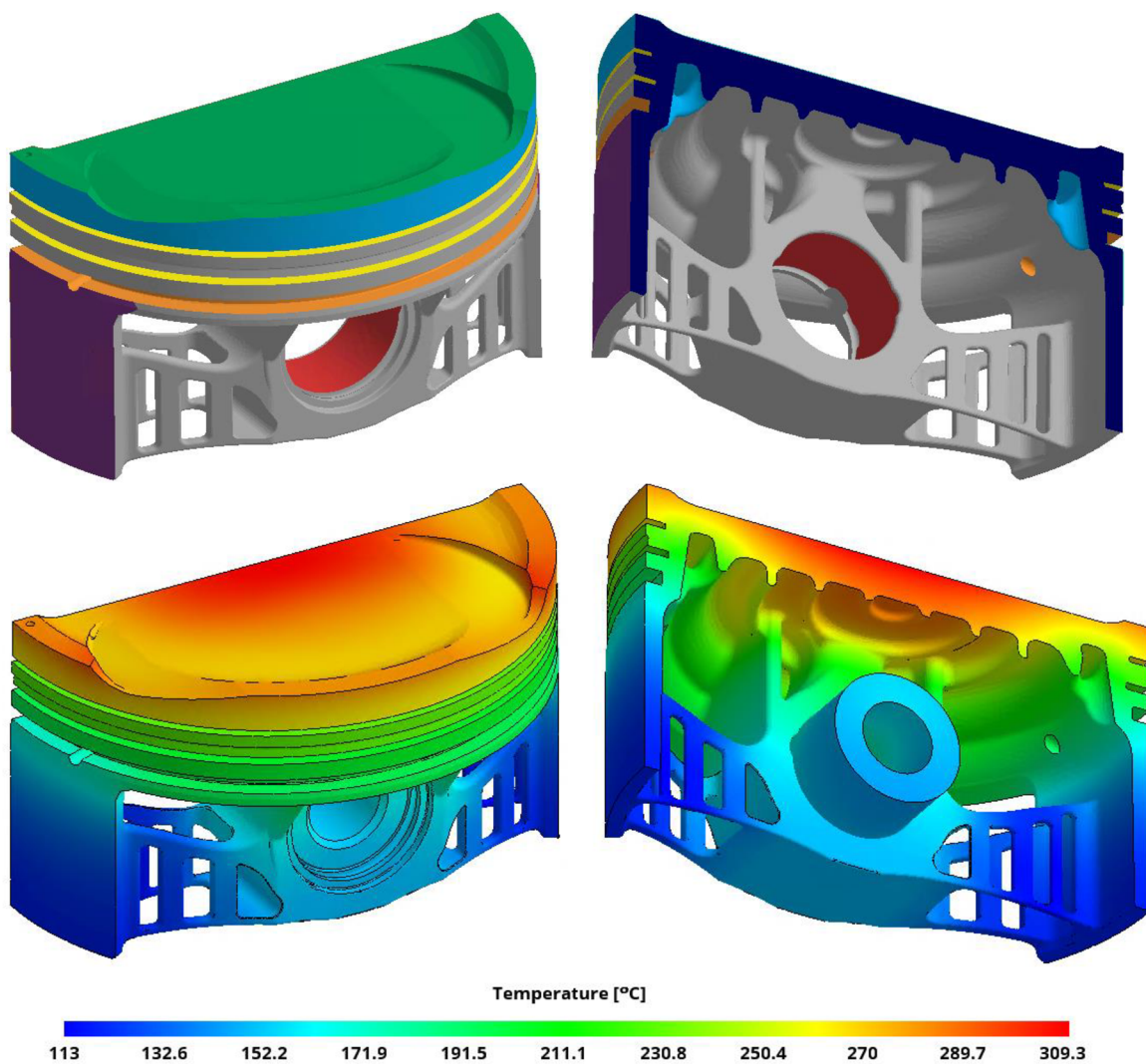
Takto navržený píst měl v porovnání s původním pístem o téměř 20% nižší hmotnost a o téměř 17% větší plochu povrchu. Pro následnou strukturální analýzu byl model vysíťován. Oproti původnímu modelu musely být prvky ve srovnání jemnější, aby vystihly jemná zaoblení a bylo více vrstev prvků i v relativně tenkých vrstvách materiálu.

Tato varianta nemá velký předpoklad vyjít dobře co se týče strukturální analýzy, ale je výrazně lehčí a měla by vyjít nejlépe co se týče analýzy termální. Základní tvar spojení nálitku pro pístní čep byl založen na tvaru vzniklého optimalizací obálky.

Vysíťován byl tetra prvky, díky zaoblením a tvaru byl počet prvků cirká 1,85 milionu.



Obr. 60 – porovnání navrženého pístu s optimalizovaným pístem – vlevo optimalizovaný píst, vpravo píst navržený



Obr. 61 – nahoře vysítování, níže výsledek termální analýzy pístu varianty A

Tab. 11 - výsledek strukturální analýzy varianty A

Zátěžný stav		Napětí (sig. Von Mises) [MPa]		Deformace [m]	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1	Přetočení otáček	-360	218	$1,2 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-4}$
2	Maximální tlak	-1470	449	$2,7 \times 10^{-5}$	3×10^{-4}
3	Max. boční síla	-1236	349	$3,3 \times 10^{-5}$	3×10^{-4}
4	Max. zrychlení	-355	235	$3,3 \times 10^{-5}$	3×10^{-4}
5	Min. boční síla	-678	212	$3,8 \times 10^{-5}$	3×10^{-4}

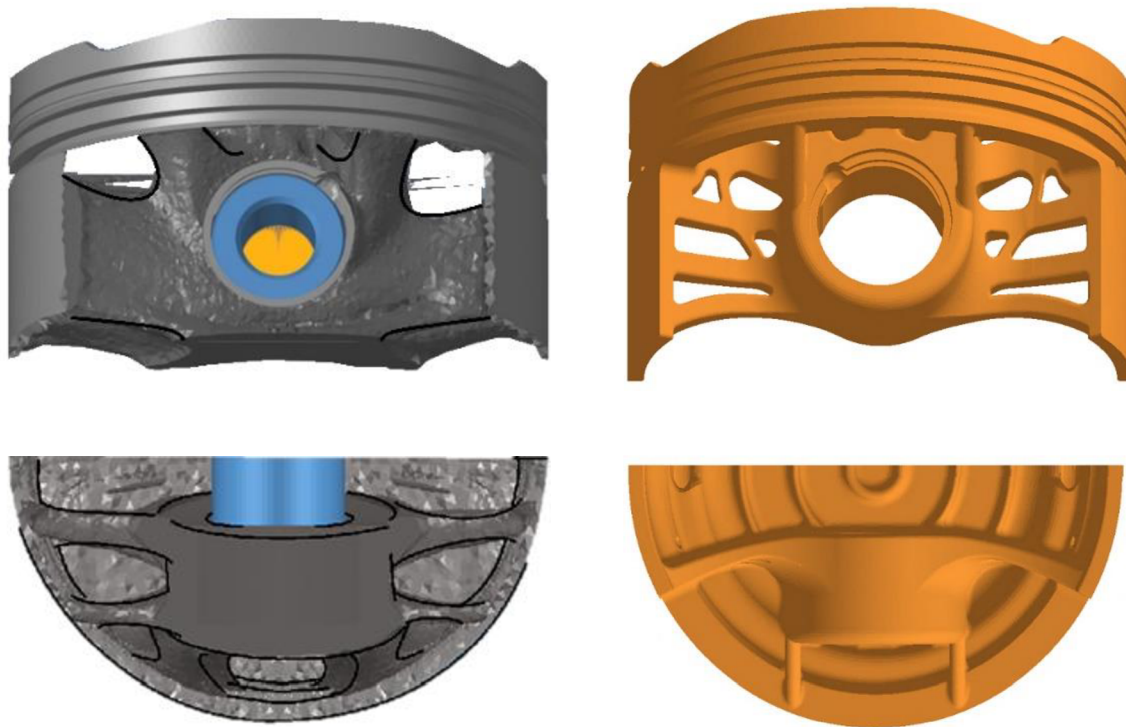
4.4.2 VARIANTA B

Druhý model, který byl podroben analýze, byl navržen odebráním materiálu z původně navrženého pístu. K redukci materiálu došlo v místech, kde byla v optimalizaci menší hustota prvků, ale korelace mezi optimalizací a návrhem je méně znatelná.

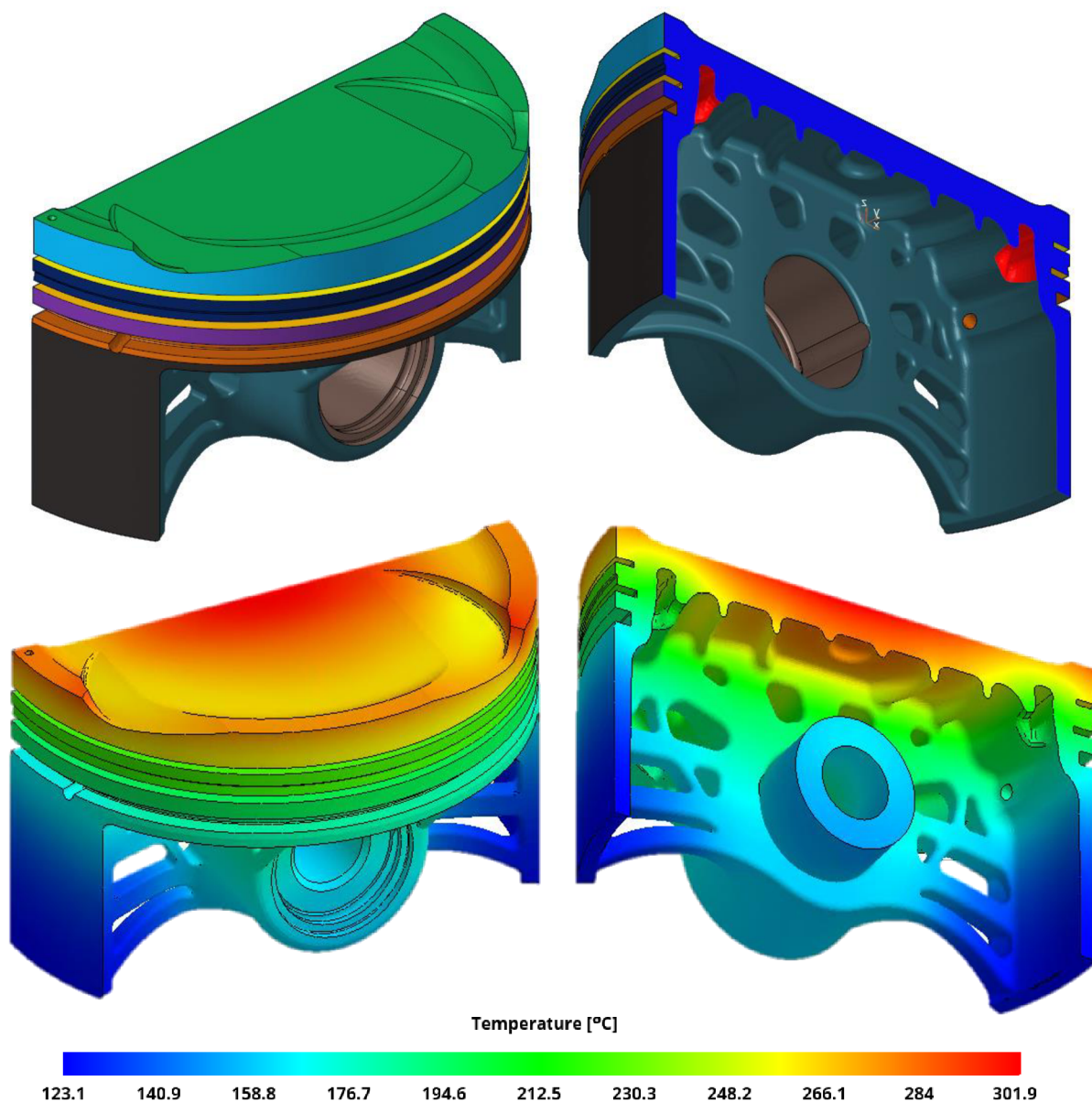
I u tohoto model bylo využito stejného designu dna pístu s chlazením olejovým kanálkem a kruhovým žebrováním. Olejový kanálek použitý pro tento model měl spíše oválný až obdélníkový průřez, na rozdíl od kanálku varianty A. Propojení nálitku pro pístní čep s dnem pístu je výrazně robustnější nežli v předchozím případě. Rozměry pláště pístu byly stejné jako v předchozím případě ponechány beze změny.

Takto navržený píst měl ve srovnání s původním pístem před optimalizací o přibližně 15% nižší hmotnost a o cirká 15% větší plochu povrchu. Tento píst by měl mít dobrý výsledek jak termální, tak strukturální analýzy.

Pro účely simulace zatížení byl model vysíťován v programu *HyperMesh*. I tento model byl vysíťován přibližně 1,5 miliony tetra prvků. Největší prvky mají délku přibližně 4,5 mm, zatímco asi 35% prvků má nejmenší délku pod 0,25 mm, především v oblasti vybrání pro odlehčení a v oblasti dna pístu.



Obr. 62 – porovnání navrženého pístu s optimalizovaným pístem – vlevo optimalizovaný píst, vpravo píst navržený



Obr. 63 – nejvýše vysítování, uprostřed výsledek termální analýzy, nejniže výsledek strukturální analýzy varianty B

Tab. 12 – výsledek strukturální analýzy varianty B

Zátěžný stav		Napětí (sig. Von Mises) [MPa]	
		Minimum	Maximum
1	Přetočení otáček	-535	230
2	Maximální tlak	-484	240
3	Max. boční síla	-450	135
4	Max. zrychlení	-363	164
5	Min. boční síla	-237	185

4.4.3 VARIANTA C

Poslední v této práci analyzovaný model, byl stejně jako model předchozí navržen odebráním materiálu z pístu původně navrženého, ovšem tentokrát nebyl materiál z modelu odstraněn formou otvorů, ale pouze došlo ke snížení tloušťky stěn v místech, kde byla nižší hustota prvků ve výsledku předchozí optimalizace hmotnosti. Části původních stěn byly ponechány ve své původní tloušťce coby zpevňující prvek. U tohoto pístu byl zvolen jiný tvar dna, jak již bylo výše zmíněno.

Rozdíl mezi tímto pístem a pístem původním je ve hmotnosti necelých 7% a ve velikosti plochy povrchu jde o rozdíl přibližně 6%. Jedná se o návrh nejkonzervativnější. Rozdíl ve hmotnosti by mohl být větší, kdyby nebylo přidáno výrazné žebrování, jež přidalo modelu relativně hodně materiálu. Mělo se jednat o píst nejkonzervativnější, s největším předpokladem dobrých výsledků ve strukturální analýze, tudíž u něj nebylo ztenčeno dno. Stejně jako u předchozího návrhu je u tohoto modelu viditelné vyztužení spojující spodní polovinu nálitku pro pístní čep s vnitřní stranou oblasti pístních kroužků.

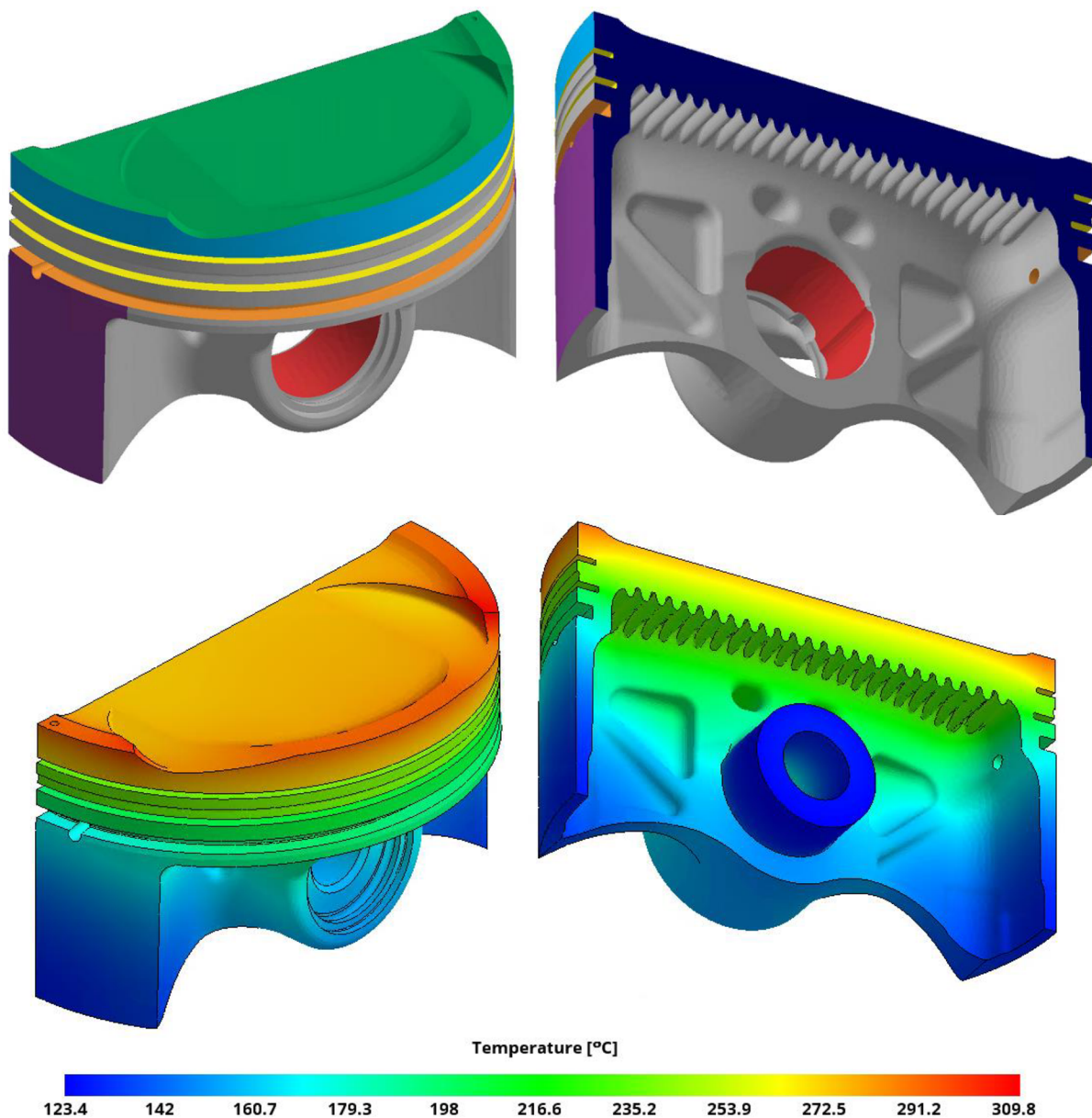
Vysíťováním v programu *HyperMesh* bylo vytvořeno cirká 1,25 milionu tetra prvků. Největší prvky mají délku kolem 4,8 mm, nejmenší prvky, vyskytující se především v oblasti žebrování a vybrání pro odlehčení, mají velikost pod 0,25 mm.



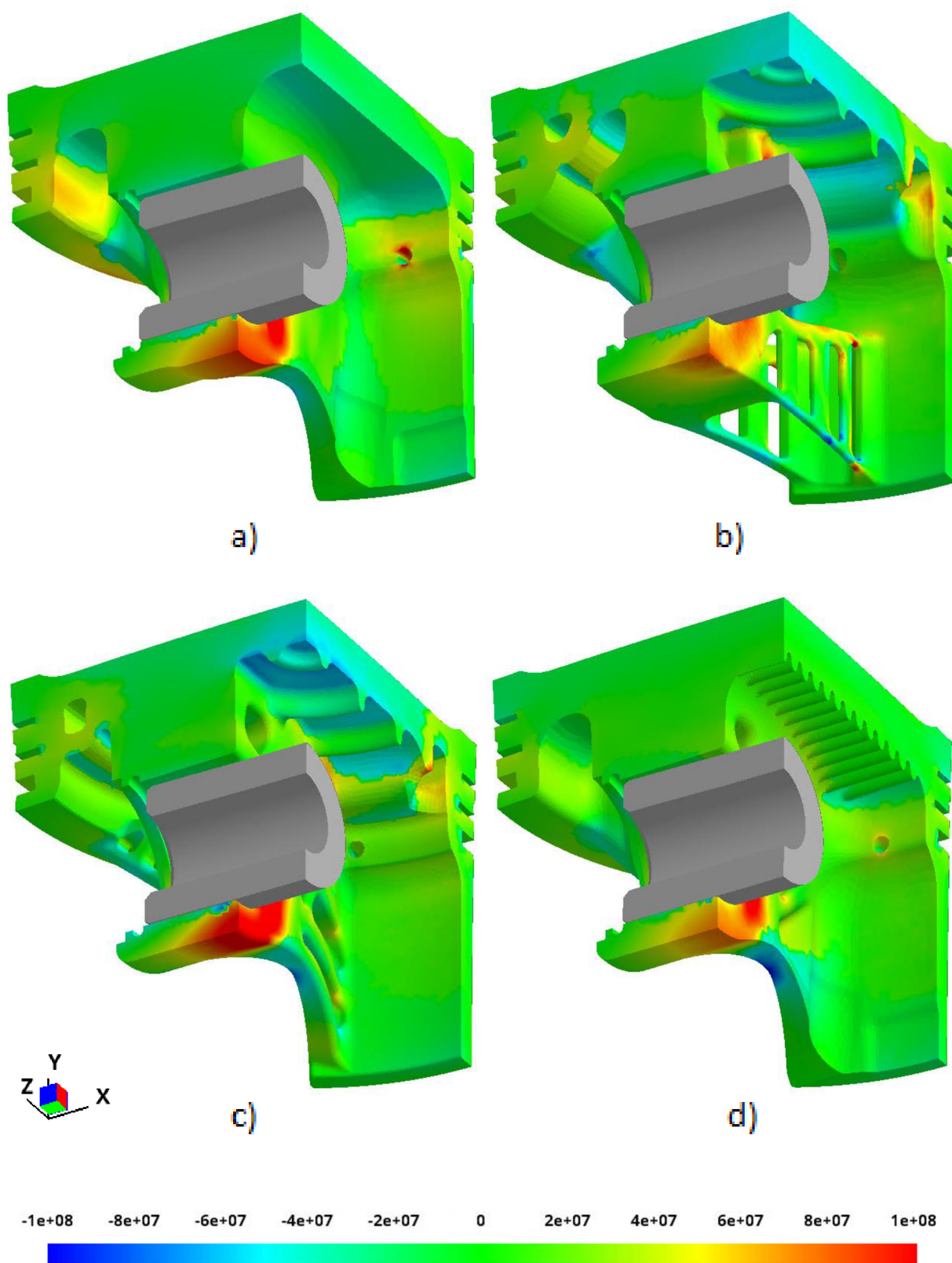
Obr. 64 – porovnání navrhovaného pístu s optimalizovaným pístem – vlevo optimalizovaný píst, vpravo píst navržený

Tab. 13 - výsledek strukturální analýzy varianty C

Zátěžný stav		Napětí (sig. Von Mises) [MPa]	
		Minimum	Maximum
1	Přetočení otáček	-182	176
2	Maximální tlak	-464	233
3	Max. boční síla	-350	153
4	Max. zrychlení	-309	137
5	Min. boční síla	-330	123



Obr. 65 – nejvýše vysítování, uprostřed výsledek termální analýzy, nejniže výsledek strukturální analýzy varianty C



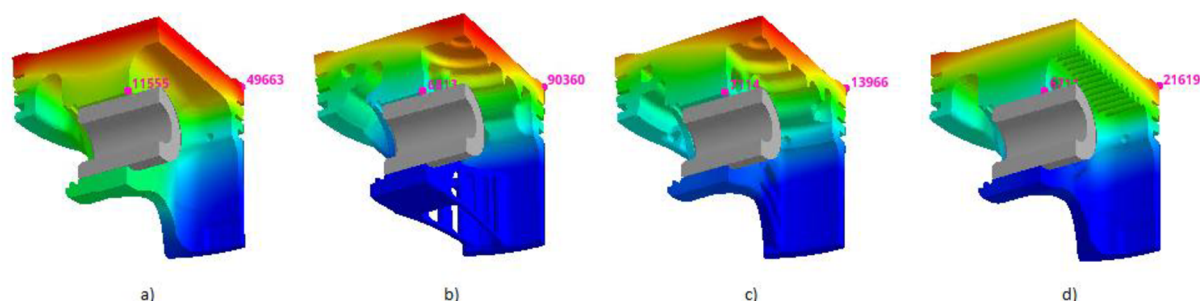
Obr. 66 – porovnání výsledků strukturální analýzy pro a) původní píst, b) variantu A, c) variantu B a d) variantu C – zatížení je při přiběhových otáčkách, tedy krok zátěžný stav 1, deformace je zobrazena s desetinasobným zvětšením

5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZ

Výsledky termálních analýz jednotlivých pístů jsou shrnuty v tabulce 14. Odvod tepla ze spalovacího prostoru chladicím olejem je ve dvou ze čtyř analýz docílen nástřikem písního dna a u dvou pomocí chladicího kanálku. I u těchto analýz bylo počítáno s chlazením nástřikem dna, ale koeficient přestupu tepla byl výrazně snížen, neb by se změnou geometrie olejových trysek mělo docílit toho, že většina oleje bude směřovat do vstupu do kanálku. V tabulce jsou porovnány hodnoty ve dvou bodech, první z bodů je na hraně koruny, tudíž na straně spalovacího prostoru, druhý bod je na nálitku písního čepu, na hraně otvoru pro písní čep.

Tabulka 14 – porovnání teplot získaných termální analýzou

Varianta	Teplota			
	Hrana koruny		Nálitka pro písní čep	
-	[°C]	[%]	[°C]	[%]
Původní píst	303	100	243	100
Varianta A	280	92,4	191	78,6
Varianta B	277	91,4	199	81,9
Varianta C	289	95,4	193	79,4



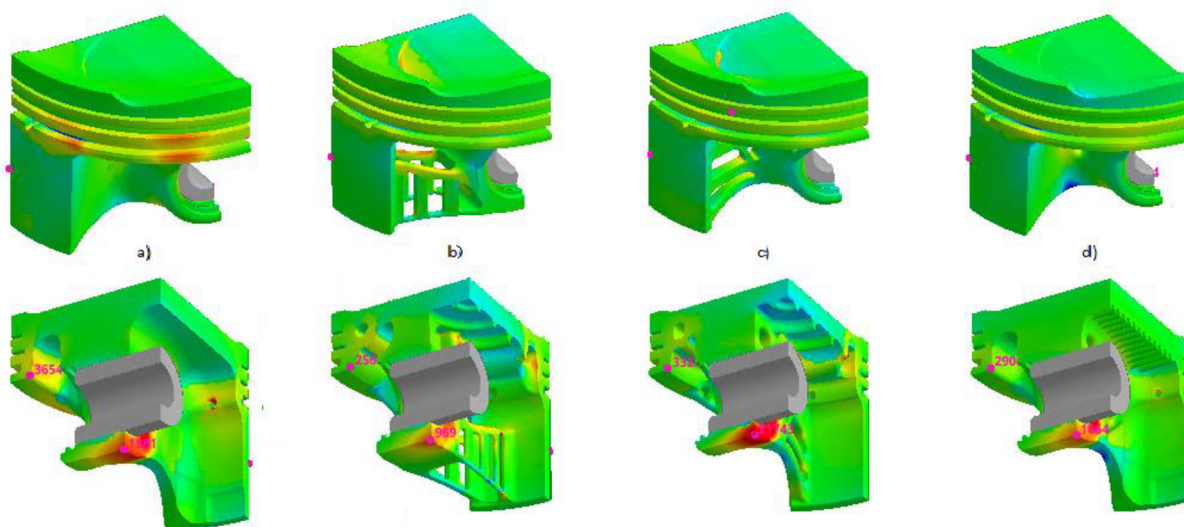
Obr. 67 – body, v nichž je zaznamenána teplota v tabulce 14; a) původní píst, b) varianta A, c) varianta B, d) varianta C

Z výsledků analýz se dá vyvodit, že nejlepší výsledek termální analýzy má, jako bylo předpokládáno, varianta A, ale všechny tři modely navržené s úmyslem využití aditivní technologie byly výsledkově relativně podobné. U všech došlo ke zvětšení ploch, skrze něž je teplo odváděno. Pro tento motor je použití chladicího kanálku možné, ale jeho vliv není ve srovnání s přímým nástřikem dna tak výrazný. Při porovnání teplot konvenčního pístu a varianty C je vidět výrazný rozdíl i bez kanálku.

Vliv různým materiálových vlastností je u termálních analýz relativně malý, neb vodivost je u obou materiálů srovnatelná, tudíž jde spíše o důsledek zvětšení plochy žebrováním. Oproti dnu pístu bez přímého nástřiku má dno varianty C přibližně o 50°C nižší teplotu.

Co se týče výsledků strukturálních analýz, byly hodnoty napětí poměrně vysoké i u původního pístu, ovšem je třeba brát v potaz to, že byla pro analýzy brána extrémní zatížení vysokovýkonného dvojité přeplňovaného motoru. Přestože se jedná o motor sportovního automobilu, nebude se motor v těchto zatíženích pohybovat po většinu svého provozu, naopak se dá předpokládat, že by se jednalo spíše o jednotky procent z provozní doby. Z porovnání s originálním pístem motoru bylo usouzeno, že by původní píst měl běžný provoz ve sportovním automobilu s obdobnou motorizací zvládnout, stěžejní tedy bude spíše porovnání variant upravených pro využití aditivních technologií než úvaha nad únavovým namáháním takto extrémními otáčkami.

Strukturální analýza byla též ovlivněna využitím lineárního výpočtu. Nelineární výpočet bohužel nebylo možné využít, neb byl velmi technicky a časově náročný. Nelineární výpočet byl proveden pouze při optimalizaci obálky, ale výsledek nebyl použitelný. Dá se předpokládat, že by napětí působící na paprskovité tvary nemuselo být tak vysoké v případě využití lepšího výpočtu.



Obr. 68 – výsledná napětí u prvního zátěžného stavu pro a) konvenční píst, b) variantu A, c) variantu B a d) variantu C

Byť se zde ve výsledcích vyskytují vysoké hodnoty napětí, nevyskytovaly by se v provozu motoru natolik často. Pro porovnání napětí byla vytvořena tabulka 15, v níž se kromě maximálního a minimálního napětí v prvním zátěžném stavu porovnává napětí ve třech vybraných bodech – ve středu pláště, ve středu nálitku pro pístní čep a na vnitřní hraně pod oblastí pro pístní kroužky.

Tabulka 15 – porovnání napětí u prvního zátěžného stavu

Varianta	Napětí (signed Von Mises) [MPa]					Porovnání [%]
	Min	Max	Střed pláště	Nálitok pro čep	Hrana	
Původ. píst	-331,8	206,4	-9,4	92,1	44,4	100
Varianta A	-359,1	217,7	-5,8	81,9	13,65	20
Varianta B	-237,4	184,8	-7,0	121,3	9,6	13,5
Varianta C	-169,1	169,3	-2,9	75,4	19,5	5

ZÁVĚR

Při porovnání výsledků strukturálních a termálních analýz všech čtyř modelů bylo vidět, že možnost využít složitější geometrii vylepšila výrazně především teplotní rozložení na pístu. Navrhnout píst, u kterého by byl vylepšen i výsledek strukturální analýzy se prokázalo coby složitější úkol, neb hodnoty napětí byly relativně vysoké i u pístu navrženého pro výrobu konvenční metodou, mnohdy i za mezí kluzu materiálu. Je ovšem třeba uvážit to, že zatížení použité pro výpočet napětí bylo vskutku extrémní i na poměry vysokovýkonného dvojité přeplňovaného motoru. Původní píst je modelován s důrazem na podobu s pístem z motoru M838T. Porovnáním s tímto pístem byl zdůvodněn předpoklad, že při extrémně vysokých otáčkách, kterých motor nedosahuje často, zvýšené napětí není takový problém.

Aplikace, pro kterou byl navrhovaný píst zamýšlen klade velký důraz především na odlehčení, kde i relativně malý rozdíl ve hmotnosti pístu, který byl například u varianty C, může znamenat výrazné odlehčení a zmenšení celé konstrukce motoru. Snížením hmotnosti částí pohybového ústrojí se poté docílí snížení spotřeby paliva, což je velmi aktuální téma.

Vzhledem k tomu, že i konvenčně navrhovaný píst byl relativně vysoce namáhán, coby nejlepší varianta se jeví píst s nejmenší úsporou hmotnosti, ale s nejlepším výsledkem strukturální analýzy. Optimální by pravděpodobně byl píst, který by byl – podobně jako varianta C – odlehčen ztenčením stěn a přidáním výztuh, ale měl o něco málu subtilnější dno pístu, případně možná i využitý chladicí kanálek. Píst, který byl pracovně nazván varianta A, by byl konvenčními postupy nevyrobitelný, ale návrh prezentovaný v této práci nebyl dostatečně dimenzován. Písty pojmenované varianta B a C byly dimenzovány lépe, tloušťka dna pístu byla u varianty C možná mírně naddimenzována.

Všechny varianty zdůrazňují možnost využití komplexní geometrie při návrhu součástí pro aditivní technologie, ale například využití chladicího kanálku zde možná bylo téměř zbytečné. Velkou výhodou takto navržených a vyrobených pístů je úspora materiálu a pro menší série i času a finančních prostředků, neboť vývoj a výroba jsou urychleny tím, že se nemusí vyrábět například odlévací formy a tak podobně. Z těchto důvodů se již dnes aditivní technologie využívají nejen v automobilovém, ale i například v leteckém průmyslu. Výzkum a pokrok v oblasti aditivních technologií postupuje mílovými kroky a již dnes se malé i velké automobilky snaží o jejich široké uplatnění. Díky tomuto vývinu se neustále zlepšuje kvalita, již výrobky dosahují a také se zpříšňují a zavádí nové normy pro kontrolu kvality. U dílů, u kterých je potřeba lepší kvalita materiálu se tiskne pomaleji a po tenčích vrstvách čímž se například snižuje pravděpodobnost vzniku pórů. S postupně se snižující cenou tiskáren, díky vypršení důležitých patentů, se zdá, že budoucnost této technologické větve je příznivá.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] MAHLE, Ed. *Pistons and engine testing*. 1st edition. Wiesbaden: Springer, 2012. ISBN 978-3-8348-1590-3.
- [2] Piston. *Know IC Engine: All about internal combustion engine* [online]. [cit. 2021-3-25]. Dostupné z: <https://knowicengine.wordpress.com/piston/>
- [3] NÜRAL. *Pistons manual*. 1994. Nürnberg: Alcan Deutschland.
- [4] Ricardo PLC, *Design Guidelines: Piston and Pin*, revision 5. 2019.
- [5] LEACH, R.K.; BOURELL, D.; CARMIGNATO, S.; DONMEZ, A.; SENIN, N.; DENWULF, W.: *Geometrical metrology for metal additive manufacturing* [online]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850619301611>
- [6] McLaren M838T engine. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 2020-5-5]. https://en.wikipedia.org/wiki/McLaren_M838T_engine
- [7] BABERG, A.; FREIDHAGER, M.; MERGLER, H.; SCHMIDT, K.: Aspects of Piston Material Choice for Diesel Engines. In: *MTZ worldwide*. **2012**(12), 26-30.
- [8] RÖHRLE M., *Mahle GmbH*, 1995
- [9] SCHOTTE, G. *A Brief History of Additive Manufacturing*. TriMech Blog: Your Engineering Resource [online]. 2019 [cit. 2020-5-5]. Dostupné z: <https://blog.trimech.com/a-brief-history-of-additive-manufacturing>
- [10] What is Additive Manufacturing? *GE Additive* [online]. [cit. 2021-1-17]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- [11] Study of Materials Produced by Powder Metallurgy Using Classical and Modern Additive Laser Technology
- [12] 3D printing. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 2020-5-5]. https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
- [13] *Special report: 3D printing and the auto industry*. **2016**. Automotive World Ltd.
- [14] LEACH, R. K., D. BOURELL, S. CARMIGNATO, A. DONMEZ, N. SENINA a W. DEWULF. Geometrical metrology for metal additive manufacturing: (2)ab(2)c(2)de2)f. *CIRP Annals* [online]. **2019**(68), 677-700 [cit. 2021-5-11].

-
- [15] ALTIPARMAK, S. C.; YARDLEY, V. A.; SHI, Z.; LIN, J. *Challenges in additive manufacturing of high-strength aluminium alloys and current developments in hybrid additive manufacturing*. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. Vydáno: červen 2021. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840420300780#fig1>
- [16] A design strategy based on topology optimization techniques for an additive manufactured high performance engine piston. In: BARBIERIA, S. G., M. GIACOPINIA, V. MANGERUGAA a S. MANTOVANIA. *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. 2017(červen), 27-30. Modena, Italy.
- [17] Čtyřdobý zážehový motor. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/615-ctyrdoby-zazehovy-motor>
- [18] CHUA, Ch. K., Ch. H. WONG a W. Y. YEONG. Roadmap on Additive Manufacturing Standards. *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*. 2017, 31-55.
- [19] NAYAK, K. Ch.; DATE, P. P. Manufacturing of light automobile engine piston head using sheet metal. *Procedia Manufacturing*. 2018(15), 940-948.
- [20] Carbon-carbon piston development. NASA [online]. [cit. 2019-9-6]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19940031440.pdf>
- [21] MAGDA, M. *What Makes A Racing Piston?* [online]. 2018. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <http://blog.wiseco.com/-what-makes-a-racing-piston>
- [22] *JTEC/WTEC panel on rapid prototyping in Europe and Japan: final report* [online]. Baltimore, MD: Published and Distributed by Rapid Prototyping Association of the Society of Manufacturing Engineers, in cooperation with International Technology Research Institute, Loyola College in Maryland, 1997.
- [23] *IAV Sees Huge Potential With 3D-Printed Pistons* [online]. 12. 4. 2018 [cit. 2020-3-10]. Dostupné z: <https://www.wardsauto.com/engines/iav-sees-huge-potential-3d-printed-pistons>
- [24] SEIFI, M.; M. GORELIK; J. WALLER; N. HRABE; N. SHAMSAEI; S. DANIEWICZ a J.J. LEWANDOWSKI. Progress towards metal additive manufacturing standardization to support qualification and certification. *The Minerals, Metals & Materials Society* [online]. 2017(3), 439-455 [cit. 2021-5-11].
-

-
- [25] KALAMI, H.; J. URBANIC. Exploration of surface roughness measurement solutions for additive manufactured components built by multi-axis tool paths. *Additive Manufacturing* [online]. **2021**(38) [cit. 2021-5-1].
- [26] KEMPEN, K., L. THIJS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH. Mechanical properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia* [online]. **2012**(39), 439–446 [cit. 2021-1-11].
- [27] WU, J, X. Q. WANG, W. WANG, M. M. ATTALLAH a M. H. LORETTO. Microstructure and strength of selectively laser melted AlSi10Mg. *Acta Materialia* [online]. **2016**(117), 311-320 [cit. 2021-5-11].
- [28] materiály firmy Ricardo plc
- [29] ZHANG, J. a A. FATEMI. Surface roughness effect on multiaxial fatigue behavior of additive manufactured metals and its modeling. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics Volume* [online]. **2019**(103) [cit. 2019-9-11].
- [30] HARRISSON, T. Porsche's 3D-printed pistons give the GT2 RS 30 extra horsepower: Porsche is getting into 3D printing in a big way. *Top Gear* [online]. 13 Jul 2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.topgear.com/car-news/future-tech/porsches-3d-printed-pistons-give-gt2-rs-30-extra-horsepower>
- [31] BAKER, R. *Method of Making Decorative Articles*. US. 1,533,300. Uděleno 1925.
- [32] MUÑOZ, V. A. *Analysis of the optimal parameters for 3D printing aluminum parts with a SLM 280 machine*. Barcelona, 2017. Diplomová práce. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Vedoucí práce J. B. Bo.
- [33] SEDLAK, J., D. RICAN, M. PISKA a L. ROZKOSNY. Study of Materials Produced by Powder Metallurgy Using Classical and Modern Additive Laser Technology. *Procedia Engineering*. **2015**(100), 1232–1241.
- [34] *Top 10 3D-Printed Cars – the Future of Auto Manufacturing* [online]. 2. 2. 2019 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.3dprintingtoday.com/top-10-3d-printed-cars-the-future-of-auto-manufacturing/>
- [35] YANG, Pin, RODRIGUEZ, Mark A., et al. *Microstructure and Thermal Properties of Selective Laser Melted AlSi10Mg Alloy..* United States: N. p., 2017.
- [36] DVORAKOVA, Jana a Michal CERNY. Influence of DMLS method topology on mechanical properties of alloy AlSi10Mg. *MendelNet*. Dostupné také z: <https://mendelnet.cz/pdfs/mnt/2020/01/80.pdf><https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212025862>
-