Výpočty MKP pro kontrolu konstrukčního návrhu hlavy a válce leteckého pístového motoru

Ing. Martin Nesládek

Vedoucí práce: Doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.

Abstrakt

Článek dokumentuje koncepci a hlavní výsledky analýzy vedení tepla a pevnostní analýzy provedených na válci a hlavě leteckého pístového motoru. Pole napětí a teploty byla vypočtena komerčním MKP softwarem Abaqus. Napjatost soustavy byla stanovena pro uvažovaná mechanická a teplotní namáhání. Kontrole bylo podrobeno několik modifikací původní geometrie s cílem nalézt vhodné řešení z hlediska pevnosti a odvodu tepla. Zde uvedené výsledky jsou předběžným ověřením konstrukčního návrhu. V další fázi je počítáno s kalibrací modelů dle měření na prototypu motoru pro získání přesnějších podkladů pro uvažovanou řadu motorů.

Klíčová slova

MKP, pevnostní analýza, analýza vedení tepla, letecký pístový motor

1. Úvod

Práce prezentovaná v tomto článku je výsledkem spolupráce mezi ADW, s.r.o. a Výzkumným centrem spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka. Cílem tohoto projektu je konstrukční návrh nového leteckého pístového motoru. Koncepčně se jedná o dieselový přeplňovaný čtyřválec se systémem vstřikování paliva common rail. Předpokládá se náporové chlazení obtékajícím vzduchem.

V tomto článku je konkrétně prezentována dílčí část projektu týkající se kontroly napětí v soustavě, jejíž geometrie je uvedena na Obr. 1. Napjatost je v tomto případě vyvolána jak vlivy mechanickými (montážními a provozními), tak i vlivy teplotními od spalování. Pevnostní analýza byla rovněž zaměřena na problematickou oblast kontaktu vložky válce a vnitřní plochy válce motoru. Zatímco materiál válce je hliníková slitina AlSi7MgTi, vložka bude vyráběna z důvodu lepších tribologických vlastností z šedé litiny. Nevýhodou této kombinace je, že hliníková slitina má přibližně dvojnásobnou teplotní roztažnost, což za provozu může vést k odlehnutí vložky od stěny válce a zhoršit tak odvod tepla ze spalovací komory.

Odkaz.	Název součásti		
1	sací ventil	těleso válce a hlavy motoru	7
2	vstřikovač	šrouby	8
3	výfukový ventil	geom. náhrada bloku motoru	9
4	vodítko výfuk. ventilu	sací sedlo	10
5	vodítko sacího ventilu	výfukové sedlo	11
6	žhavicí svíčka	vložka válce	12

Tabulka 1. Seznam součástí zahrnutých do numerického modelu



Obr. 1. CAD model soustavy použitý pro tvorbu numerického modelu

2. Koncepce analýzy

Pevnostní analýza hlavy a válce motoru byla koncipována jako nesvázaná úloha termoelasticity. To v podstatě znamená v první fázi vypočtení ustáleného teplotního pole, které je výsledkem analýzy vedení tepla. V druhé fázi – statické pevnostní analýze - byly tyto hodnoty použity pro výpočet teplotních napětí.

Teplotní pole bylo vypočteno na základě známých okrajových podmínek ve formě střední teploty a koeficientu přestupu tepla na teplosměnné ploše. Tyto hodnoty nahrazují tepelný účinek proudícího média. Nerovnoměrné ohřátí soustavy a rozdílné materiály zákonitě vyvolají dodatečné pnutí, které je třeba při kontrole zohlednit. Zároveň je nutné uvažovat změny mechanických vlastností materiálu s teplotou.

Dalším zdrojem nelinearity v úloze bylo poměrně velké množství kontaktních vazeb. Jejich podrobnějšímu popisu je věnována část 2.2.

Uvedený problém byl řešen metodou konečných prvků (MKP) implementované v komerčním programu Abaqus. Příprava numerického modelu probíhala v grafickém prostředí Abaqus/CAE s využitím geometrických modelů importovaných z CAD softwaru Pro/Engineer. Pro simulaci obrobení funkčních ploch ventilových sedel a vodítek byl použit vlastní skript napsaný v jazyce Python implementující knihovny funkcí rozhraní Abaqus Python API. Cílem bylo odstranění radiálních deformací těchto součástí po jejich nalisování.

2.1 MKP model

První fází tvorby numerického modelu obvykle bývá zjednodušení CAD geometrie a eliminace některých nepřesností vzniklých např. nedokonalými průniky objemových primitiv. Obvykle je tedy nutné odstranit většinu technologických zkosení a rádiusů, u kterých je jisté, že nijak zásadně neovlivní tuhost soustavy, případně že nezasahují do oblasti, kde záleží na přesnosti výpočtu. Tyto entity totiž mají za následek nekvalitní nebo příliš hustou síť. V tomto případě bylo navíc nutné odstranit modely závitu, které se po importu modelu z Pro/Engineeru interpretovaly jako válcové plochy bez návaznosti na další geometrii.

Pro diskretizaci geometrie ve smyslu MKP byly použity především lineární kontinuální elementy. Tenkostěnná konstrukce vložky válce byla v modelu pro pevnostní analýzu síťována elementy typu kontinuální skořepina. Důvodem byla snaha zachovat množství stupňů volnosti v rozumných hodnotách, což bylo nezbytné pro dosažení relativně nízkých výpočetních časů.

Je výhodné vytvářet od počátku oba modely pro pevnostní i teplotní analýzu s geometricky shodnou sítí. Do pevnostní analýzy je pak možné načíst hodnoty teplot v uzlech

přímo bez dalších úprav. Kompatibilitu sítě však nebylo možné v tomto případě dodržet, a to především z důvodu velkého rozsahu modelu a jeho mnohým úpravám. Pro tyto účely disponuje Abaqus interpolačním algoritmem, který dovoluje načítání hodnot mezi nekompatibilními sítěmi. Tato metoda poskytovala velice dobré výsledky, drobné nepřesnosti bylo možné pozorovat jen v několika uzlech v kontaktních rozhraních.

Pevnostní analýza se sestávala z několika výpočetních kroků simulujících montáž a provozní podmínky. Zjednodušeně lze tuto sekvenci – s vynecháním inicializačních kroků pro zlepšení konvergence řešení – shrnout do následujících bodů:

- 1. nalisování ventilových sedel a vodítek spolu s vložkou válce do tělesa hlavy a válce motoru
- 2. vytvoření kontaktních vazeb mezi ventily a příslušnými vodítky a sedly, zatížení ventilů tažnou silou v jejich podélné ose jakožto náhrady účinku ventilových pružin
- 3. zavedení předpětí ve šroubech pro simulaci spojení hlavy s blokem motoru (zde nahrazen pro jednoduchost dokonale tuhou rovinou)
- 4. zatížení maximálním spalovacím tlakem ve spalovací komoře
- 5. "ohřátí" soustavy na provozní teplotu, tzn. načtení teplotního pole do uzlů modelu pro pevnostní analýzu

Vzhledem k povaze sledované soustavy, kde ke zplastizování materiálu může dojít pouze lokálně např. v okolí nalisovaných vodítek a sedel, bylo v analýze uvažováno čistě lineárně elastické materiálové chování. V ideálním případě je vhodné mít vlastnosti materiálů pro dané provozní podmínky jako funkce teploty. Získání relevantních dat je však i v současnosti stále poměrně nesnadnou a nákladnou záležitostí. Proto byly v různých zdrojích nalezeny mechanické vlastnosti v závislosti na teplotě pouze u hliníkové slitiny a šedé litiny.

2.2 Vazby mezi součástmi

Mezi součástmi byla zavedena řada kinematických vazeb, především typu "kontakt". Převážně se jednalo o aplikaci kontaktního algoritmu Abaqusu na bázi surface-to-surface diskretizace a finite-sliding metody vyhledávání kontaktních párů. Jednodušší varianta small-sliding vykazovala ve fázi teplotního zatěžování lokálně zkreslené výsledky. Proto od ní bylo v dalším postupu ladění modelu upuštěno. Koeficient tření byl ve všech rozhraních definován hodnotou 0,15 a do soustavy rovnic byl zaveden penaltovou metodou.

Pro zlepšení konvergence řešení byly na dříkách ventilů zavedeny kinematické vazby zabraňující rotaci ventilů kolem podélné osy. Vazby mezi hlavou motoru a žhavicí svíčkou a vstřikovačem byly typu "tie" (slepení). Ty zachovávají nulové gradienty posuvů v rozhraních.

2.3 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky pro analýzu vedení tepla byly pro případ vnitřních ploch vypočteny v programu GT-POWER. Chladicí účinek proudu vzduchu na vnějším žebrování byl nahrazen součiniteli přestupu tepla a teplotami. Jejich hodnoty byly stanoveny na základě analytických vztahů pro konvektivní přenos tepla mezi proudem vzduchu a přímým nebo zakřiveným kanálem. Pro podrobný popis metodiky jejich výpočtu odkazujeme na zprávu (Doleček et al., 2010). Hodnoty vybraných tepelných okrajových podmínek uvnitř soustavy jsou uvedeny v Tabulce 2.

Silové okrajové podmínky zahrnovaly extrémní montážní a provozní zatížení. Jejich výčet je uveden v Tabulce 3.

	Výfuk		Śání	
	$\alpha_{st\check{r}} [W.m^{-2}.K^{-1}]$	$T_{st\check{r}}[K]$	$\alpha_{st\check{r}}[W.m^{-2}.K^{-1}]$	$T_{st\check{r}}[K]$
vnitřní obvodová plocha ventil. sedla	4520,72	1007,46	4424,30	532,71
přechod mezi talířem a dříkem ventilu	633,90	1002,37	421,03	372,19
dřík ventilu	497,08	997,28	317,76	340,26
výfukový/sací kanál	644,59	981,13	507,82	3 9,85

Tabulka 2. Hodnoty vybraných tepelných okrajových podmínek na vnitřních plochách soustavy (vypočteno pomocí programu GT-POWER)

Tabulka 3. Hodnoty silových okrajových podminek				
Název	Hodnota			
tažná síla ventilové pružiny	250 N			
předpětí ve šroubech	24,3 kN			
předpětí na vstřikovači	9 kN			
max. spalovací tlak	14,75 MPa			

2.4 Simulace obrobení funkčních ploch ventilových sedel a vodítek

Sedla a vodítka ventilů jsou do tělesa hlavy motoru nalisována s přesahem a následné pnutí má za následek deformace v radiálním směru. Tyto geometrické nuance se pro zajištění potřebné funkčnosti v praxi odstraňují obráběním funkčních ploch načisto až po jejich nalisování.

Tento problém bylo nutné vyřešit i v této simulaci, a to především z důvodu špatné konvergence řešení kvůli penetraci uzlů sedel, resp. vodítek do protilehlých ploch ventilů.

Za předpokladu ideální geometrické konfigurace sedel a vodítek (tj. tyto součásti jsou namodelovány tak, že mají tvar, jaký požadujeme i po jejich nalisování) byl zvolen postup, kdy byl nejprve proveden předběžný výpočet simulující pouze nalisování. Následně byly za použití programového skriptu v jazyce Python na modelu upraveny souřadnice uzlů funkčních ploch o záporně vzatou hodnotu posuvů. Poté mohl být výpočet proveden znovu, tentokrát již nejen se simulací montáže, ale i s veškerým provozním zatížením. Po tomto kroku se uzly dostanou téměř do původní požadované polohy.

Schematicky je simulace obrobení naznačena na Obr. 2. Vlivem redistribuce tuhosti změnou souřadnic uzlů není finální tvar absolutně shodný s výchozím modelem. Nicméně naměřené odchylky byly v řádech desetin mikrometru. V případě potřeby lze tímto postupem iterovat k požadované přesnosti.

3. Modifikace konstrukce porovnávané analýzou

Cílem popsané metodiky a numerických modelů bylo rovněž vyhodnotit vliv některých konstrukčních úprav na pevnost a chlazení soustavy. Tyto modifikace lze shrnout do následujícího seznamu:

- 1. (ne)přítomnost chladicího olejového kanálu na dně válce zasahujícího do oblasti ventilových sedel a výfukového kanálu
- 2. zesílení stěny vložky válce z 2,2 na 3,4 mm
- 3. modifikace vnější geometrie, tj. zeslabení tloušťky chladicích žeber a zároveň zvýšení jejich počtu především v oblasti výfukového kanálu
- 4. snížení přesahu nalisování vložky válce z 0,093 na 0,073 mm na průměru



Obr. 2. Schéma simulace obrobení sedel a vodítek – červeně ventil, zeleně sedlo, pohled v podélné ose ventilu

Na konci tohoto porovnání byla vybrána nejlépe vyhovující varianta konstrukce. Výsledkům porovnání je věnována následující část.

4. Výsledky výpočtů

Na následujících obrázcích jsou zachyceny příklady teplotních polí hlavy a válce motoru. Smyslem těchto obrázků je ukázat porovnání mezi původní variantou geometrie soustavy (vždy pravý ve dvojici obrázků) a některou z výše uvedených modifikací. Pro názornost jsou zde ukázány pouze výsledky s nejvýraznější změnou oproti původní variantě.

Obr. 3 dokazuje výrazný vliv chladicího olejového kanálu na chlazení soustavy, kdy nejvíce tepelně exponované oblasti v okolí ventilových sedel vykazují pokles teploty až o 30 °C. Obdobný trend lze pozorovat při porovnání původní geometrie s modelem, na němž byly provedeny změny dle bodu 3. v části 3 (viz Obr. 4).

Naopak k mírnému zvýšení teploty došlo v případě zesílené vložky válce. Tuto skutečnost lze přisoudit podstatně horší tepelné vodivosti šedé litiny v porovnání s hliníkovou slitinou válce. V Tabulce 4 jsou pro přesnější představu vlivu jednotlivých úprav uvedeny číselné hodnoty teplot naměřený v MKP modelech.

Na Obr. 6 jsou pro porovnání uvedena pole redukovaného napětí v tělese hlavy a válce motoru na původní geometrii a na modelu s upravenou vnější geometrií. Je zde patrná redistribuce napětí vlivem konstrukčních úprav. Evidentní je snížení napětí v oblasti kolem ventilových sedel, což je pravděpodobně i důsledek lepšího chlazení díky vnějším úpravám.

Účelem konstrukčních úprav byla také eliminace kontaktních vůlí mezi válcem a vložkou. Model predikoval poměrně výrazné hodnoty v některých místech přesahující 0,1 mm. Nejvýraznější vůle byly zjištěny v blízkosti dna válce, tj. v místech s nejvyššími teplotami. Jak je patrné na Obr. 8, dle očekávání vedlo zlepšení odvodu tepla ke snížení kontaktní vůle.

Průběhy kontaktních vůlí mezi vložkou a válcem byly vyhodnocovány pomocí polárních grafů. Jeden příklad za všechny je uveden na Obr. 7, a to pro případ vložky o tloušť ce 2,2 mm nalisované s přesahem 0,073 mm do původní geometrie válce.

Detailnější dokumentace výsledků je uvedena ve zprávě (Nesládek & Španiel, 2011).



Obr. 3. Porovnání teplotního pole hlavy a válce motoru ve variantě bez olejového chladicího kanálu (vlevo) a s chladicím kanálem (vpravo)



Obr. 4. Porovnání teplotního pole hlavy a válce motoru ve variantě s upravenou vnější geometrií (vlevo) a s původní geometrií (vpravo)

	teplota [°C]					
misto měření	původní geometrie	bez kanálu	zesílená vložka	upravená vnější geometrie		
P1	350,43	376,38	354,12	332,40		
P2	350,26	379,85	359,51	338,12		
P3	316,68	342,23	330,22	299,98		
P4	317,09	336,85	319,86	294,66		
P5	339,78	366,30	345,34	322,80		
<i>P6</i>	367,08	396,07	375,25	352,09		
P7	363,13	393,33	377,79	349,16		
P8	373,75	403,85	372,56	364,78		

Tabulka 4. Porovnání teplot ve vybraných bodech dle Obr. 5 pro různé konstrukční úpravy



Obr. 5. Místa měření teploty



Obr. 6. Pole redukovaného napětí v tělese hlavy a válce motor - vlevo upravená vnější geometrie, vpravo původní geometrie – stav po montáži a aplikaci všech provozních zatížení



Obr. 7. Polární graf průběhu kontaktní vůle ve čtyřech řadách po obvodu vložky válce; radiální souřadnice reprezentuje kontaktní vůle v mm, tangenciální souřadnice značí polohu po obvodu vložky v souladu s legendou na prostředním schématu



Obr. 8. Pole kontaktních vůlí mezi válcem a vložkou - vlevo upravená vnější geometrie, vpravo původní geometrie – stav po montáži a aplikaci všech provozních zatížení

5. Závěr

V článku bylo uvedeno užití metody konečných prvků pro kontrolu a následnou modifikaci konstrukčního návrhu hlavy a válce leteckého pístového motoru. Výsledky získané pomocí numerických modelů naznačily možná problematická místa v konstrukci. Vliv provedených úprav bylo možné díky MKP poměrně rychle a levně porovnat s výchozím modelem.

Model s upravenou vnější geometrií a olejovým kanálem vykazoval nejlepší výsledky co do schopnosti chlazení vnitřních ploch, tak i pevnosti hlavy. Toho bylo dosaženo především úpravou žebrování v oblasti výfukového kanálu.

Původně navržená konstrukce vložky válce s tloušťkou 2,2 mm se jeví z hlediska napětí v ohřátém stavu jako nevhodná. Zesílení stěny o 1,2 mm napětí výrazně redukuje směrem k bezpečným hodnotám. Nepříznivým důsledkem této úpravy je mírné zvýšení teploty soustavy a nárůst kontaktních vůlí mezi vložkou a válcem.

Snížení přesahu nalisování vložky z 0,093 na 0,073 mm na průměru snížil napětí za studena. Vliv na soustavu po ohřátí je diskutabilní, neboť model predikoval odlehnutí vložky na podstatné části kontaktu ve všech zkoumaných variantách.

Pro přesnější posouzení výsledné vůle v tomto kontaktním uzlu by bylo nutné model doplnit údaji o teplotní roztažnosti šedé litiny v závislosti na teplotě. Tyto hodnoty se bohužel nepodařilo během tvorby modelu zajistit. Lze očekávat, že roztažnost litiny bude mít rostoucí trend obdobně jako hliníková slitina hlavy a válce. To by v konečném důsledku vedlo k redukci kontaktní vůle.

Analýza vedení tepla byla provedena na základě okrajových podmínek stanovených z odhadu rychlosti proudění vzduchu kolem žebrování. Tento odhad je třeba validovat měřením na prototypu modelu, na kterém se v současnosti pracuje.

Seznam symbolů

 α součinitel přestupu tepla

T termodynamická teplota

[W.m⁻².K⁻¹] [K]

Seznam použité literatury

- Doleček, V., Tichánek, R., Macek, J. *Analýza kmitání klikového hřídele, optimalizace ventilového rozvodu a okrajové podmínky pro výpočet teplotních polí válce nízkoobsahového vznětového leteckého motoru*, Výzkumná zpráva č. Z10-15, 2010. Praha: Výzkumné centrum spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka.
- Nesládek, M., Španiel, M. Výpočty MKP pro kontrolu konstrukčního návrhu hlavy a válce leteckého pístového motoru, Technická zpráva č. 12105/10/28, 2011. Fakulta strojní ČVUT v Praze, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky.