

## Oponentní posudek diplomové práce

*Název práce:* **Návrh třecí kotoučové brzdy pro osobní automobil**

*Diplomant:* **Bc. Petr Šindelář**

*Vedoucí práce:* doc. Ing. Petr Tomek, Ph.D.

*Oponent:* Ing. Tomáš Jelínek

Předložená diplomová práce obsahuje 101 stran vlastního textu, výpočtové a výkresové přílohy. Práce se zabývá návrhem třecí kotoučové brzdy pro osobní automobil.

Dle poskytnuté osnovy posudku diplomové práce jsou recenzentem hodnoceny následující body:

- a) Přístup diplomanta k zadanému úkolu, zvolený postup řešení z hlediska současných metod.

Diplomová práce je poměrně rozsáhlá. V zásadě je rozdělena na dvě části. První část obsahuje rešerši požadavků na brzdové systémy a základní konstrukční provedení, včetně konstrukčního návrhu komplet kotoučové brzdy. V druhé části jsou zpracovány kontrola pevnosti a únavy samotného brzdového kotouče včetně definice vstupních parametrů pro MKP analýzu. Modely pro výpočet a z nich vypracovaná výkresová dokumentace je zpracována ve 3D prostředí. Při výpočtech tepelného namáhání, pevnosti a únavy kromě analytického řešení využívá i software, který je založen na principu metody konečných prvků. Z hlediska současných dostupných metod je zvolený postup správný. Nicméně při porovnání jednotlivých kapitol mezi sebou musím konstatovat, že kapitoly působí nevyrovnaně. Některé kapitoly jsou zpracovány na velmi vysoké úrovni z hlediska detailních informací logické návaznosti, jednoznačnosti popisu řešení a čitelnosti. V diplomové práci se ale vyskytují kapitoly jejichž úroveň je spíše podprůměrná (stručné, nejasné, nepřehledné a tím i obtížně čitelné).

- b) Dosažené výsledky, jejich správnost a možnost praktického využití.

Diplomant splnil zadání diplomové práce v celém rozsahu. Vyhodnocení výsledků bylo provedeno dle směrnice FKM, která se využívá pro návrh dílů vyrobených z litiny. Z dostupných zdrojů, z analytických výpočtů a odhadu (např. výšky těžiště vozidla) student určil zatížení při zvolených režimech brzdění a data pro vstupy do MKP analýzy. V postupu řešení a správnosti výsledků jsem nenalezl žádné závažné chyby. Nicméně se v diplomové práci vyskytují ne zcela jasně zdůvodněné

předpoklady, nepřesnosti a neúplně vhodně zvolený způsob vyhodnocení některých výsledků. Jako příklad mohu uvést:

- Str. 71. kap. 5.2.2 – „*Jelikož není předpokládán nárůst teploty k vyšším stovkám °C, je možné bez dopuštění se závažné chyby uvažovat fyzikální vlastnosti litiny konstantní, a to po celý průběh jízdních režimů. Vlastnosti materiálu kuličkové litiny jsou tak převzaty z tabulky 9.*“ Není jasné, jaké mechanické hodnoty materiálu jsou použity pro MKP výpočet. V tab. 9 jsou uvedeny hodnoty pro 20 °C, avšak při dosažené teplotě cca 300 °C se například modul pružnosti mění a v MKP modelu se tato změna běžně zohledňuje.
- Str. 72. Diplomant uvádí: „Hodnoty součinitele přestupu tepla jsou převzaty z přílohy C.“ Následně se odvolává na graf závislosti součinitele přestupu tepla na teplotě a popisuje získání směrnice přímky použité pro definování závislosti součinitele přestupu tepla pro MKP analýzu. Domnívám se, že pro takto zásadní vstupní parametr by bylo vhodné uvést křivku přímo v diplomové práci s patřičnou citací a postupem získání závislosti součinitelů přestupu tepla. Navíc v diplomové práci je uvedena závislost převzata shodně pro obě sledované plochy (žebrování, rovinná plocha). Zde je otázkou, jestli je toto odpovídající, když pro obě plochy jsou v příloze C použity jiné vztahy pro podobnostní čísla.
- Str. 84. „*Absolutní maximum napětí je v místě otvoru pro šrouby, ale toto místo nebude hodnoceno (okrajové podmínky neodpovídají v tomto místě skutečnému stavu).*“ Zde diplomant zanedbal maximální hodnotu napětí v brzdovém kotouči s odůvodněním, které bych chápal v případě použití například vetknutí v místech děr pro šrouby. MKP model ale obsahuje tzv. fiktivní šrouby, kontakt a příruby. Při použití fiktivních šroubů by napětí v místě šroubových spojů mělo být korektní.
- U vyhodnocení pevnosti a únavy diplomant zanedbává zatížení vyvozené brzdovými destičkami (moment a tlaková síla) respektive napětí tímto zatížením vyvozené. Toto zatížení zohledňuje určitým zvýšením součinitelů bezpečnosti. Toto řešení nepovažuji za vhodné, vzhledem k faktu, že součinitelé bezpečnosti byly sice navýšeny ale nárůst nebyl nijak podložen ani zdůvodněn pouze konstatován. Zde bych očekával použití aktuálních metod jako je kumulace poškození a součtové podmínky.
- Na obrázcích zobrazujících napětí je zobrazeno ekvivalentní napětí von Mises (vždy kladná hodnota). Nicméně v práci je často pracováno se zápornou hodnotou napětí. Bylo by vhodné vykreslit přímo hlavní napětí tak, aby bylo zřejmé, kde působí tahové a kde tlakové napětí.

- V kap. 5.4 je uvedeno, že kontrola únavy bude provedena pro zcela odlišné jízdní podmínky, o kterých je pojednáno níže. Bohužel podkapitola o novém jízdním režimu zcela chybí. Pouze v podkapitole o okrajových podmínkách numerického modelu je jedna věta brždění z počáteční rychlosti 80 km/h do zastavení, bez jakéhokoliv dalšího upřesnění, proč byl tento režim zvolen apod.
- Na str. 61 je uvedeno: „*Obecně platí, že přibližně 90 % z celkového generovaného tepla je pohlceno brzdovým kotoučem a zbylých 10 % brzdovými destičkami.*“ Nemyslím, že toto rozdělení je obecně známý fakt a bylo vhodné uvést citaci zdroje ze kterého autor tuto informaci čerpal.

c) Normy zákonné ustanovení a předpisy.

Dle mého názoru diplomová práce odpovídá normám, zákonným ustanovením a předpisům. Veškeré prameny a zdroje jsou řádně citovány.

d) Formální náležitosti.

Předložená diplomová práce je logicky členěna s minimem překlepů (např. standart – standard). Jednotlivé kapitoly na sebe logicky navazují. K formální stránce nemám větší výhrady (pozor na dodržování názvosloví v celém textu např. brzdové desky – brzdové destičky).

Diplomová práce splňuje zadané požadavky.

e) Originální řešení vhodné pro autorské osvědčení, patent apod.

Domnívám se, že práce obsahuje konstrukční a výpočtová řešení nevyžadující patent.

f) Otázky k obhajobě diplomové práce.

1. Zajímá mě názor diplomanta, pokud by měl k dispozici CFD analýzu, tím by bylo zjištěno i přesnější chlazení, zda by vydržel namáhání i brzdový kotouč z litiny s lupínkovým grafitem?
2. Na straně 26 uvádíte, že v dnešní době je použití bubnových brzd postupně opouštěno. Proč se ale v nastupujících elektromobilech bubnové brzdy opět používají?
3. Mohl byste popsat, jak se liší konstrukční návrh kotoučové brzdy uvedený v diplomové práci od reálné kotoučové brzdy provozované na zvoleném osobním vozidle?

4. Jaké jste uvažoval vlastnosti materiálu pro MKP model?
5. Jaký jste použil objemový element pro MKP model a jaké má stupně volnosti v uzlech (viz Obr. 63 zakázání posuvu a dvou natočení)?
6. U zkoušky brzd za studena typu 0 na straně 19 uvádíte, že průměrná teplota brzd před zkouškou musí být nižší než 100°C. To znamená, že počáteční teplota kotouče před zahájením zkoušky může být i mírně nižší než 100°C. To ale může zásadním způsobem ovlivnit výslednou teplotu kotouče na konci brždění. Zohlednil jste toto při kontrole pevnosti, nebo jste v analýzách vždy vycházel z počáteční teploty 20 °C?
7. Při MKP analýze jste použil model s tloušťkou sniženou a maximální hodnotu opotřebení brzdového kotouče. Je ale známo, že u napětí způsobené teplotními dilatacemi je významný vliv tuhosti konstrukce. Navíc dle informací uvedených v diplomové práci napětí od teplotního zatížení převládá nad napětím vyvozeným mechanickým zatížením. Horší hodnoty napětí proto mohou vycházet u tužší konstrukce, která není opotřebená. Provedl jste výpočet i neopotřebeného brzdového kotouče?

### Hodnocení.

Z důvodu výše popsaných doporučuji diplomovou práci k obhajobě a hodnotím ji známkou.

**Velmi dobře „C“**

V Pardubicích dne 29. 5. 2024

Ing. Tomáš Jelínek.....