

## VYUŽITÍ FEM PŘI OPTIMALIZACI ŠROUBOVÝCH SPOJŮ

J. Žák

J. Hauptvogel

Technická univerzita v Liberci  
Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismu strojů  
Studentská 2, 461 17, Liberec, Česká republika  
[hauptvogel.jirka@seznam.cz](mailto:hauptvogel.jirka@seznam.cz)  
[jiri\\_zak@seznam.cz](mailto:jiri_zak@seznam.cz)

### Abstrakt

Tento článek se zabývá názornou ukázkou využití metody konečných prvků FEM při optimalizaci předepjatých šroubových spojů. Analyzován byl šroubový spoj mezi víkem a válcem vyvíjeného stacionárního motoru. V první fázi byl zmapován problém a provedena strukturální FEM analýza stávajícího stavu. Využitím klasické teorie šroubových spojů byla dále navržena optimální varianta uspořádání šroubového spoje. Tento návrh byl opět podroben FEM analýze a výsledky byly porovnány se stávajícím stavem. Článek názorně ukazuje efektivní přístup k optimalizaci šroubových spojů, který spočívá v kombinaci znalosti klasické teorie a využití moderních výpočtových metod.

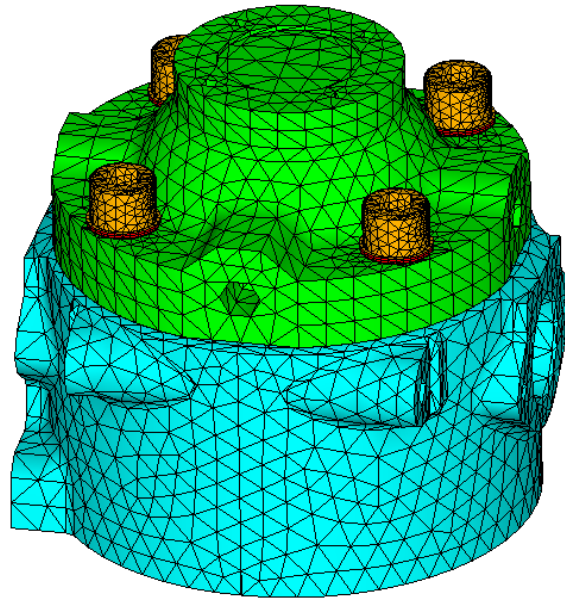
### 1. Úvod

Předmětem tohoto článku je analýza a optimalizace předepjatého šroubového spojení víka a válce vyvíjeného stacionárního motoru. Při zkoušení motoru docházelo k porušení pevnosti tohoto spoje, a proto byla Katedra částí a mechanismů strojů při TUL požádána o spolupráci při řešení tohoto problému. Cílem bylo zmapovat problém a navrhnout optimální uspořádání tohoto spoje při minimální zásahu do stávajících dílů víka a válce. Navrženou variantu bylo nutno ověřit výpočtem pomocí FEM a porovnat se stávajícím stavem.

### 2. Analýza současného stavu

#### Stavba FE modelu

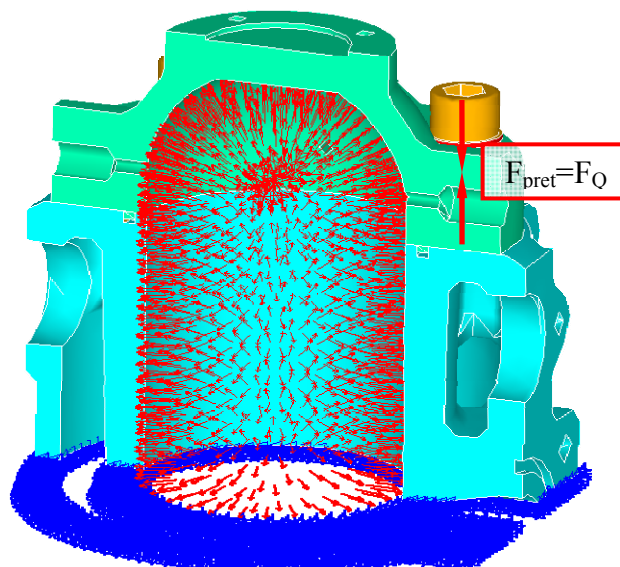
Na základě dodaných CAD dat a informací o reálných dílech byl sestaven FE model. Úloha byla řešena pomocí sw Ansys. Materiálové modely všech dílů sestavy byly lineárně elastické. Konečně – prvková síť je tvořena tetraedrovými elementy se středními uzly (typ SOLID187), dále kontaktními elementy zajišťujícími kontakt jednotlivých dílů sestavy (typ CONTA174 a TARGET170). Předepnutí šroubů bylo realizováno pomocí elementu typu PRET179. Závity šroubů byly modelovány pomocí sousých prstenců. Toto zjednodušení reálného tvaru závitu je na straně bezpečnosti, nosný průřez sousých prstenců je menší než reálný průřez závitu. FE model sestavy je znázorněn na následujícím obr. 1.



Obr. 1: FE model stávajícího stavu

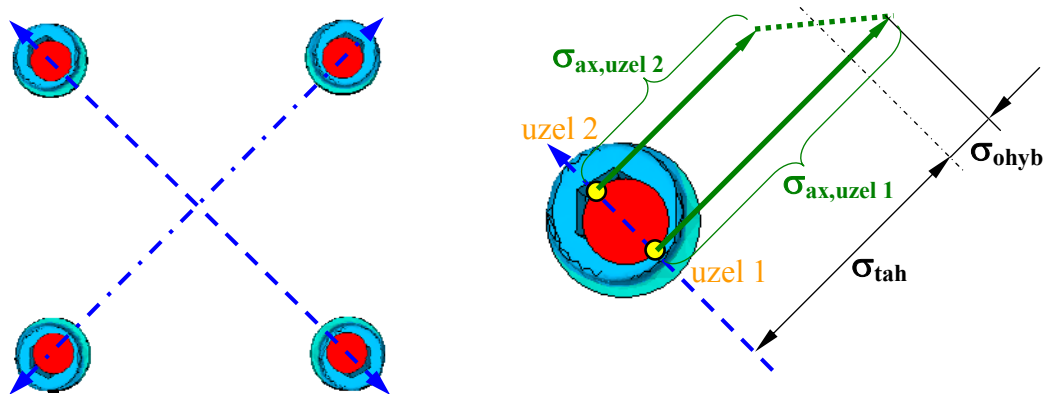
#### Okrajové podmínky a nastavení analýzy

V reálném provozu je sestava zatížena kombinovaným zatížením tlakem a teplotou, po dohodě se zadavatelem byl vliv teploty zanedbán. Definován tak byl tlak aplikovaný na vnitřní plochy válce a víka a dále kroutící moment předepínající šrouby. Předepnutí šroubů bylo vyřešeno následujícím postupem. V prvním kroku analýzy byly šrouby předepnuty axiálním posuvem 0,01 mm. Tím došlo k ustavení sestavy a k aktivaci kontaktů mezi jednotlivými částmi sestavy. Další krok výpočtu realizoval montážní zatížení, tedy vlastní předepnutí šroubů požadovanou silou ( $F_{\text{pret}}$ ). Závěrečný krok spočíval v nastavení provozního zatížení. Na vnitřní plochy byl aplikován tlak za současného působení předepínající síly. Tento postup rozdělení úlohy je standardní a je doporučován při řešení podobných typů analýz. Použité okrajové podmínky při provozním zatížení jsou patrné z následujícího obr.2:



**Obr. 2: Okrajové podmínky provozního zatížení  
Výsledky FE analýzy**

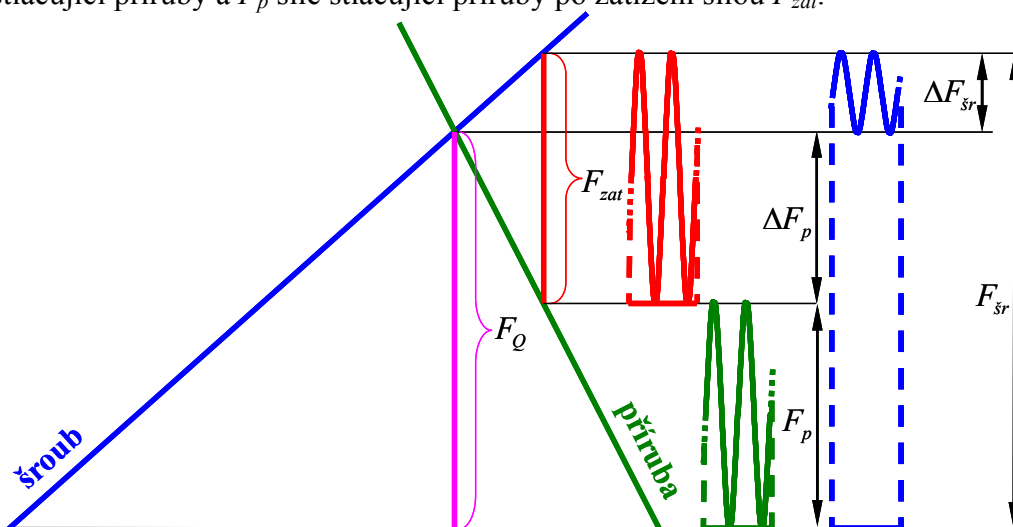
Po provedení výpočtu byla vyhodnocena velikost napětí v kritických místech šroubu, tedy pod hlavou a na prvním aktivním závitě šroubu. Porovnání s mezí kluzu použitého materiálu ukázalo, že může dojít ke vzniku plastických přetvoření. Dále byl vyhodnocen směr a velikost přídatného ohybového napětí ve šroubech (obr.3). Toto napětí bylo vzhledem k převažujícímu tahovému zatížení šroubů minimální, cca 2% velikosti tahového napětí v daném místě.



**Obr. 3: Stanovení směru a velikosti ohybového zatížení šroubu**

### 3. Optimalizace šroubového spoje

Vlastní optimalizace vycházela ze znalostí teorie předepjatých šroubů [1,2]. Na obr. 4 je znázorněn diagram předepjatého šroubového spoje, který přehledně popisuje silové působení ve šroubovém spoji. Síla  $F_Q$  v diagramu odpovídá síle předpětí ve šroubu, síla  $F_{zat}$  je zatěžující síla aplikovaná na šroub,  $\Delta F_{sr}$  odpovídá přírůstku zatížení šroubu,  $F_{sr}$  síle ve šroubu po zatížení,  $\Delta F_p$  úbytku síly stlačující příruby a  $F_p$  síle stlačující příruby po zatížení silou  $F_{zat}$ .



**Obr. 4: Diagram předepjatého šroubového spoje**

## VYUŽITÍ FEM PŘI OPTIMALIZACI ŠROUBOVÝCH SPOJŮ

Na základě výše popsaného diagramu byla hlavní úvaha při optimalizaci řešeného šroubového spojení následující. Z hlediska únavového zatížení je vhodné, aby kmitající složka osově síly ve šroubu  $\Delta F_{sr}$  byla, při stejné zatěžující síle  $F_{zat}$ , minimální. Tedy, aby čára značená „šroub“ byla co nejplošší  $\Rightarrow$  tuhost součástí  $c_{sr}$ , přitížených zatěžující silou  $F_{zat}$ , byla minimální.

Tuhost součástí přitížených při zatížení zatěžující silou  $F_{zat}$  lze charakterizovat také jako tuhost součásti namáhané tahem, tedy

$$c_{sr} \cong \frac{E \cdot S}{L}, \quad (1)$$

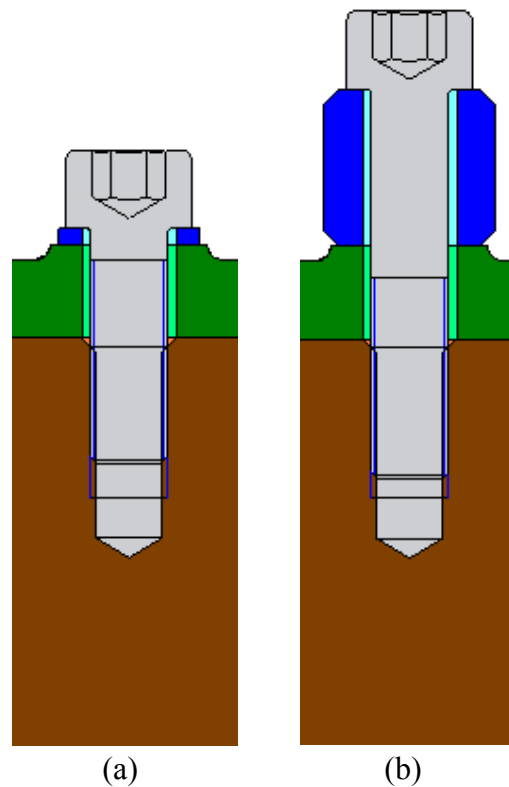
kde  $E$  je Youngův modul pružnosti materiálu [MPa],  $S$  je plocha průřezu tažené součásti [ $\text{mm}^2$ ] a  $L$  její délka [mm]. Jak je ze vzorce 1 patrné, snížení hodnoty  $c_{sr}$  lze dosáhnout snížením  $E$  a  $S$  a zvýšením  $L$ .

Na základě této úvahy byly navrženy následující úpravy varianty šroubového spoje:

- zeštíhlení šroubu,
- delší šroub a
- delší šroub v kombinaci s rozpěrnou trubkou.

Zmenšení modulu pružnosti v tahu  $E$  materiálu šroubu je také teoreticky možné, tato možnost však byla v tomto případě zavržena.

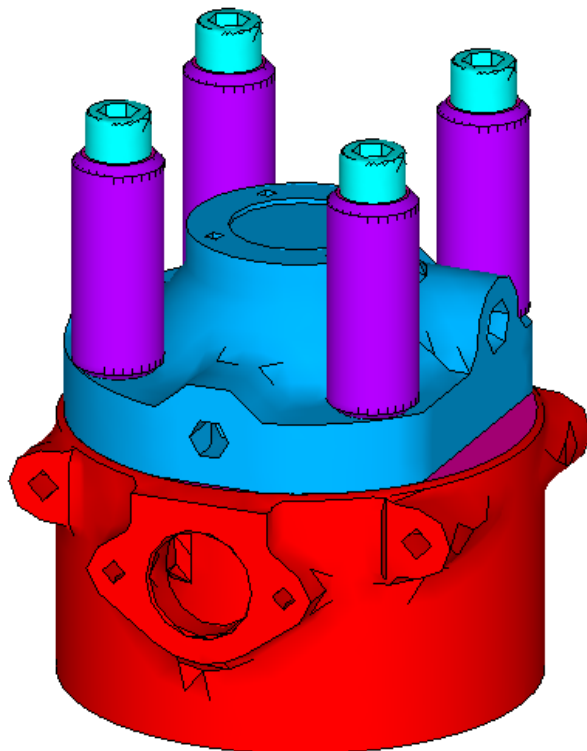
Po diskuzi se zadavatelem nad navrženými variantami byla jako ideální zvolena varianta s rozpěrnou trubkou. Důvod pro tuto volbu byl v její nízké technologické náročnosti, dále pro velký potenciál možných modifikací šroubu a trubky. Požadavek na nezměněný tvar odlitků válce a víka by také splněn. Původní a navržená varianta šroubového spoje je znázorněna na následujícím obr. 5:



Obr. 5: Původní (a) a navržená (b) varianta uspořádání šroubového spoje

## 4. Analýza navržené varianty

Tvorba FE modelu, definování okrajových podmínek a nastavení průběhu výpočtu bylo totožné jako při analýze stávajícího stavu. FE model navržené varianty je znázorněn na obr. 6:



Obr. 6: FE model navržené varianty

## 5. Vyhodnocení a porovnání výsledků optimalizace

Provedenou analýzou s využitím FEM bylo zjištěno, že nově navržená varianta oproti původnímu uspořádání vykazuje:

- cca 5% úbytek maximálního ekvivalentního napětí v prvním aktivním závitu šroubu,
- cca 50% snížení kmitající složky osového zatížení šroubu  $\Delta F_{sr}$ , způsobené tlakovým zatížením uvnitř válce.

Rozložení a konkrétní hodnoty ekvivalentního napětí nebudou na přání zadavatele publikovány.

## 6. Závěr

Optimalizací šroubového spojení válce a víka bylo dosaženo požadovaného snížení napětí a navržená varianta byla zadavatelem akceptována. Ukázalo se, že nasazení moderních výpočtových metod, v kombinaci s odpovídající znalostí teorie příslušného problému, je efektivní nástroj konstruktérů při řešení optimalizačních úloh šroubových spojů.

## VYUŽITÍ FEM PŘI OPTIMALIZACI ŠROUBOVÝCH SPOJŮ

### Literatura

- [1] Pešík, L. Části strojů – 1.díl, TU v Liberci: Liberec, 2008  
[2] Hosnedl S., Krátký J. Příručka strojního inženýra, CPress: Brno, 1999

Doručeno redakci: 14. 4. 2009

Recenzováno: 16. 6. 2009

Schváleno k publikování: 23. 6. 2009

## USING FEM FOR SCREW CONNECTION OPTIMIZATION

This paper deals with an illustration of the finite element method (FEM) application to the optimization of the preloading screw connection. The screw connection between the stationary engine housing cap and a cylinder is analyzed. In the first stage the problem was mapped, and the current state was computed while using FEM. By using the classic theory of the pre-tensioned screw connection, an optimum form of the connection was designed. This variation was controlled by FEM, and the results were compared with the previous state. This paper shows in detail an effective approach to optimization of the screw connection where a combination of knowledge of the classic theory and usage of modern computational method is applied.

## ANWENDUNG DER FEM BEI DER OPTIMIERUNG VON SCHRAUBENVERBINDUNGEN:

Der Artikel zeigt in einem anschaulichen Beispiel, wie die Finite-Element-Methode bei der Optimierung von vorgespannten Schraubverbindungen eingesetzt werden kann. Analysiert wurde eine Schraubverbindung zwischen Motorblock und Zylinderkopf eines zu entwickelnden Stationärmotors. In der ersten Phase wurde der Sachverhalt festgestellt und eine strukturelle FEM-Analyse des bestehenden Zustands vorgenommen. Unter Anwendung der klassischen Theorie der Schraubverbindungen wurde anschließend eine optimale Variante der Gestaltung der Schraubverbindung entworfen. Dieser Entwurf wurde erneut einer FEM-Analyse unterzogen und das Ergebnis mit dem bestehenden Zustand verglichen. Der Artikel zeigt anschaulich das effektive Vorgehen bei der Optimierung von Schraubverbindungen, die in der Kombination der Kenntnisse der klassischen Theorie und Anwendung moderner Berechnungsmethoden besteht.

## WYKORZYSTANIE METODY FEM W OPTYMALIZACJI POŁĄCZEŃ GWINTOWYCH:

Niniejszy artykuł przedstawia przykładowy sposób wykorzystania metody elementów skończonych (FEM) w optymalizacji połączeń gwintowych. Analizie poddano połączenie gwintowe między wiekiem i bębniem projektowanego silnika stacjonarnego. W pierwszym etapie zdefiniowano problem i przeprowadzono strukturalną FEM analizę istniejącego stanu. Następnie, w drodze zastosowania klasycznej teorii połączeń gwintowych opracowano optymalny wariant układu połączenia gwintowego. Ten układ ponownie poddano analizie FEM a wyniki porównano ze stanem istniejącym. Artykuł stanowi poglądową prezentację efektywnego podejścia do optymalizacji połączeń gwintowych, które polega na połączeniu wiedzy teorii klasycznej z wykorzystaniem nowoczesnych metod obliczeniowych.