

# E xperimentální A nalýza N apětí

## 2004

### INNOVATION OF A BOLT CONNECTION

#### INOVACE ŠROUBOVÉHO SPOJE

Jan Moravec<sup>1</sup>, Stanislav Hosnedl<sup>2</sup>

*In this report we can read to use new design method of Theory of Technical Systems (TTS) and practical application in a bolt connection. The model was aimed at analyse and numerical computation of bolt connection, mainly on critical areas, i.e. contact between nut and base ground material and between nut and screw. The CAD model together with mesh were created in program I-DEAS. The mechanical stresses were computed in program ANSYS (method FEM) with goal to increase the mechanical property of the bolt connection. At the end of the report are summarised the benefits and results of the work together with their practical application.*

**Keywords** *Theory of Technical Systems, bolt connection, CAD, FEM, I-DEAS, ANSYS.*

**Klíčová slova** *Teorie Technických systémů, CAD, FEM, I-DEAS, ANSYS..*

### Rozbor situace

Šroubové spojení jako spojovací strojní část je jedno z nejpoužívanějších v technice. Šroubové spojení s předpětím se využívá hlavně na demontovatelné, silově namáhané spojení součástí. Podrobnější analýza šroubového spojení ukáže velké množství vlastností, které omezují jeho použití. Jedna z nich je snížení únosnosti šroubového spoje vlivem nerovnoměrného rozložení přenášené síly na jednotlivých závitech.

Při výpočtu únosnosti závitu se zpravidla zjišťuje počet závitů matice potřebných k přenesení daného zatížení. Přitom se předpokládá, že zatížení na závitech bývá rovnoměrně rozloženo. Aby tento předpoklad byl alespoň zčásti splněn, je nutno šroubové matice upravit. Není-li matice upravena, přenáší první závit přibližně 40% [1,2] celého zatížení šroubu. Pokud se závity namáhané klidným tahem v ose šroubu kontrolují výpočtem, zjišťuje se:

- pevnost závitů **na otláčení**, pevnost závitů **na ustřížení**, pevnost závitů **v ohybu**

Výpočet únosnosti závitů se dělá zpravidla pouze pro šrouby pohybové nebo speciální. Pro normalizované spojovací šrouby ze základní řady je výška matice i závit přizpůsoben únosnosti šroubu vyplývající zejména z únosnosti jeho díku.

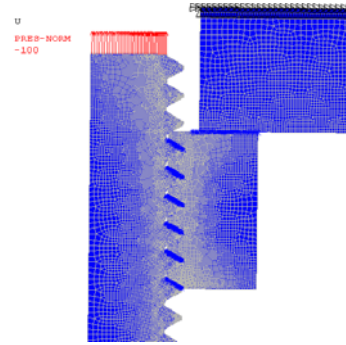
---

<sup>1</sup> Ing. Jan Moravec, Ph.D.: Západočeská Univerzita Plzeň, Fakulta strojní, Katedra konstruování strojů; Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, ČR, tel.: +420 377 634 705, e-mail: jan\_moravec@email.cz

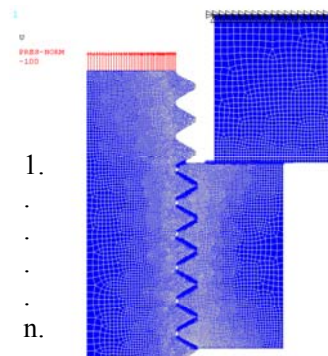
<sup>2</sup> Prof. Ing. Stanislav Hosnedl, CSc.: Západočeská Univerzita Plzeň, Fakulta strojní, Katedra konstruování strojů; Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, ČR, tel.: +420 377 638 266, e-mail: hosnedl@kks.zcu.cz

## Šroubový spoj normalizovaný M10

Řešení kritického místa na šroubu (koncentrace napětí v závitě) jsme prováděli výpočtem pomocí metody MKP, kde byl modelován šroub se závitem M10 a stoupáním závitu  $s = 1,5$  mm normalizovaná matice stejného závitu a jedna část příruby. Model byl připraven jako rotačně symetrický tj. nebylo zde reálně uvažováno stoupání závitu podél dříku. Inovace dosedací plochy matice šroubu byla řešena geometrickým modelováním se změnou parametrů a opětovným výpočtem s hodnocením výsledků. Vlastní modelování bylo provedeno v programu I-DEAS MS9 společně s vysítováním. Poté byl celý model přenesen do programu ANSYS 6.1. U vysítovaného výpočetního modelu byly nejprve nadefinovány kontaktní prvky, potom byl model uchycen což představuje zachycení příruby pod maticí, a zatížen jmenovitým tlakem  $P = 100$  MPa na dříku šroubu (Obr. 1). Tento zatěžovací stav je nastaven na všechny varianty a je porovnáváno chování šroubu, matice a příruby na vznik koncentrace napětí. Materiál je zde použit s konstantním modulem pružnosti  $E_{s,m,p} = 2,1 \cdot 10^5$  MPa a Poissonovo číslo 0,3 tj. lineární. Po vypočtení modelu byla provedena kontrola přenosu sil a analýza přenášené síly na závit. Vše bylo zapisováno do grafu, který porovnává závislosti tvaru šroubové matice na zatížení a na přenášené síle v závitě. Při analýze výpočtů MKP modelů bylo zjištěno, že matice se v místě posledních závitů natáčí, tím dochází k oboustrannému kontaktu mezi maticí a šroubem. Tato skutečnost byla proto v dalších výpočtech zohledněna vytvořením plné kontaktní vazby na dosedacích závitech matice se šroubem. Při dalších výpočtech jsme se potom zaměřili také na analýzu této skutečnosti a kontrolu závitů i z tohoto hlediska. Zjištění natáčení celé matice ještě nebylo popsáno v žádné odborné literatuře, a tak bychom rádi tímto postupem rozšířili pohled na chování zatíženého šroubového spoje. Pro porovnání možných změn ve výpočtu jsme proto provedli u všech variant vždy dva výpočty jak s plným kontaktem (Obr. 2), tak s kontaktem pouze pro přenos síly ve směru od šroubu na matici. Důvod pro tento postup je hlavně v porovnání nepřesností mezi jednotlivými výpočty a pak pro srovnání výpočtů MKP s výpočtem pro namáhání šroubů v literatuře používaným tj. podle Maduschky, který ovšem nepostihuje deformace samotných závitů, ale modeluje závit jako prsten u matice a válec u šroubu. Tato užitá zjednodušení však při kompletním výpočtu metodou MKP způsobují dosti velké odchylky, a tak byl pro závěrečné vyhodnocování výsledků preferován způsob s podrobnějším a přesnějším výpočtem a to metodou MKP. Zřetelný rozdíl je pro výsledky výpočtu na posledním závitě mezi variantou s přenosem sil pouze mezi šroubem a maticí (pro další potřeby je zkráceně nazván **přenos síly šroub-matice (SM)**) a mezi plným kontaktním přenosem (jenž je také pro další potřeby zkráceně nazván **přenos síly šroub-matice-šroub (SMS)**) podrobně popsán v [3].



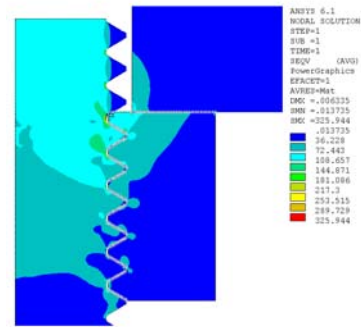
Obr. 1 Modely šroubu s kontaktem na polovině závitu matice



Obr. 2 Modely šroubu s plným kontaktem

## Šroubový spoj normalizovaný M10, s otvorem v přírubě $\varnothing d = 10,5$ mm

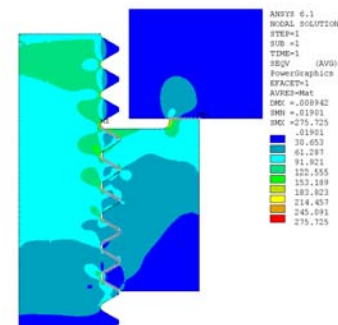
Aby se získala představa jak stoupne napětí na šroubu při otvoru v přírubě průměru  $\varnothing d = 10,5$  mm, provedl se výpočet pro toto geometrické uspořádání. Z Obr. 3, který je upraveným modelem zmíněné geometrické modifikace otvoru příruby na průměr  $\varnothing d = 10,5$  mm a nastaven přenos síly šroub matice šroub je vidět, že maximální redukované napětí na šroubu je 326 MPa a max. deformace 0,0063 mm (Obr. 3). Na základě vykresleného rozložení redukovaného napětí se ukazuje, že v modelované sestavě jsou nejvíce zatěžovány první dva závity matice. Pro návrh šroubového spoje je tedy správný předpoklad že pokud použijeme klasický ocelový šroub a normalizovanou ocelovou matici musíme předpokládat, že napětí ve šroubovém spoji vzroste zhruba na 3,3 násobek napětí v dřívku šroubu. Získané závěry z publikací [3] ukazují, že čím větší bude otvor pro šroub v přírubě, bude napětí na šroubu menší a následně celý šroubový spoj přeneše větší sílu. S tímto ovšem mohou vzniknout určité problémy z hlediska vedení šroubu a jeho správného umístění. Zvětšovat neúměrně otvor v přírubě by bylo velmi riskantní jak z pohledu velikosti dosedací plochy matice, tak z pohledu správného zajištění a vedení šroubu v otvoru. Zde bychom opustili normalizované geometrické rozměry a na základě TTS provedeme inovaci s úpravou šroubového spoje, a to tak aby upravená konstrukce šroubového spoje byla využitelná jak pro stávající díly (šroub, příruba atd.), tak aby obsahovala co možná nejméně technologických operací, a tím i finančních nákladů na svou realizaci.



Obr. 3 Model šroubu s otvorem v přírubě  $\varnothing d = 10,5$  mm

## Modifikace šroubového spoje

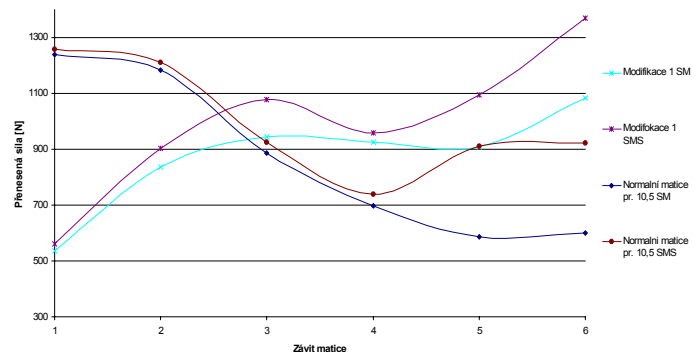
Inovace šroubového spoje by měla být tedy taková, že by využila poznatku o natočení matice a rozložení přenášené síly na závit bez ohledu jaký otvor je v přírubě. Ideální řešení: přesný otvor pro přesné vedení šroubu a tím zajištěné dosedací plochy šroubového spoje a velké natočení matice pro co možná největší přenos sil. Užitím principu dynamičnosti provedeme geometrické upravení dosedací plochy a to ubráním materiálu na matici a vytvořením dosedacího prstence, který bude matici natáčet nezávisle na velikosti a tvaru přírubového otvoru. Podmínku, kterou zde musíme splnit je dostatečná dosedací plocha pro přenos síly do příruby. Výpočet a analýza modelu šroubového spoje s úpravou dosedací plochy u matice ukázala, jaké možnosti se v řízeném natočení matice skrývají. Na Obr. 4 je znázorněn šroubový spoj s upravenou dosedací plochou matice a nastaveným přenosem sil šroub-matice-šroub, kde vidíme velký pokles maximálního redukovaného napětí na 272 MPa a zvýšení deformace na 0,009 mm, což se dalo očekávat. Na obrázku dokonce rozeznáme rozložení napětí na jednotlivých závitech před maticí, které nejsou nosné a kde dochází ke koncentraci napětí pouze vlivem vrubového účinku geometrie. Vlivem geometrie závitu je koncentrace napětí v této části zhruba 2,5 násobkem zatěžovacího napětí. Je také zřetelné rozložení napětí podél prvního zubu závitu šroubu v matici a vysoký gradient vedoucí směrem ke středu šroubu. Zde také nejčastěji dochází ke vzniku trhliny a následné destrukci šroubu.



Obr. 4 Upravený modifikovaný spoj

## Hodnocení inovace šroubového spoje

Přenášená síla na závit byla geometrickou modifikací upravena tak, aby byl přenos maximální na posledních závitech. Takto docílené rozložení přenášené síly je vhodné i pro šroub, protože je zde snižováno maximální napětí na šroubu a deformace šroubu je plynule rozložena podél celého přenosu s maticí. Deformace matice, která zde dovoluje plynulé rozložení přenášené síly na jednotlivé závity (Obr. 5), v tomto případě dosahuje rozložení dokonce opačné, tj. první zatěžovaný závit přenáší menší sílu a poslední závit přenáší sílu větší. Na Obr. 5 je také vidět rozdíl na stejném geometrickém modelu a různých kontaktních prvcích pro přenos zatěžovací síly ze šroubu na matici. Úprava dosedací plochy matice se jeví jako velmi vhodný nástroj pro upravení šroubového spoje bez nároků na dodatečné úpravy na ostatních částech šroubového spoje. Také při tomto upravení matice můžeme provést rychlou záměnu původní matice za nově upravenou matici. Z hlediska užití je princip natočení matice velmi vhodný právě díky vzniku natočení pouze při utahování a užívání velké předepínací síly. Informace a výpočty, které jsou zde uvedeny rozšiřují oblast zabývající se výpočtem a návrhem šroubů a to nejen normalizovaných, ale i speciálních.



Obr. 5 Grafické znázornění přenášené zatěžovací síly přes jednotlivé závity, kde SM znamená přenos šroub-matice, a SMS přenos šroub-matice-šroub

## Závěr

Jedná se o inovační příklad, který řešil úpravu normalizovaného šroubového spoje, jako strojní součásti dlouho známé a lety prověřené konstrukce. Zde jsme inovaci postavili na skutečnosti, že dochází při zatěžování šroubového spoje k natočení matice v osovém řezu. Tato skutečnost nebyla dosud publikována. V této oblasti zatím nebyl proveden žádný výzkum vedoucí ke zlepšení vlastností šroubového spoje. V článku je zjednodušeně popsán princip natočení matice, který značně ovlivňuje přenos síly mezi šroubem a maticí.

Tento článek vznikl za finančního přispění MŠMT v rámci Výzkumného záměru MSM232100006.

## Literatura

- [1] POSPÍŠIL, F. *Závitová a šroubová spojení* - Praha, SNTL, 1968
- [2] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojního inženýra* - Brno, Computer Press, 1999.
- [3] MORAVEC, J., *Rozvoj a využití teorie technických systémů v oblasti výrobní techniky*, Disertační práce, Plzeň, ZČU, 2003