



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola technická Brno, Sokolská 1

Šablona: Inovace a zkvalitnění výuky prostřednictvím ICT

Název: Spoje a spojovací součásti

Téma: Pevnostní výpočet šroubů

Autor: Ing. Magdalena Svobodová

Číslo: VY_32_INOVACE_13 – 07

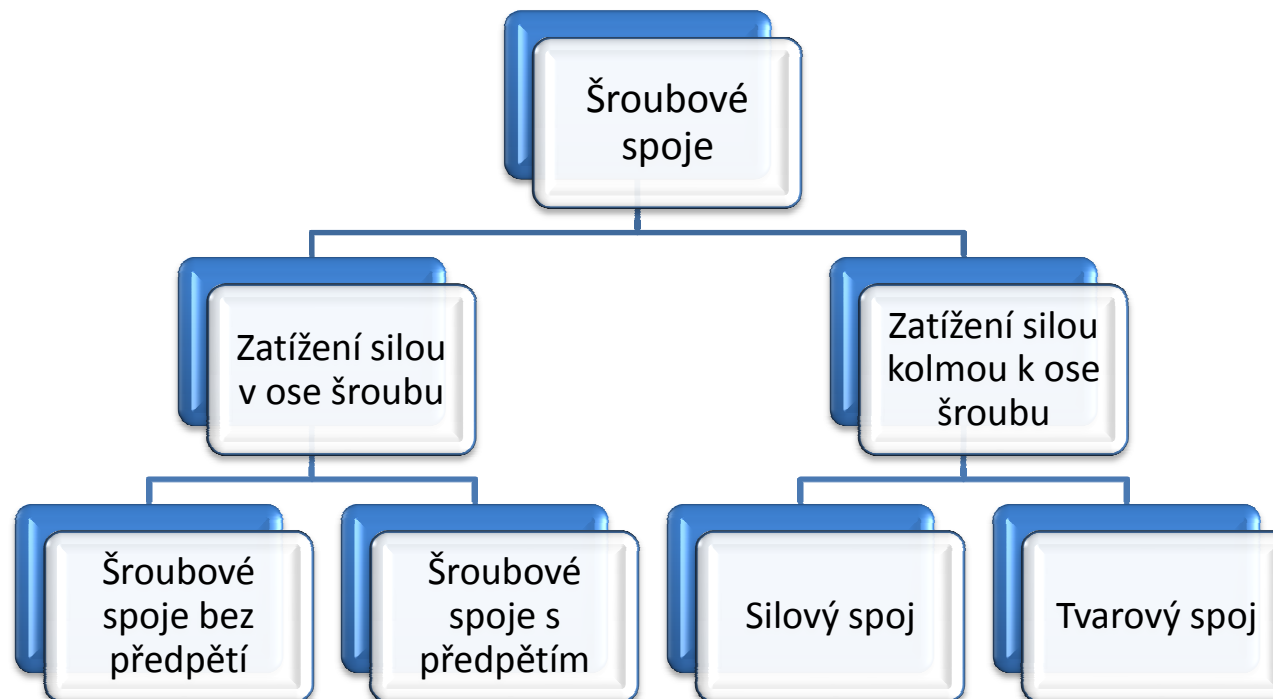
Anotace: *Rozdělení šroubových spojů podle způsobu namáhání. Pro jednotlivé způsoby namáháním je uveden pevnostní výpočet. U předepjatých spojů jsou uvedeny diagramy předepjatých spojů a je naznačen výpočet tuhosti šroubů i spojovaných materiálů.*

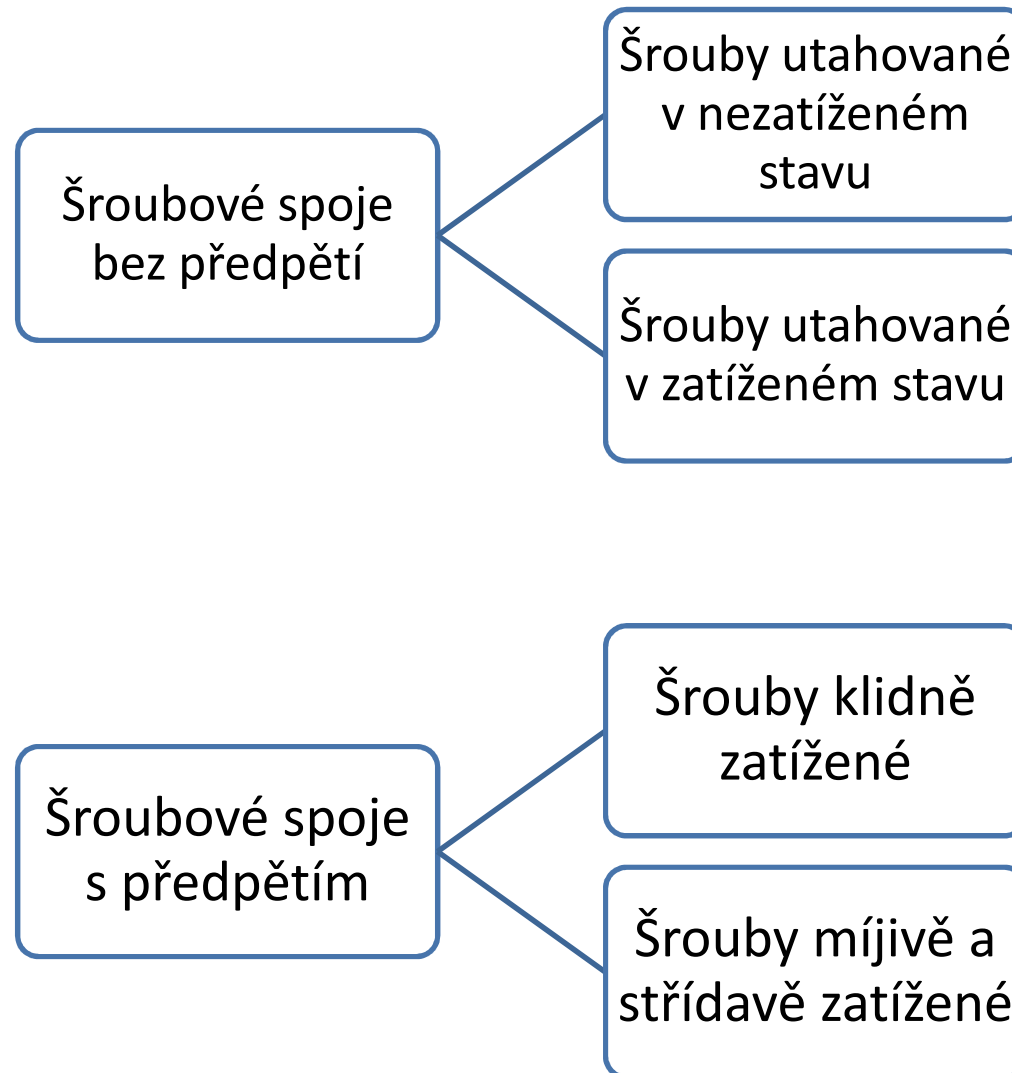
DUM je určen pro studenty druhého ročníku strojírenských oborů.

Vytvořeno: červenec 2012

ROZDĚLENÍ ŠROUBOVÝCH SPOJŮ PODLE ZPŮSOBU NAMÁHÁNÍ

Způsob pevnostního výpočtu spojovacích šroubů se liší podle směru vnější síly, která spoj namáhá, podle velikosti předpětí, způsobu utahování šroubového spoje a charakteru zatížení. Základní rozdělení je patrné z následujícího diagramu.





Šrouby zatížené silou v ose šroubu, bez předpětí, utahované v nezatíženém stavu

Šroub je namáhán na tah provozní silou. Při návrhu tedy vycházíme z tahového namáhání výpočtového průřezu šroubu. V případě, že nelze použít normalizované matice je nutná kontrola tlaku v závitech a výpočet výšky matice. Příkladem spoje je jeřábový hák.

$$\sigma_t = \frac{F}{S_V} \leq \sigma_{Dt} \Rightarrow S_V = \frac{F}{\sigma_{Dt}}$$

Výpočtový průřez šroubu:

$$S_V = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2$$

Dle vypočteného průřezu vyhledáme v normě nejbližší vyšší normalizovaný závit.

U nenormalizovaných matic – počet závitů matice:

$$p = \frac{F}{\pi \cdot D_2 \cdot n \cdot H_1} < p_D \Rightarrow n = \frac{F}{\pi \cdot D_2 \cdot H_1 \cdot p_D}$$

Nosná výška závitu „H₁“:

$$H_1 = \frac{d - D_1}{2}$$

n	(-)	počet závitů matice
H ₁	(mm)	nosná výška závitu
p _D	(MPa)	dovolený tlak v závitech
D ₂	(mm)	střední průměr závitu matice
D ₁	(mm)	malý průměr závitu matice
p	(MPa)	tlak v závitech
p _D	(MPa)	dovolený tlak v závitech
m	(mm)	výška matice

Výška matice „m“:

$$m = n \cdot P_h$$

Šrouby zatížené silou v ose šroubu, bez předpětí, utahované v zatíženém stavu

Šroub je namáhán na tah provozní silou a utahovacím momentem na krut. Proto musíme počítat redukované napětí a to porovnávat s dovoleným napětím. Příkladem tohoto spoje jsou napínací šrouby.

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau_k^2} \leq \sigma_D$$

M_U (Nmm) utahovací moment
 W_k (mm³) modul průřezu v krutu

$$\sigma_t = \frac{F}{S_V}$$

$$W_k = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16}$$

$$\tau_k = \frac{M_U}{W_k}$$

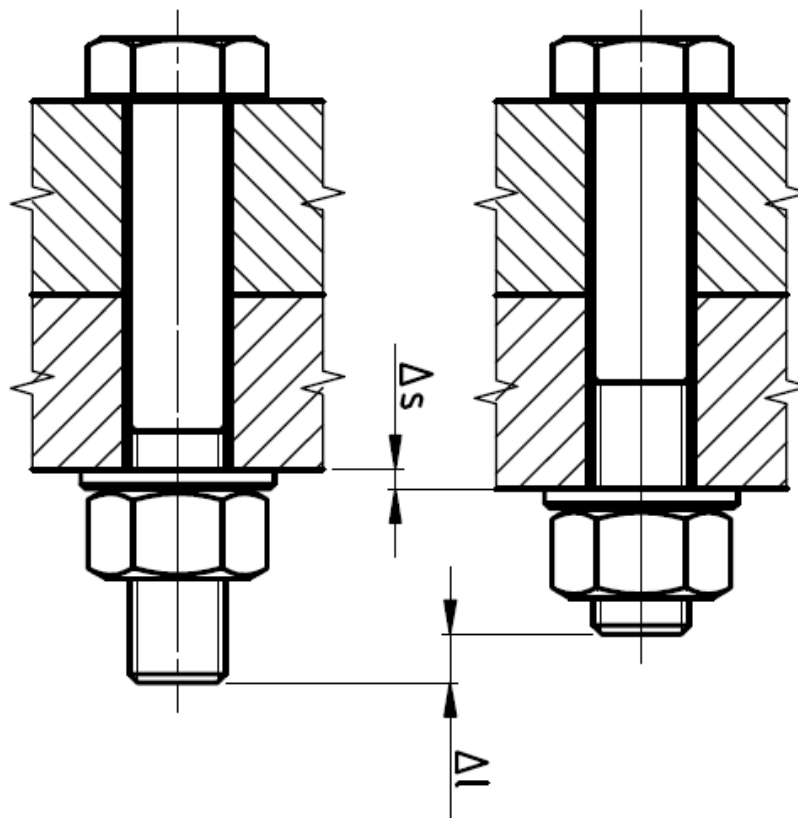
$$M_U = \frac{F \cdot d_2}{2} \left[\frac{P_h \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \pi \cdot f \cdot d_2}{\pi \cdot d_2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - f \cdot P_h} \right]$$

Někdy lze při návrhu šroubového spoje s normalizovanými šrouby využít zjednodušeného vztahu pro výpočtový průřez šroubu:

$$S_V = \frac{F}{0,75 \cdot \sigma_D}$$

Šroubové spoje s předpětím

Při utahování šroubu (matice) dochází k prodlužování šroubu (Δl) a stlačování spojovaných součástí (Δs), ve šroubu se vyvozuje síla předpětí.



Podložky zabraňují pěchování okrajů díry a tím snižují sedání spoje (menší pokles předpětí).

Závislost sil a deformací znázorňuje montážní a pracovní diagram předepjatého spoje. Provozní síla, kterou je předepjatý spoj zatížen může mít v čase konstantní velikost nebo se její velikost v čase mění.

Diagram předepjatého spoje s konstantní velikostí provozní síly F :

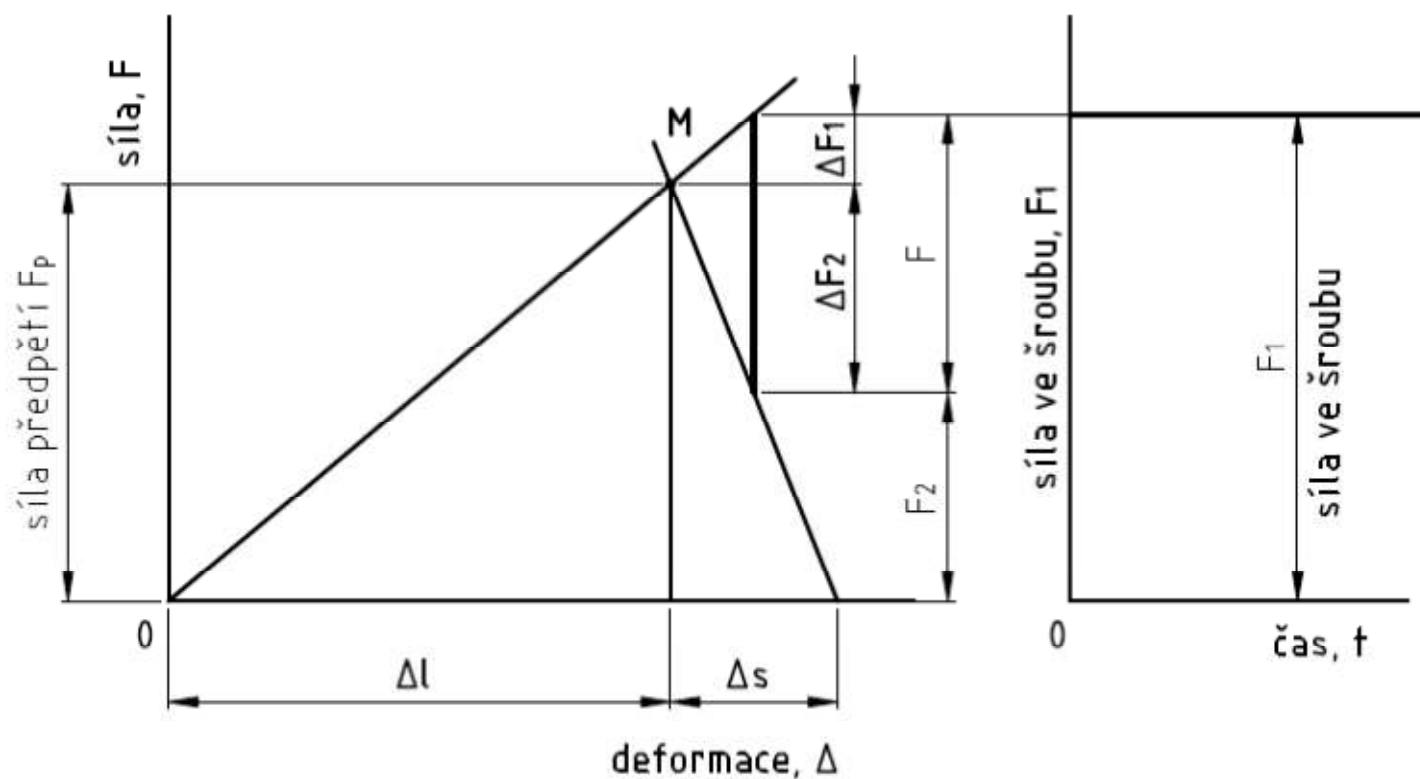


Diagram předepjatého spoje se zatížením mívjvým cyklem v tahu:

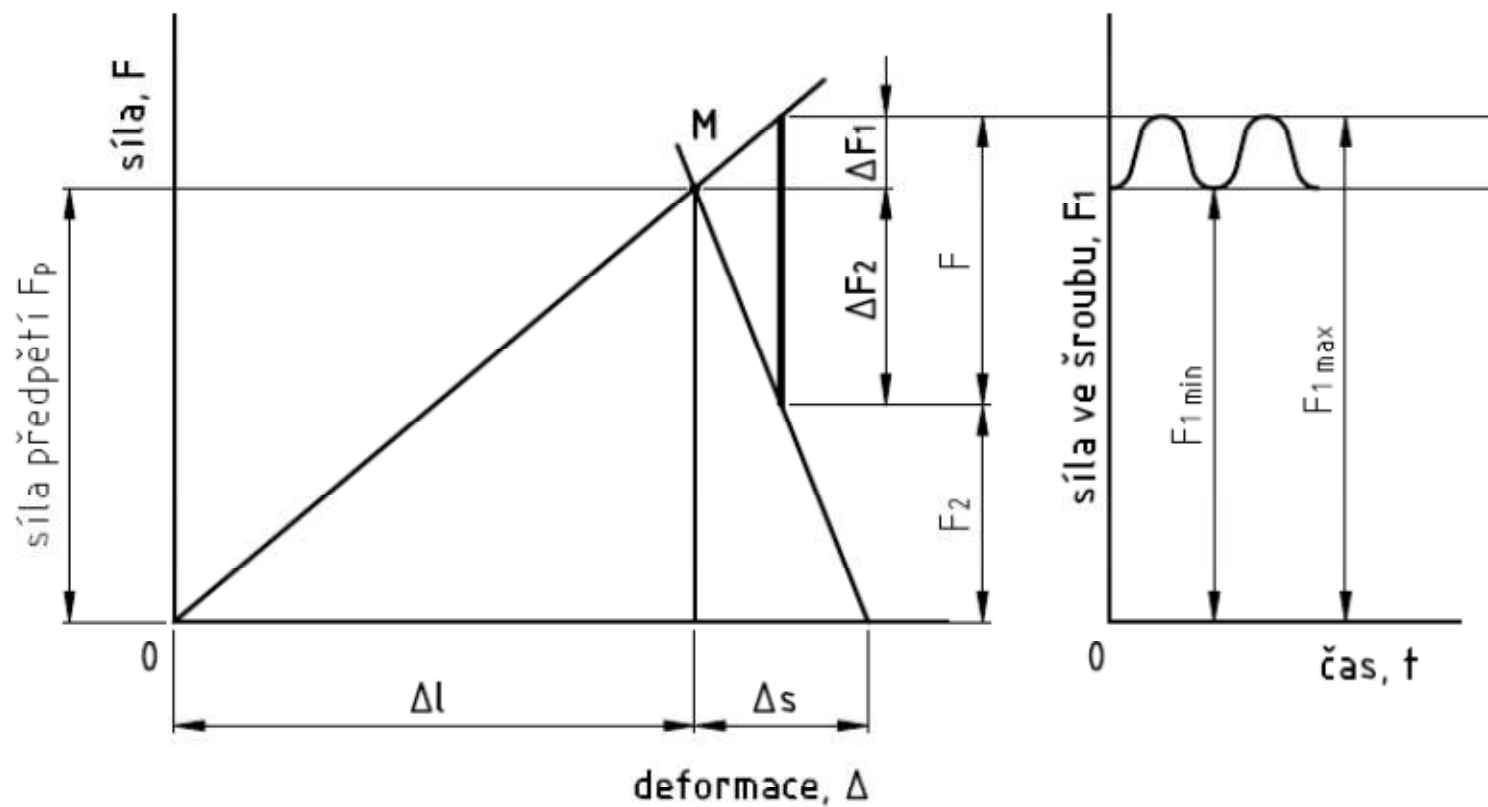
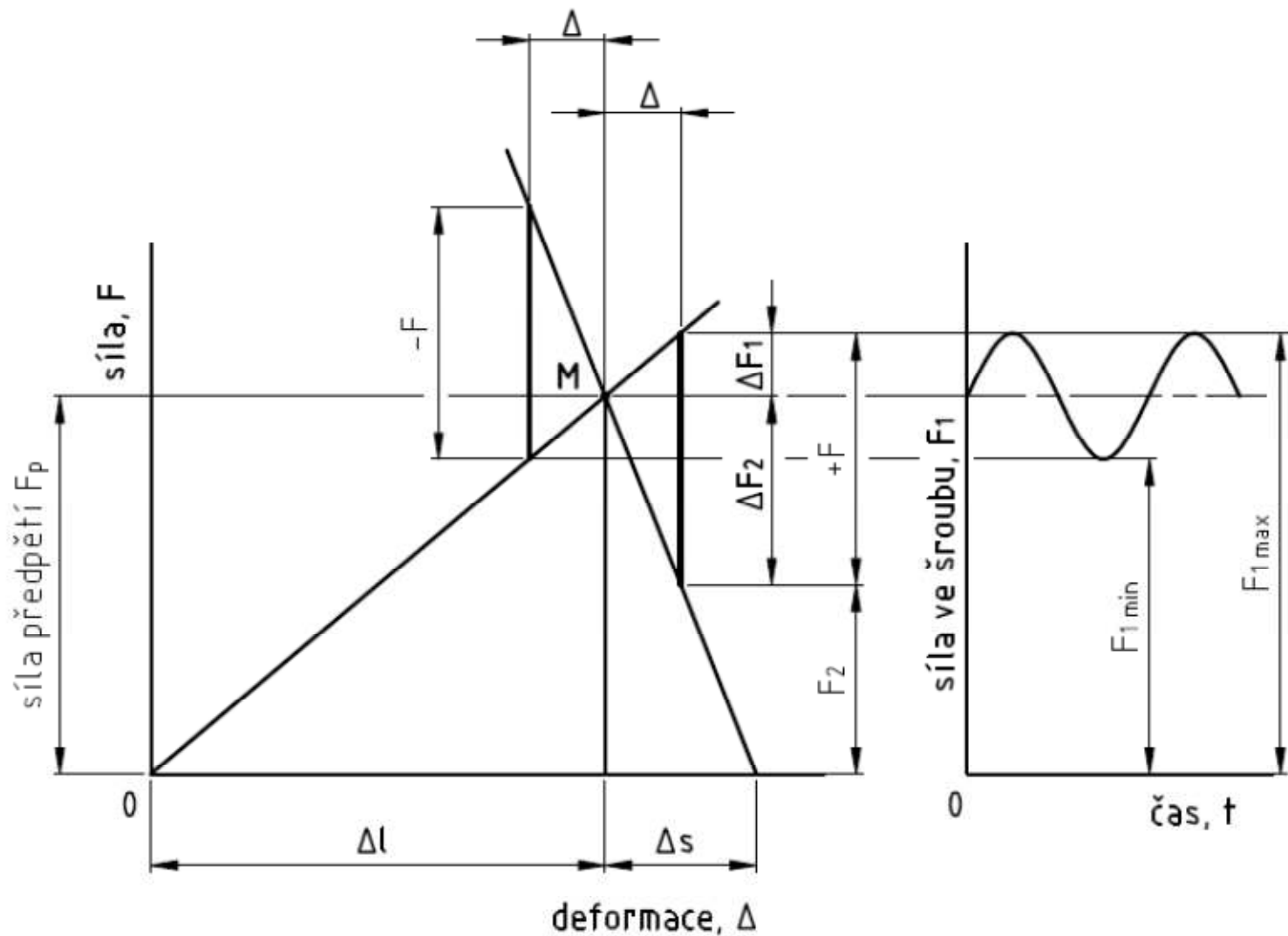


Diagram předepjatého spoje se zatížením souměrným střídavým cyklem v tahu:



Použité označení:

F	(N)	provozní síla
F_p	(N)	síla předpětí
F_1	(N)	výsledné silové zatížení šroubu v provozním stavu
F_2	(N)	výsledné silové zatížení spojovaných součástí v provozním stavu
ΔF_1	(N)	přírůstek síly ve šroubu v provozním stavu
ΔF_2	(N)	úbytek síly ve spojovaných součástech v provozním stavu
Δl	(mm)	deformace šroubu – prodloužení
Δs	(mm)	deformace spojovaných součástí – stažení

Platí:

$$F_1 = F_p + \Delta F_1$$

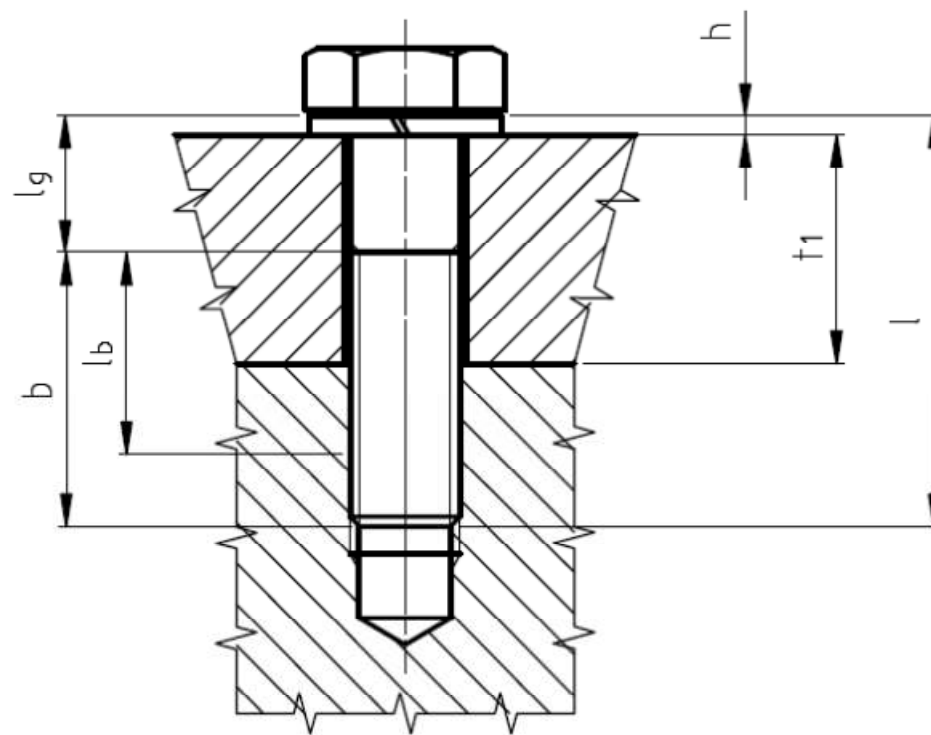
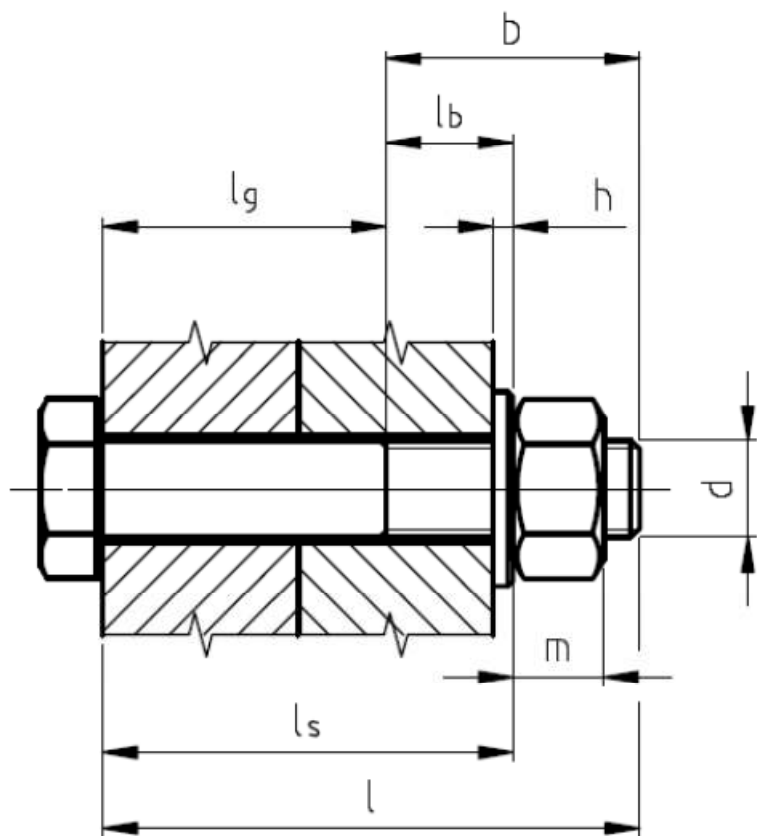
$$F_2 = F_p - \Delta F_2$$

Přesný výpočet předepjatých šroubových spojů počítá s tuhostí šroubů a spojovaných součástí. V daném případě počítáme s lineárním průběhem tuhosti. Tuhost je tedy poměr mezi silou působící na součást a deformací způsobenou touto silou. Lze využít rovnice pro tuhost:

$$k = \frac{S \cdot E}{l}$$

Dle doporučeného postupu pro určení tuhosti šroubu s metrickým závitem ISO je nutné stanovit svěrnou délku šroubu. Svěrná délka (l_s) je vzdálenost mezi dosedací plochou pod hlavou šroubu a pod maticí. U spojů se zašroubovaným šroubem se stanovuje účinná svěrná délka (l'_s).

Tuhost šroubu



Výpočtová tuhost šroubu v oblasti sevření:

$$k_S = \frac{S_d \cdot S_V \cdot E}{S_d \cdot l_b + S_V \cdot l_g}$$

S_d plocha průřezu válcové části dřívku bez závitů
 S_V výpočtový průřez šroubu
 E modul pružnosti v tahu

Výpočtový průřez šroubu:

$$S_V = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2$$

Plocha průřezu S_d :

$$S_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

U zašroubovaných šroubů platí pro určení účinné svěrné délky následující vztahy:

$$l'_S = l_g + l_b$$

Je-li délka zašroubování menší než průměr šroubu:

$$l'_S = t_1 + h + \frac{t_2}{2}$$

t_2 délka závitů ve spojovaném materiálu

Je-li délka zašroubování větší nebo rovna průměru šroubu:

$$l'_S = t_1 + h + \frac{d}{2}$$

Tuhost spojovaných součástí v oblasti sevření

Tuhost spojovaných součástí nelze přesně určit jinak než experimentem. Bylo experimentálně potvrzeno, že spojované součásti lze nahradit komolými kuželami s konstantním vrcholovým úhlem (odborná literatura uvádí rozmezí pro vrcholový úhel $25^\circ \div 45^\circ$). Výpočty tuhostí spojovaných součástí s pomocí metody konečných prvků nejlépe souhlasí s výpočtem tuhosti při hodnotě vrcholového úhlu $\alpha=30^\circ$. Podstavy kuželů leží v polovině svěrné délky. Metodu náhrady komolými kuželami lze použít pouze v případě, kdy průřez spojovaných součástí kolem šroubu je větší než dvojkůžel. Když dvojkůžel zasahuje mimo materiál, bereme v úvahu pouze tu část dvojkůžele, která leží ve spojovaných součástech.

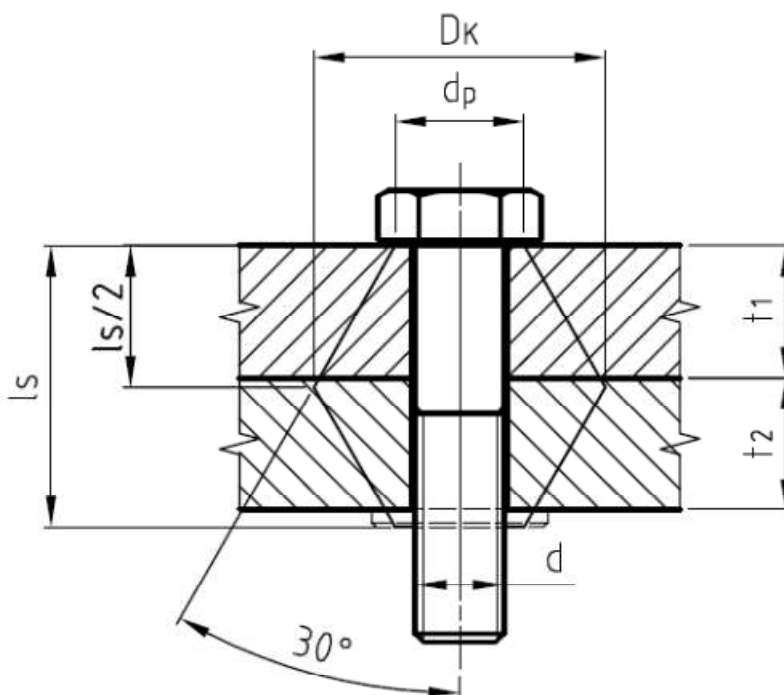
Pro tuhost spojovaných součástí při vrcholovém úhlu kužele $\alpha=30^\circ$ platí:

$$k_P = \frac{0,5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{2 \cdot \ln \left[5 \cdot \frac{0,5774 \cdot l_S + 0,5 \cdot d}{0,5774 \cdot l_S + 2,5 \cdot d} \right]}$$

Pro zjednodušení výpočtu tuhosti spojovaných součástí se při použití spojovaných součástí ze stejného materiálu a normalizovaných podložek zavádí konstanty tuhosti - A, B.

Tuhost spojovaných součástí:

$$k_P = E \cdot d \cdot A \left(\frac{B \cdot d}{l_S} \right)$$



Síly v provozním stavu ve šroubovém spoji

Při výpočtech zavádíme tuhostní konstantu spoje – C:

$$C = \frac{k_S}{k_S + k_P}$$

Výsledné zatížení šroubu v provozním stavu:

$$F_1 = F_P + \Delta F_1 = F_P + C \cdot F$$

Výsledné zatížení spojovaných součástí v provozním stavu:

$$F_2 = F_P - \Delta F_2 = F_P - (1 - C) \cdot F$$

Spojované součásti přenáší asi 80% provozního zatížení. Předepjatý spoj má mít co největší poměr tuhostí spojovaných součástí a šroubů. Proto se někdy používají poddajné šrouby (zeslabené, vyvrtané nebo s prodlouženým dříkem).



U spojů s požadovanou vysokou spolehlivostí je vhodné kontrolovat skutečné prodloužení šroubu (zejména při cyklickém namáhání). Často není možné potřebná měření provést, potom je nutné určit utahovací moment, který zaručí potřebné předpětí šroubu. Existují i speciální spojovací součásti, pomocí kterých můžeme zajistit požadovanou velikost síly předpětí.

Kontrola předepjatých šroubů při statickém tahovém zatěžování

Tahové napětí ve šroubu:

$$\sigma = \frac{C \cdot F}{S_V} + \frac{F_P}{S_V}$$

Napětí v krutu od utahovacího momentu:

$$\tau_k = \frac{M_U}{W_k}$$

Redukované napětí ve šroubu:

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau_k^2} \leq \sigma_D$$



Výpočtový průřez šroubu:

$$S_V = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2$$

- C tuhostní konstanta
- F provozní síla
- F_p síla předpětí
- M_U utahovací moment
- W_k modul průřezu v krutu

Přírubové spoje

V přírubovém spoji je důležité rovnoměrné rozložení tlaku na těsnění.

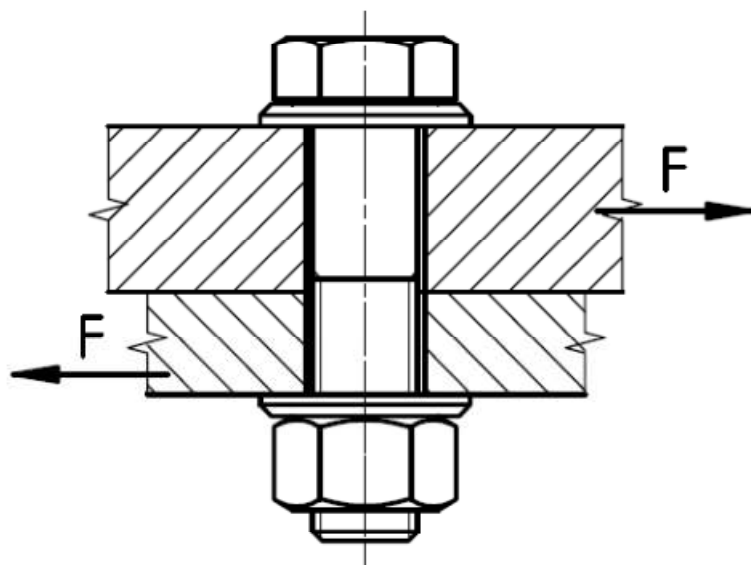
Pro rozteč šroubů na roztečné kružnici platí:

$$3 \leq \frac{\pi \cdot D}{i \cdot d} \leq 6$$

- D průměr roztečné kružnice
- d průměr šroubu
- i počet šroubů

Šroubové spoje zatížené silou kolmou k ose šroubu se silovým stykem

Zatěžující síla se přenáší třením mezi styčnými plochami spojovaných součástí.



Pro zatěžující sílu musí platit:

$$F \leq F_t = F_p \cdot f$$

F_t třecí síla

F_p síla předpětí

f součinitel tření mezi plochami spojovaných prvků

Hodnoty součinitele tření pro různé materiály naleznete ve Strojnických tabulkách.

Obvyklé hodnoty součinitele tření:

$f=0,3$ neupravené plochy

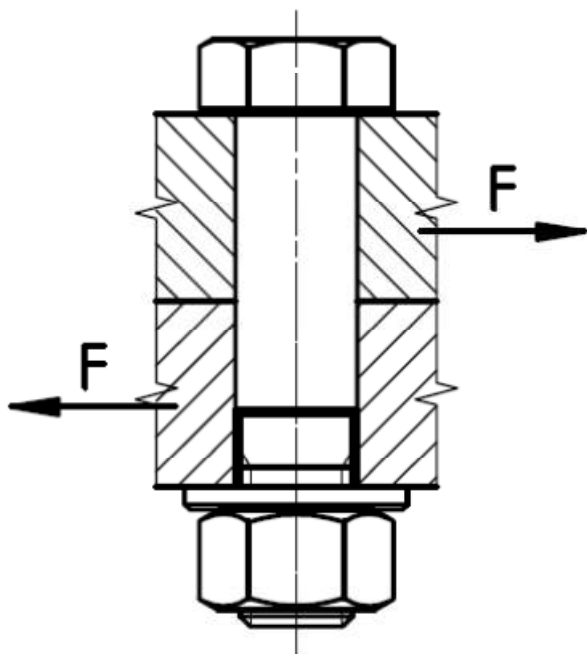
$f=0,5$ otryskané styčné plochy

$f=0,1\div 0,2$ běžně opracované ocelové plochy

$f=0,25$ běžně opracované litinové plochy

Šroubové spoje zatížené silou kolmou k ose šroubu s tvarovým stykem

Jedná se o šroubové spoje s lícovanými šrouby nebo s upínacím a střížným pouzdrem. Lícovaný šroub nebo pouzdro jsou namáhány smykem (na stříh) a spojované součásti na otláčení.



Je nutné provést kontrolu tlaku u součásti s nejmenší stykovou plochou.

Tlak v součásti:

$$p = \frac{F}{t_{min} \cdot d} \leq p_D$$

Při namáhání smykem platí:

$$\tau_S = \frac{F}{S} \leq \tau_{DS}$$

Zatěžující síla:

$$F = S \cdot \tau_{DS}$$

Zatěžující síla pro lícované šrouby:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \tau_{DS}$$

Zatěžující síla pro pouzdra:

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot \tau_{DS}$$

Průměr dříku lícovaného šroubu:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \tau_{DS}}}$$

Použitá literatura

1. KŘÍŽ, Rudolf a kol. *Stavba a provoz strojů I: Části strojů*. SNTL - Nakladatelství technické literatury. Praha: SNTL, 1977. L13-C2-V-43f/25559.
2. SHIGLEY Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Vysoké učení technické v Brně. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
3. LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. Druhé, zcela přepracované vydání. Praha: Scientia, 1998. ISBN 80-7183-123-9.
4. DILLINGER, Josef a kol. *Moderní strojírenství: pro školu i praxi*. Vydání první. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
5. FISCHER, Ulrich, Roland GOMERINGER, Max HEINZLER, Roland KILGUS, Friedrich NÄHER, Stefan OESTERLE, Heinz PAETZOLD a Andreas STEPHAN. *Tabellenbuch Metall*. 44., neu bearbeitete Auflage. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel, 2008. ISBN 978-3-8085-1724-6.