

# HODNOCENÍ PEVNOSTI A ŽIVOTNOSTI ŠROUBŮ DLE NORMY ASME BPV CODE, SECTION VIII, DIVISION 2

## STRENGTH AND FATIGUE EVALUATION OF BOLTS ACCORDING TO ASME BPV CODE, SEC. VIII, DIV. 2

Miroslav VARNER<sup>1</sup>, Viktor KANICKÝ<sup>2</sup>

### Abstract:

*The ASME BPV Code, Sec. VIII, Div. 2 approach for strength and fatigue life evaluation of bolts analysed by FEM is described. Conditions limiting the usage of ASME rules are shown.*

### ÚVOD

Napjatost šroubů šroubových spojů lze v současné době efektivně počítat metodou konečných prvků. Pro hodnocení pevnosti a životnosti šroubů lze s výhodou použít normu ASME Boiler & Pressure Vessel CODE, SECTION VIII, Division 2 [1]. Její použití je spojeno s řadou omezujících požadavků na vlastnosti šroubů a nutností kategorizovat napětí.

### 1. POŽADAVKY NA ŠROUBY

Použitá ocel musí být chemickým složením, strukturálními vlastnostmi a pevnostními charakteristikami podobná ocelím uvedeným v Table 4, ASME BPV CODE Sec. II Part D [2]. Dle poznámky (2) D1: AMB-2 k Table 4 [2] musí být průměrná hodnota vrubové houževnatosti ze tří zkoušek tyčí CharpyV, resp. jednotlivé hodnoty větší než 50,8 J.cm<sup>-2</sup>, resp. 42,4 J.cm<sup>-2</sup>.

Šrouby musí být opatřeny závity typu „V“ s poloměrem v kořeni závitu větším než 0,076 mm a přechod hladkého dřívku šroubu do závitové části šroubu musí být proveden tak, aby poměr poloměru  $r$  přechodu a průměru dřívku  $d$  šroubu byl větší než 0,06.

Další upřesňující požadavky na konstrukci, výrobu, zkoušení, kriteria přípustnosti vad šroubů a provedení matic a podložek jsou uvedeny v ARTICLE M-5 [1].

### 2. KATEGORIZACE NAPĚTÍ

Norma ASME [1] hodnotí stav víceosé napjatosti podle teorie maximálních smykových napětí s využitím kategorizace napětí dle Tab. 1. ([1] – TABLE 4–120.1, FIG. 4–130.1, APPENDIX 4).

Výpočtem metodou konečných prvků se spočítají intenzity napětí  $S$ , přičemž obecně platí:

<sup>1</sup> Ing. Miroslav VARNER, ČKD Blansko, a. s., Gellhornova 8, 67818 Blansko,  
tel.: 0506402023, e-mail: [oam@ckdblansko.cz](mailto:oam@ckdblansko.cz)

<sup>2</sup> Doc. Ing. Viktor Kanický, CSc. Kancelář dynamických výpočtů, Hoblíkova 13, 61300 Brno, tel-fax: 05572697

$$S = P_m + P_b + Q + F. \quad (1)$$

Význam symbolů je uveden v Tabulce 1 a je zřejmý z obr. 1.

**Tabulka 1:** Kategorie napětí pro šrouby

| KATEGORIE<br>NAPĚTÍ | PRIMÁRNÍ  |   | SEKUNDÁRNÍ<br>MEMBR. + OHYBOVÉ  | ŠPIČKOVÉ  |
|---------------------|---|---|---|---|
|                     | Membránové  | Ohybové   |   |   |
| Popis               | Průměrné primární napětí v daném průřezu. Nezahrnuje diskontinuity a koncentrace. Vzniká pouze mechanickými silami. | Složka primárního napětí, úměrná vzdálenosti od těžiště daného průřezu. Nezahrnuje diskontinuity a koncentrace. Vzniká pouze mechanickými silami. | Samo-rovnovážné napětí, nutné k zajištění kontinuity konstrukce. Vzniká na tvarových diskontinuitách. Může být způsobeno mechanickými silami nebo rozdílností teplotní deformace. Nezahrnuje místní koncentrace napětí. | 1. Přírůstek k primárnímu nebo sekundárnímu napětí způsobený koncentrací (vrub).<br>2. Určitá teplotní napětí, která způsobí únavu, ale ne změnu tvaru. |
| Symbol              | $P_m$   | $P_b$   | $Q$   | $F$   |

V hladké části dříku šroubu s plochou průřezu  $A$ , v dostatečné vzdálenosti od přechodu závitové části do dříku šroubu jsou hodnoty sekundárního napětí  $Q$ , vznikající vlivem zatížení šroubu na obvodu závitové části šroubu, i hodnoty špičkového napětí  $F$  zanedbatelné. Pro intenzitu napětí  $S$ ,  $P_m$ ,  $P_b$  pak platí:

$$S = P_m + P_b, \quad (2)$$

$$P_m = \frac{\int_A S \cdot dA}{A}, \quad (3)$$

$$P_b = \frac{\int_A S \cdot x \cdot dA}{W_y}, \quad (4)$$

kde  $W_y$  - modul průřezu k ose  $y$ .

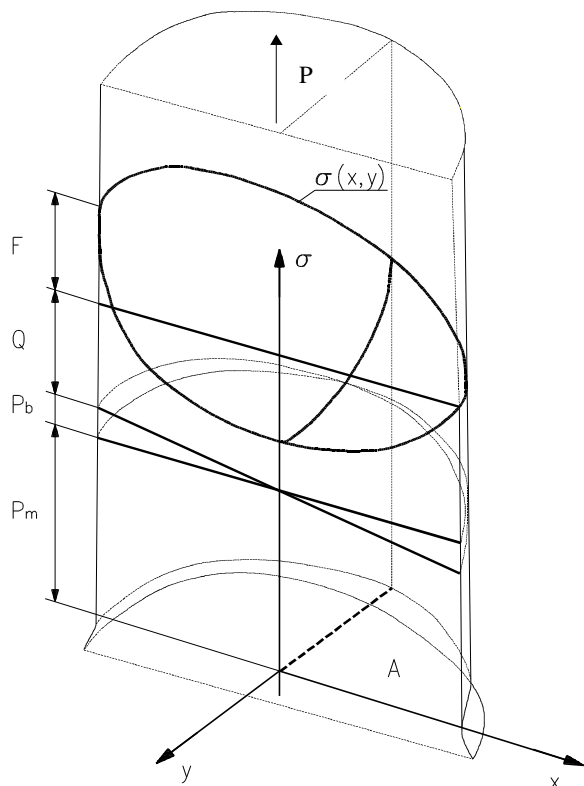
Po celé délce dříku šroubu až k prvním závitům je osová síla  $P$  konstantní a je určena integrálem

$$P = \int_A S \cdot dA. \quad (5)$$

V závitové části šroubu, resp. v přechodu závitů šroubu do hladkého dříku, s plochami průřezu o velikosti  $A$  se primární membránové napětí snadno určí vztahem:

$$P_m = \frac{P}{A}. \quad (6)$$

Pro určení ostatních kategorií napětí  $P_b$ ,  $Q$  a  $F$  je třeba znát extrémní hodnoty intenzit napětí  $S_{\max}$ ,  $S_{\min}$  v hodnoceném průřezu  $A$  a hodnotu součinitele tvaru  $\alpha$ <sup>1</sup>. Při zahrnutí ohybové složky sekundárního napětí  $Q$  do primárního ohybového napětí  $P_b$  se kategorie napětí  $P_b$ ,  $Q$  a  $F$  určí vztahy:



Obr. 1

$$P_b = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2a}, \quad (7)$$

$$Q = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2a} - P_m, \quad (8)$$

$$F = (a - 1) \cdot (P_m + P_b + Q). \quad (9)$$

Hodnota součinitele tvaru  $\alpha$  závitů resp. přechodu závitů šroubu do hladkého dřívku se v prvním přiblížení stanoví např. s použitím grafů [6], [5]. Vztahy (6), (7), (8), (9) se tedy provede dekompozice intenzity napětí  $S$  na jednotlivé kategorie napětí  $P_m$ ,  $P_b$ ,  $Q$ ,  $F$ . Pokud nejsou ve výpočtovém modelu MKP podrobně modelovány závitů, hodnota intenzity napětí  $S$  v závitové části šroubu nezahrnuje kategorii špičkového napětí  $F$ .<sup>2</sup> Při výpočtu kategorií napětí se pak ve vztahu (7) a vztahu (8) použije hodnota  $\alpha = 1$ . Ostatní vztahy a postupy kategorizace napětí a hodnocení pevnosti a životnosti se nemění.

Pro výpočet únavové životnosti šroubů se hodnota poškozující intenzity napětí  $S$  v libovolné části kmitu obvykle uvažuje vztahem:

$$S = b_v \cdot (P_m + P_b + Q), \quad (10)$$

kde  $\beta_v$  je součinitel vrubu např. dle Neubergera [4]:

$$\beta_v = \frac{\alpha}{\left(1 + \frac{s \cdot \rho^*}{\rho}\right)^{1/2}}, \quad (11)$$

<sup>1</sup> Při výpočtu primárního ohybového napětí  $P_b$ , sekundárního napětí  $Q$  a špičkového napětí  $F$  vztahy (7), (8), (9) se používá součinitel tvaru  $\alpha$  stanovený pro tah; hodnoty  $\alpha$  pro tah a ohyb jsou v tomto případě srovnatelné [5] - chyba činí několik procent.

<sup>2</sup> Při modelování namáhání šroubu (pokud není geometrie závitů šroubu a matice modelována jako kontaktní úloha) je třeba v důsledku největšího zatížení prvních závitů šroubů zohlednit reálný přenos sil v závitové části šroubu např. dle grafu uvedeného v literatuře [6], kap. 6. 4.

kde  $s = (2-\mu)/(1-\mu)$  (pro tažené a ohýbané kruhové tyče hodnocené dle teorie maximálního smykového napětí),  $\rho$  - poloměr vrubu,  $\rho^*$  - je rozměr elementární částice závislý na mezi kluzu materiálu. Pro ocel lze  $\rho^*$  určit pro mez kluzu  $R_{p0,2}$  výpočtem polynomu:

$$\rho^* = 0,19673 - 2,93 \cdot 10^{-4} \cdot R_{p0,2} - 4,09 \cdot 10^{-7} \cdot (R_{p0,2})^2 + 1,37 \cdot 10^{-9} \cdot (R_{p0,2})^3 - 1,32 \cdot 10^{-12} \cdot (R_{p0,2})^4 + 5,60 \cdot 10^{-16} \cdot (R_{p0,2})^5 - 8,89 \cdot 10^{-20} \cdot (R_{p0,2})^6 \quad (12)$$

Norma [1] v čl. 5.120, APPENDIX 5 však požaduje, aby pro hodnotu součinitele vrubu  $\beta$  použitou k hodnocení únavy závitů a přechodu dráčky šroubu do závitu, nezávisle na výsledku výpočtu nebo experimentu, platilo:  $\beta \geq 4$ .

Hodnota napětí  $S$  pro hodnocení únavové životnosti dle [1] se tedy vypočítá vztahem:

$$S = \max(\beta_v, 4) \cdot (P_m + P_b + Q). \quad (13)$$

V čl. 5-110.3, APPENDIX 5 se uvádí postup pro stanovení amplitudy intenzity napětí  $S_{alt}$ , pro případy:

během kmitu zatížení se hlavní směry napětí nemění,

během kmitu zatížení se hlavní směry napětí mění.

V obou případech nalezneme místo s největším rozkmitem  $S_{rij}$  intenzity napětí. Amplituda intenzity napětí  $S_{alt}$  je pak dána vztahem:

$$S_{alt} = \frac{1}{2} \cdot S_{rij}, \quad (14)$$

Pokud uvažujeme, že se hlavní směry napětí v průběhu kmitu nemění (výpočet je na straně bezpečné), můžeme pro zvolený průřez šroubu určit amplitudu napětí  $S_{alt}$  vztahem:

$$S_{alt} = \frac{b}{2} \cdot \left[ (P_m + P_b + Q)^h - (P_m + P_b + Q)^d \right], \quad (15)$$

kde  $\beta = \max(\beta_v, 4)$ , index  $h$ , resp.  $d$  označuje maximální, resp. minimální hodnoty příslušných intenzit napětí dosažených v průběhu kmitu zatížení.

### 3. STANOVENÍ KONSTRUKČNÍ INTENZITY NAPĚTÍ $S_m$ A PŘÍPUSTNÉ AMPLITUDY INTENZITY NAPĚTÍ $S_a$

#### 3.1. $S_m$

Hodnoty konstrukční intenzity napětí  $S_m$  se stanoví v souladu s článkem 2-130, ASME [2] vztahy:

$$S_m = 1/3 \text{ specifikované minimální meze kluzu při } 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (18)$$

nebo

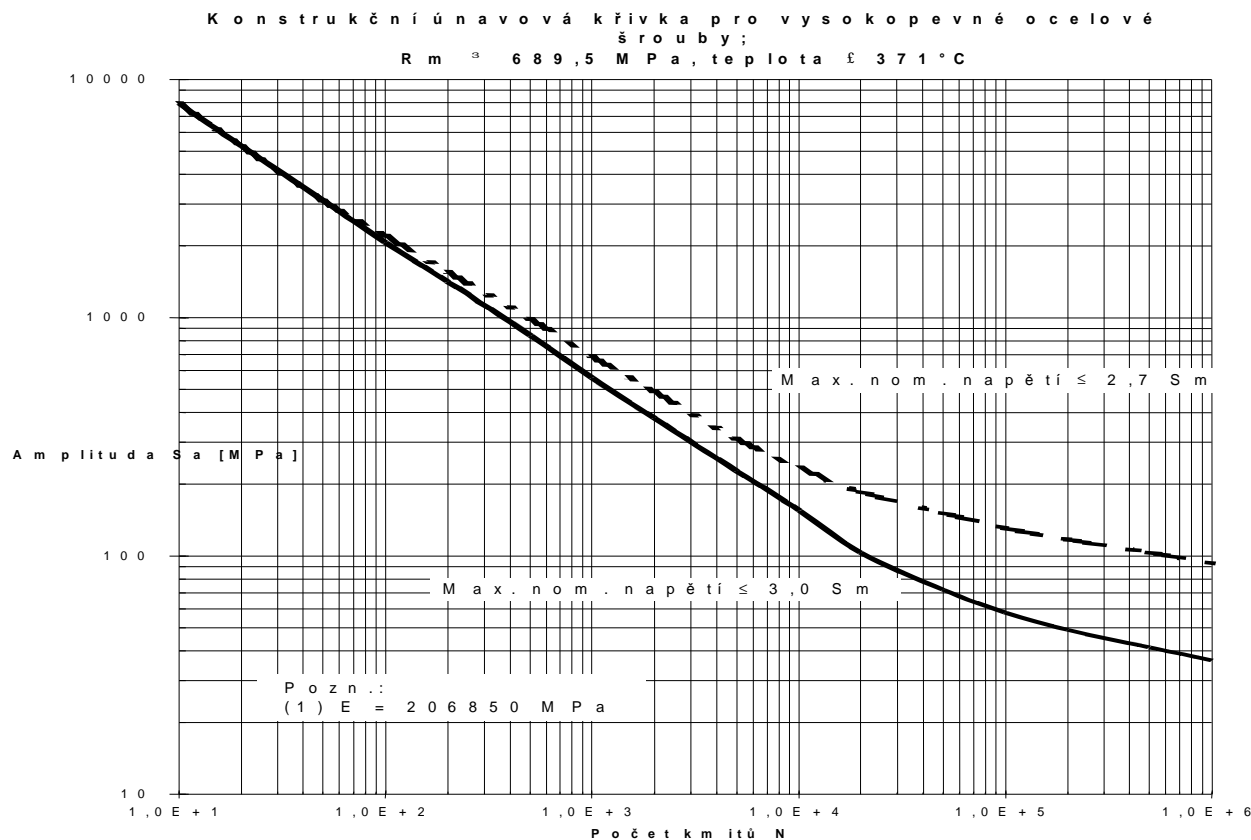
$$S_m = 1/3 \text{ meze kluzu při pracovní teplotě.} \quad (19)$$

#### 3.2. $S_a$

**Vysokopevné ocelové šrouby,  $R_m \cong 689,5$  MPa, pracovní teplota  $t < 371$  °C**

Hodnota přípustné amplitudy intenzity napětí  $S_a$  lze pro materiál šroubů s mezí pevnosti  $R_m \geq 689,5$  MPa (100 ksi) odečíst pro požadovaný počet kmitů zatížení  $N$  z

diagramu obr.2 zpracovaného podle FIG 5–120.1, TABLE 5–110.1, APPENDIX 5[1]. Použití „vyšší“ ,resp. resp. „nižší“ konstrukční únavové křivky může umožnit úspěšné hodnocení provozuschopnosti konstrukce při větším dynamickém, resp. při větším statickém namáhání.



Obr. 2

Vysokopevná ocel použitá k výrobě hodnocených šroubů musí odpovídat oceli SA–194 Grade B7 nebo B16, SA–320 Grade L43, SA–540 Grade B23 nebo B24 s tepelným zpracováním dle Section 5 z SA–540.

#### Ocelové šrouby, $R_m < 689,5 \text{ MPa}$ , pracovní teplota $t < 371 \text{ }^\circ\text{C}$

Při použití šroubů vyrobených z konstrukčních uhlíkových a slitinových ocelí s mezí pevnosti  $R_m < 689 \text{ MPa}$  se hodnota přípustné amplitudy intenzity napětí  $S_a$  odečte pro požadovaný počet kmitů zatížení  $N$  z diagramu FIG.5–110.1, nebo tabulky TABLE 5–110.1, APPENDIX 5 [1].

#### 4. MEZE INTENZIT NAPĚTÍ PŘI STATICKÉM A DYNAMICKÉM ZATÍŽENÍ

Při hodnocení pevnosti a životnosti šroubů musí vypočtené hodnoty intenzit napětí splňovat podmínky [1], APPENDIX 4: čl. 4–140, čl. 4–141 a APPENDIX 5: čl. 5–110, 5–120, FIG. 5–120.1, FIG. 5–110.1:

$$P_m \leq 2 S_m, \quad (20)$$

$$P_m + P_b + Q \leq 3 S_m, \quad (21)$$

$$P_m + P_b + Q \leq 2,7 S_m \quad (22)$$

$$S_{alt} \leq S_a. \quad (23)$$

Pozn.: Při určení  $S_a$  z „nižší“, resp. „vyšší“ konstrukční únavové křivky obr. 2 se použije podmínka (21), resp. podmínka (22).

V případě, že se během provozu vyskytují dva nebo více různých zatěžovacích kmitů napětí s významnou hodnotou amplitudy intenzity napětí  $S_{alt}$ , hodnotí se životnost s využitím hypotézy lineární kumulace únavového poškození. Vypočítají se dílčí poškození  $U_i$  vyvolané amplitudou  $S_{alti}$   $i$ -tého kmitu podílem:

$$U_i = \frac{n_i}{N_i}, \quad (24)$$

kde  $n_i$  je počet kmitů s amplitudou napětí  $S_{alti}$  během provozu pro požadovanou dobu života,  $N_i$  je počet kmitů odečtený z konstrukční únavové křivky pro amplitudu  $S_a = S_{alti}$ .

Celkové kumulativní poškození  $U$  je dáno součtem dílčích poškození  $U_i$ :

$$U = \sum_i U_i, \quad (25)$$

Šroub vyhovuje z hlediska životnosti, pokud platí:

$$U \leq 1. \quad (26)$$

## 5. POUŽITÉ PODKLADY

- [1] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, 1992
- [2] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II. Part D, 1992
- [3] BOLEK, A. - KOCHMAN, J.: Části strojů, 1. Svazek, SNTL, Praha 1989
- [4] NEUBER, H.:Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnung, Konstruktion č. 7, 1968
- [5] PETERSON, R., E.: Koefficienty koncentracij naprjaženij, Mir, Moskva 1977
- [6] POSPÍŠIL, F.: Závítová a šroubová spojení, SNTL, Praha 1968