

K UTAHOVÁNÍ ŠROUBŮ TŘECÍCH SPOJŮ

F. Wald¹, Z. Sokol¹, V. Vrzba² a D. Gregor¹

ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových konstrukcí,
Thákurova 7, 166 29 Praha, ČR

Wald@fsv.cvut.cz

Sokol@fsv.cvut.cz

Dalibor.Gregor@fsv.cvut.cz

²ČVUT, Fakulta stavební,
Thákurova 7, 166 29 Praha, ČR

Vojtech.Vrzba@fsv.cvut.cz

TO BOLT TIGHTENING IN SLIP RESISTANT CONNECTIONS

The work describes preloading of structural bolts in the slip resistant connections. The work is based on a set of tests carried out at the Czech Technical University in Prague for the Czech Steel Fabricators Association with ISO bolts M16 and M24 [1] prepared by the bolt fabricator Šroubárny Kyjov [2]. The hot dip galvanised bolts as well as the black bolts were tested on a test set up according to the proposal of the Test method for suitability for the preloading [3]. The bolt force, torque and the elongation were observed to study the preloading process, the lubricant importance and the influence the hot dip galvanised bolt surface [4]. The experiments show the limits of the moment control by preloading [5] and the relevance of the tables with the recommended torque [6]. The preloading reached by a simple hand tightening is discussed [7].

ÚVOD

Únosnost třecího spoje závisí na tření mezi spojovanými povrchy, na předpínací síle vyvozené šroubem a na tvaru a velikosti otvoru pro šroub. Předpínací sílu lze kontrolovat utahovacím momentem, úhlem pootočení šroubu, kombinovanou metodou (utahením na daný moment a pootočením šroubu o daný úhel) a speciálními podložkami, které se při dané síle pružně deformují (uzavření spáry ve spoji se pak ověřuje měrkou) [8]. Přímé měření síly ve šroubu ultrazvukem je ekonomické pouze ve strojních aplikacích. Ve šroubu se vyvozuje předpínací síla na 70% meze kluzu šroubu [9] ($F_{p,Cd} = k_p f_{ub} A_s$, kde k_p součinitel předpětí, f_{ub} mez pevnosti šroubu a A_s je výpočtový průřez šroubu; v české/německé praxi [10] se většinou využívá pouze 63% předpětí u šroubů z materiálu 10.9 a 56% předpětí u šroubů 8.8). Při utahování je svěrná síla redukována přerozdělením sil ve šroubech ve spoji a relaxací

materiálu (redukce kolem 10%). V budoucnu lze očekávat rozšíření technologicky méně náročného, ale na únavu dostatečně účinného předepnutí spoje na pouze 35% meze pevnosti šroubu (označované v koncepci DIN předpínání na 50%) při obvyklé úpravě třecích ploch.

Přesnost kontroly předpínací síly určuje popis závislosti utahovacího momentu a svěrné síly, která je výrazně nelineární. Kromě tření v závitu a pod otáčenou částí ji ovlivňují rychlost utahování, výrobní tolerance a úprava povrchu šroubu, matice a podložky, rovnost a povrch svíraných plechů, kolmost osy šroubu, tolerance utahovacích prostředků i další faktory. Předpověď chování se vlivem nahodilosti tolerancí a nelinearity tření (počáteční statické tření je výrazně vyšší než tření dynamické) používá pouze na nenosné součásti. Hlavním cílem modelů popisujících chování šroubu při utahování je podrobný rozbor všech faktorů ovlivňujících jejich chování. Vychází se z energetického popisu utahování a povolování, který se upravuje na experimentálně ověřený vztah [11] pro kroutící moment na hlavě matice šroubu

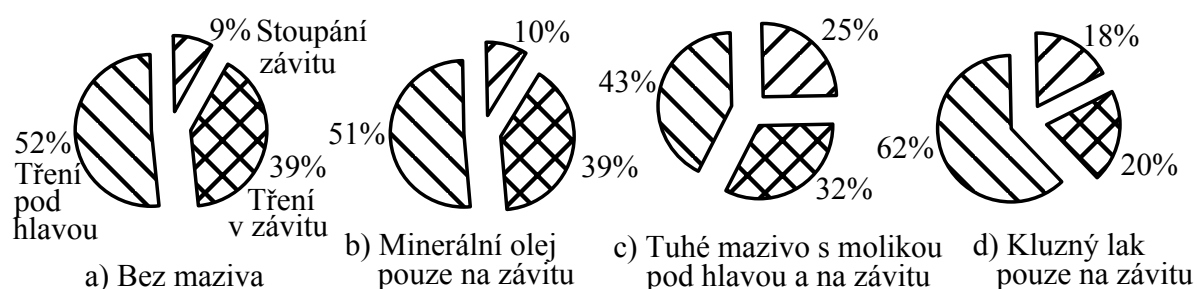
$$M_p = F_p \left(\frac{F_p}{\theta_{Sk}} \frac{K_b + K_j}{K_b K_j} + \frac{\mu_t d_t}{\cos \beta} + \mu_n d_n \right) + M_r, \quad (1)$$

kde je F_p předpínací síla ve šroubu, θ_{Sk} úhel pootočení mezi maticí a závitem šroubu, $K_b = (A_s E) / L_b$ tuhost šroubu, L_b účinná délka šroubu, E modul pružnosti oceli, $K_j = (A_{eff} E) / \sum t$ tuhost spojovaných plechů, $\sum t$ tloušťka spojovaných plechů, A_{eff} účinná plocha plechů, μ_t součinitel tření závitu, β sklon závitu, d_t střední průměr šroubovice závitu, μ_n součinitel tření matice (příp. podložky, hlavy šroubu), d_n střední průměr kontaktu mezi maticí a spojovanými plechy (příp. podložky) a M_r moment na překonání třecích odporů. Rovnici (1) lze zjednodušit na

$$M_p = F_p \left(\frac{F_p}{2\pi} + \frac{\mu_t d_t}{\cos \beta} + \mu_n d_n \right). \quad (2)$$

Pro metrické šrouby lze vztah (2) upravit, viz [12], do tvaru

$$M_p = F_p (0,16 F_p + 0,58 \mu_t d_t + \mu_n d_n / 2). \quad (3)$$



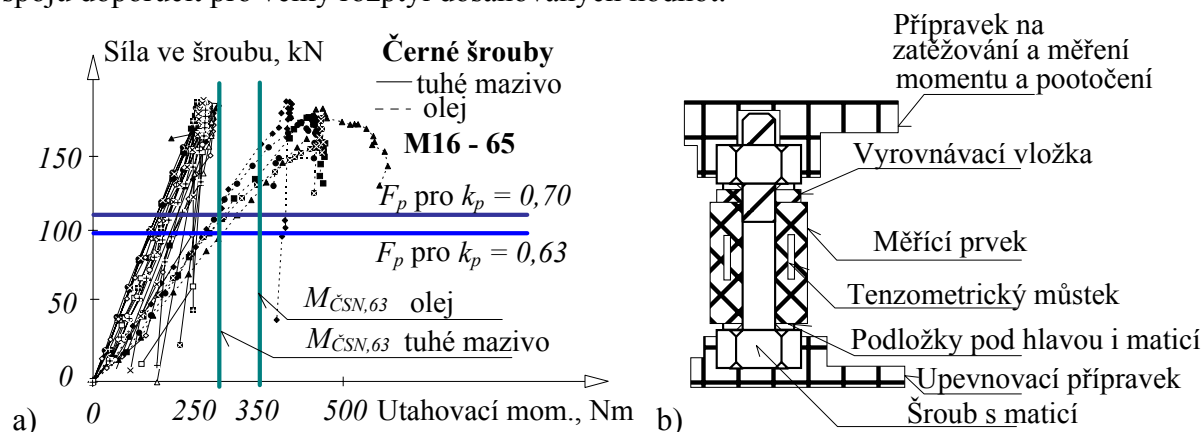
Obr. 1: Poměr složek závislosti přepínací síly a momentu: vliv stoupání závitu, tření pod hlavou a tření na závitu na experimentech s pozinkovanými šrouby, pro experimenty [4] podle výrazu (3)

Výraz (3) dokumentuje tři nejvýraznější složky závislosti přepínací síly a momentu: vliv stoupání závitu ($0,16 F_p$), tření pod hlavou ($0,58 \mu_t d_t$) a tření na závitu ($\mu_n d_n / 2$). Pro experimenty, viz [4], je poměr složek zobrazen na obr. 1 pro pozinkované šrouby M16-65 [1]

s třecími plochami pod podložkou a na závitu šroubu odmaštěnými (bez maziva), natřenými minerálním olejem, opatřenými tuhým mazivem (Mogul Molyka) a kluzným lakem pouze na závitu šroubu. Hodnoty předpětí dosahované při běžném ručním dotažení šroubů nástroji o standardní délce shrnuje závěrečná část této práce.

VLIV MAZIVA

Mazivo má zásadní vliv na tření v závitu a pod hlavou matice. Při práci na výzkumném úkolu České asociace ocelových konstrukcí [2] byl experimentálně ověřen vliv současné generace maziv na pozinkovaných i na černých šroubech se zvětšeným šestihranem hlavy a matice M16x65 podle [1] s měrnou délkou 48 mm. Na přípravku, viz obr. 2b [3], bylo metodou řízeného utahování zkoušeno pět kusů šroubů v každé zkušební sadě: suchý nenamazaný povrch; lehký olej (Mogul Super 15W-50 viz [13]); kluzný lak (GL 200, viz [11], <http://www.nachazel.cz>) na dříku šroubu, závit matice lehce naolejován a tuhé mazivo (pasta Mogul Molyka, viz [13]), závit šroubu i matice otřeny, aby se mazivo nedostalo pod matici a podložku. Podrobná dokumentace výsledků zkoušek je v výzkumné zprávě [4]. Na obr. 2a je porovnání svěrných sil šroubů ošetřených tuhým mazivem (pastou Mogul Molyka v závitu a pod maticí) a lehkým olejem. Obr. 2a ukazuje, že správné mazání je základní podmínkou pro spolehlivé vyvození návrhové svěrné síly ve šroubu. Mazání olejem nelze na šrouby třecích spojů doporučit pro velký rozptyl dosahovaných hodnot.

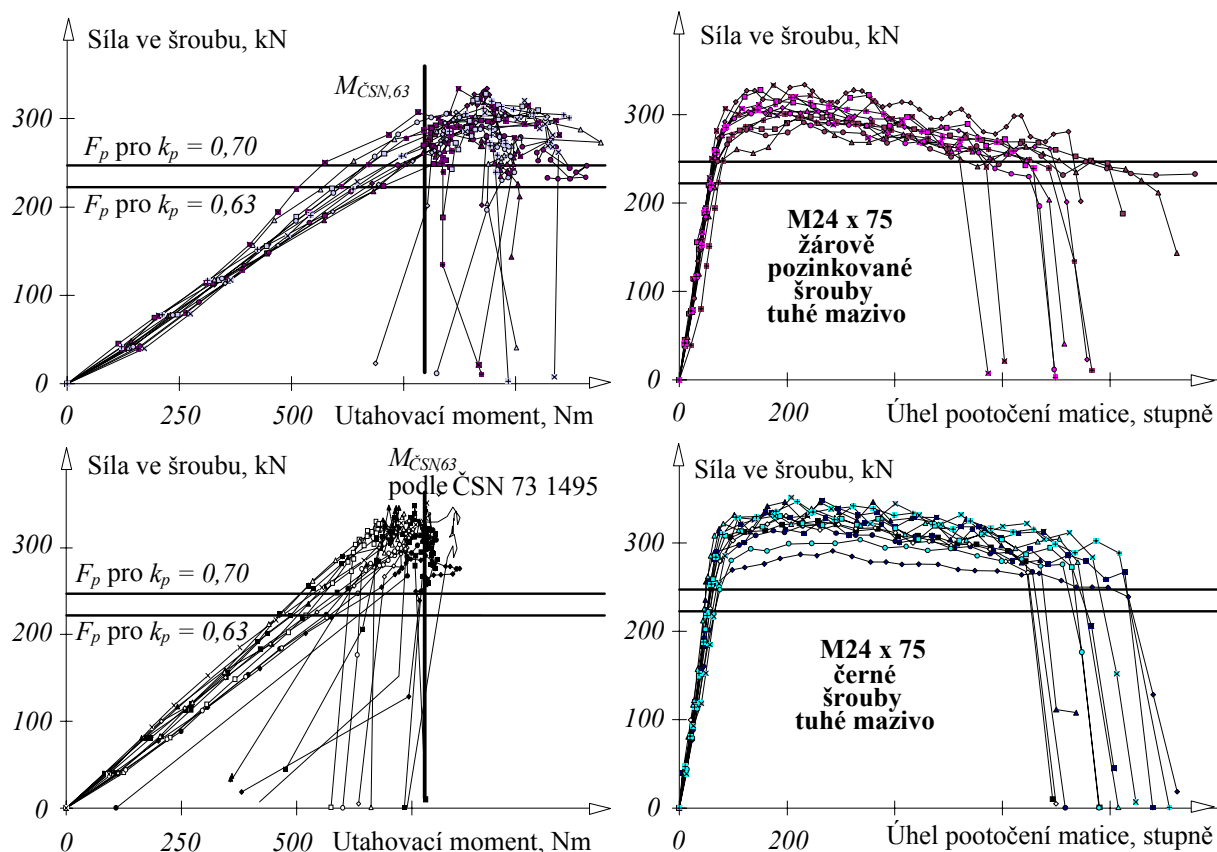


Obr. 2: a) Vliv maziva na utahování šroubu, černý šroub M16, předpínací síla F_p pro součinitel předpětí 0,70 (0,63) a doporučený předpínací moment podle ČSN 73 1495 [14], povrch šroubu ošetřený tuhým mazivem a lehce naolejovaný; b) Šroub ve zkušebním zařízení [3]

ŽÁROVĚ ZINKOVANÉ ŠROUBY

Ekonomickou ochranou šroubů proti korozi je pokovení zinkem, viz [15]. Pokovení šroubů je komplikováno tvarem a hranami šroubů. Nejčastěji se využívá žárové pokovení šroubů a matic. Podle ČSN EN ISO 1461 [16] se pro šrouby o průměru 6 až 20 mm požaduje místní tloušťka 35 μm a průměrná tloušťka 45 μm (pro průměr 20 mm a více 45 μm respektive 55 μm). Zinkuje se v lázni o normální (asi 450°C) nebo zvýšené (až 560°C) teplotě [17]. Při nízké teplotě lázně se zvýrazňuje usazování zinku na hranách, které je příznivé z hlediska protikorozní ochrany, při utahování šroubů ale nekontrolovatelně zvyšuje tření v závitu. Vyšší teploty lázně mohou nepříznivě ovlivnit tepelnou úpravu materiálu, proto zinkovny přizpůsobují teplotní režim požadavkům výrobců šroubů. Žárově se zinkují šrouby od M8 do

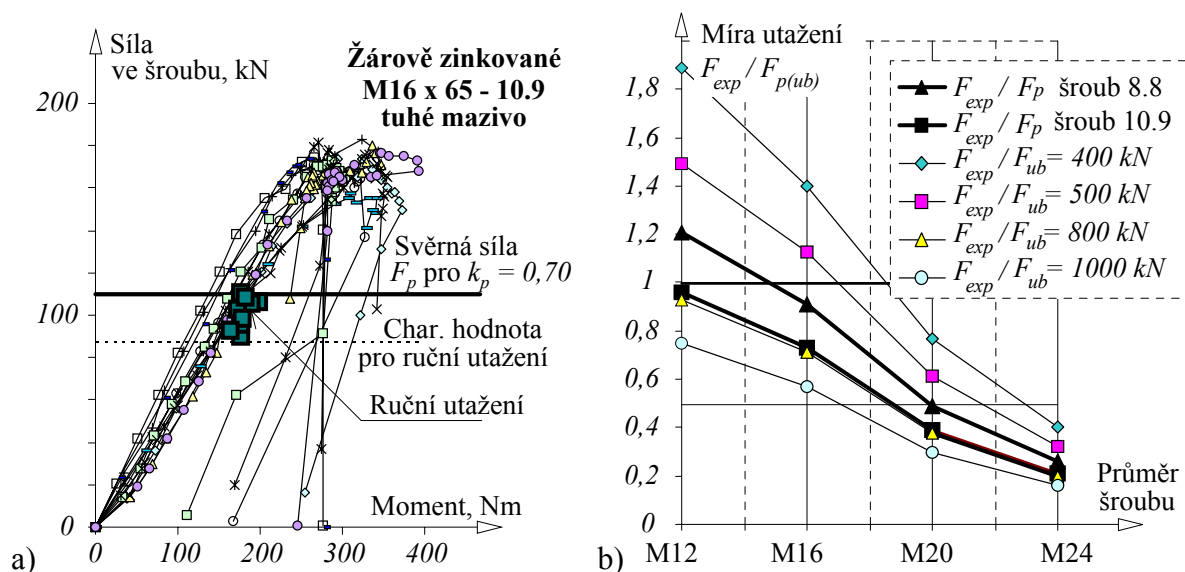
průměru 90 mm o délkách do 8 m . Žárově se zinkuje povrch šroubu. Závit se v matici vystružuje až po jejím pozinkování. Pokovení závitů šroubu zajišťuje dostatečnou protikorozi ochranu šroubu. Při výrobě šroubu se počítá s tloušťkou pokovení. Obr. 3 porovnává experimentálně zjištěnou závislost síly ve šroubu M24x75 a utahovacího momentu/úhlu pootočení [4] pro šrouby žárově pozinkované a černé na závitě a pod utahovanou maticí ošetřené tuhým mazivem Mogul Molyka [13].



Obr. 3: Experimentálně zjištěná závislost síly ve šroubu a utahovacího momentu/úhlu pootočení [4] pro šrouby s tuhým mazivem Mogul Molyka v závitě šroubu a pod maticí šroubu a) M24x75 žárově pozinkované; b) M24x75 černé

BĚŽNÉ RUČNÍ UTAŽENÍ ŠROUBŮ

Při běžném ručním utažení šroubů se vyvine předpínací síla, jejíž velikost závisí nejvíce na délce klíče, mazivu a velikosti šroubu. Velikost předpínací síly při běžném ručním utažení byla vyšetřována na černých a žárově zinkovaných šroubech M12 až M24 v práci [7]. Utahovací moment byl vyvozován na ramenech odpovídajících rozměrům otevřených klíčů (pro M12 na rameni 150 mm , pro M16 na 200 mm , pro M20 na 250 mm a pro M24 na 300 mm). Na obr. 4a je na pracovním diagramu utahování dvanácti žárově zinkovaných šroubů M16, podle [1], s tuhým mazivem Mogul Molyka porovnána charakteristická hodnota (pro 5% kvantil spolehlivosti) dosažená při ručním utahování se svěrnou silou pro součinitel předpětí $0,70$. Poměr dosažené síly při ručním utahování a únosnosti šroubu v tahu (F_{exp}/F_{ub}) je zobrazen na obr. 4b (hodnoty nad $1,0$ jsou fiktivní). Poměr dosažené síly F_{exp} a předpínací síly pro šrouby z materiálu 8.8 a 10.9 (F_p pro součinitel předpětí $k_p = 0,70$) vyjadřuje míru předepnutí. Např. šrouby M16-8.8 jsou předepnuty přibližně na 90% a šrouby M20-8.8 na 50%.



Obr. 4: a) Hodnoty dosahované při ručním utahování, šroubů (tuhé mazivo Mogul Molyka); b) míra ručního utažení (dosažené hodnoty vztažené k únosnosti šroubů při pevnosti 400; 500; 800 a 1000 MPa a k předpínací síle ve šroubu pro $k_p = 0,70$)

SHRnutí

Vrstva zinku na šroubu snižuje při utahování tření a příznivě ovlivňuje předpínací sílu. Pozinkované šrouby, tak jako šrouby černé, je třeba vždy opatřit správným mazivem. Návrhové hodnoty svěrné síly $F_{p,70}$ bylo dosaženo ve všech experimentech shrnutých v práci [4]. Potřebný utahovací moment $M_{p,70}$ je u pozinkovaných šroubů a matic vyšší než u černých spojovacích prostředků (v měřených souborech o 19 až 24%). Největší experimentálně zjištěná svěrná síla F_{max} je u všech řádně namazaných šroubů M16 i M24 vyšší než návrhová svěrná síla $F_{p,70}$ [9]. Uťahovací moment $M_{p,70}$ lze překročit bez rizika porušení šroubů. Příznivé snížení rozptylu tření v závitu přinášejí maziva nové generace vyšší čistotou jednotlivých složek a optimalizací jejich poměrů [5] při stejném chemickém složení.

Kontrola předpínací síly utahovacím momentem je technologicky nejjednodušší, ale z podstaty mechaniky šroubu ve srovnání s kombinovanou metodou nebo s kontrolou úhlem pootočení šroubu metoda nejméně vhodná. Zjištěné statisticky zaručené utahovací momenty byly v experimentech nižší než doporučuje ČSN 73 1495 [14] pro vyvození svěrné síly $F_{p,63}$. Při utahovacím momentu podle této normy by se u některých zkoušených šroubů překročil mez pevnosti šroubu. Uťahovací momenty tabelované v [14] zajišťují spolehlivé dosažení svěrné síly. Případné porušení šroubu při utahování, dané rozptylem hodnot tření na závitu, lze snadno vizuálně kontrolovat i ověřit na předmontáži. Riziko porušení šroubu při utahování není montážně vhodné. Nekontrolované plastické deformace vedou ke snížení životnosti spoje. Závěry odpovídají poznatkům ze zkoušek šroubů v předních evropských laboratořích [18].

Pro spolehlivou kontrolu předpínací síly utahovacím momentem, úhlem pootočení šroubu nebo kombinovanou metodou se dané sestavy (šroub, matice, podložky a mazivo) experimentálně ověřují normovou zkouškou [3]. V České republice je pro tato měření [5] vybavena akreditovaná laboratoř Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze.

OZNÁMENÍ

Autoři děkují za podporu práce grantem České asociace ocelových konstrukcí a výzkumným záměrem MŠMT J01-98:210000004. Šrouby pro experimenty vyvinula a darovala Šroubárna Kyjov a. s., zinkování provedla zinkovna Družstvo Loděnice, maziva dodali Nacházet s. r. o. a Koramo a. s.

LITERATURA

- [1] Šertler H. - Wald F. - Rozlívka L. - Vengřín J.: *Pokyny pro navrhování a provádění třecích spojů s VP šrouby podle evropských norem*, zpráva IOK 02-01, Frýdek-Místek 2002, s. 38
- [2] prEN WI 00185215:2001 (ISO 7412) *High strength structural bolting for preloading*, Part 1, General requirements, CEN, Brussels 2001, p.24
- [3] prEN WI 00185220:2001 (ENV 1090-6) *High strength structural bolting for preloading*, Suitability tests for preloading, Part 2, CEN, Brussels 2001, p.12
- [4] Wald F. - Sokol Z. - Gregor D.: *Zkušební protokol o zkoušce předpínací síly pro metodu řízené utahování matice momentem, pootočením a kombinovanou metodou*, zpráva ČVUT v Praze, Praha 2001, s. 198
- [5] Wald F. - Rozlívka L. - Sokol Z. - Šertler H.: *Vliv maziva na utahování šroubů třecích spojů*, v Konstrukce, č. 4/2002, příloha kotvicí spojovací a upevňovací materiály, s. 4-7, Ostrava, ISSN 1212-8762
- [6] Wald F. - Rozlívka L. - Sokol Z. - Šertler H.: *Žárově zinkované šrouby třecích spojů*, v Konstrukce, č. 1/2003, příloha kotvicí spojovací a upevňovací materiály, s. 4-7, Ostrava, ISSN 1212-8762
- [7] Vrzba V.: *Zkouška předpínací síly metodou ručního utahování matice momentem, pootočením a kombinovanou metodou*, výzkumná zpráva, ČVUT, Praha 2003, s.12
- [8] ČSN P ENV 1990-1, *Provádění ocelových konstrukcí*, obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI, Praha 1997, s.117
- [9] ČSN P ENV 1993-1-1, *Navrhování ocelových konstrukcí*, ČNI, Praha 1994, s. 370
- [10] ČSN 73 1401, *Navrhování ocelových konstrukcí*, ČNI, Praha 1998, s. 134, včetně změny Z1, ČNI, Praha 2001, s. 7
- [11] Bickford J.H.: *An introduction to the design and behavior of bolted joints*, Third edition, Marcel Decker inc., New York 1995, p. 953, ISBN 0-8247-9297-1
- [12] Gäsnsheimer J.: *Optimalizace šroubových spojů za pomoci tuhých maziv*, Nacházet s.r.o., Praha 1999, s.14
- [13] Koramo a.s., *Tuhá maziva pro šroubové spoje*, <http://www.koramo.cz>
- [14] ČSN 73 1495, *Šroubové třecí spoje ocelových konstrukcí*, ČNI, Praha 2001, s. 18
- [15] *Bolting Galvanized Steel v After-Fabrication Hot Dip Galvanizing*, Galvanisers Association of Australia, RIBA CDP, Sydney 2001, p.29
- [16] ČSN EN ISO 1461 (03 8558) *Žárové povlaky zinku nanášené ponorem na železných a ocelových výrobcích*, ČNI, Praha 1999, s. 20
- [17] ISO /WD 10684 *Fasteners – Hot dip galvanized coatings*, proposal, Brussels 1999, p. 9
- [18] Valtinat G. - Piraprez E. - Greff E.: *International tightening tests with high strength bolts M20x100 of systems HR and HV*, TU Hamburg - Harburg, Hamburg/Liége 1998, p. 116