

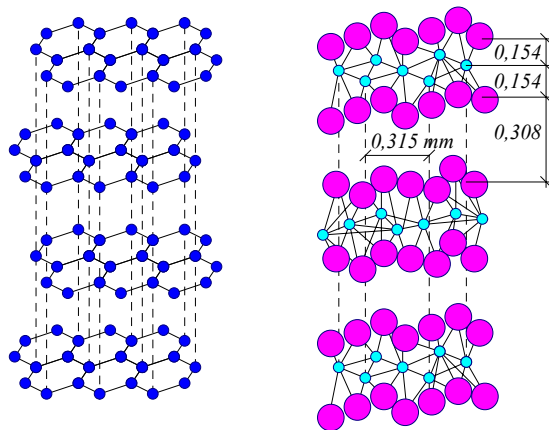
VLIV MAZIVA NA UTAHOVÁNÍ ŠROUBŮ TŘECÍCH SPOJŮ

Mazivo má zásadní vliv na vyvození svěrné síly ve šroubových spojích. Tření rozhoduje o velikosti síly a o rozptylu jejích hodnot. Česká asociace ocelových konstrukcí iniciovala výzkumný úkol zaměřený na chování nové generace žárově zinkovaných šroubů se zvětšenou šestihrannou hlavou pro třecí spoje (text zprávy je zveřejněn na internetových stránkách časopisu Konstrukce www.ekonstrukce.cz). Byla sledována jak tradiční tak nově vyvíjená maziva – kluzné laky, které přináší řadu montážních výhod. Práce prezentuje experimentálně zjištěné závislosti vlivu maziv a základní analytické modely používané k předpovědi svěrné síly ve šroubech třecích spojů.

V mazání šroubů se provádí výzkum již přes sto let, přesto je stále řada problémů otevřených. Analýza příčin ztráty únosnosti v prokluzu šroubových třecích spojů [1] ukazuje, že základem poruch je nedostatečná svěrná síla způsobená nevhodným mazivem, postupem předpínání a jeho kontrolu. Selhání překročením svěrné síly nebylo pozorováno. Šroub porušený předepnutím za mez pevnosti se při montáži snadno identifikuje. Zvláště obtížné je utahování šroubů z vysoce legovaných materiálů (zvláště austenitické oceli). Tyto oceli nemají vrstvu oxidu, která odděluje základní materiály při tření. Chybí-li jemná vrstva vhodného maziva, dochází již při pouhém utahování matice ke svaření povrchů za studena [2].

Větších svěrných sil lze dosáhnout použitím maziv s nízkým součinitelem tření, protože součinitel tření mezi ocelí je relativně vysoký ($\mu > 0,3$) a rozptyl hodnot je veliký ($\sigma > 0,1$). Vhodné mazání šroubových spojů prodlužuje životnost spoje, protože vrstva maziva snižuje místní špičky pnutí v závitu, dosáhne se lepšího záběhu povrchu a dílek šroubu je méně vystaven namáhání v kroucení. Šroub je pro mazání asi nejnevhodnější strojní prvek. Komplikované tvary jsou různě opracovány, často porušeny dopravou a znečištěny. Každý závit je navržen s vnitřní vůlí. Při utahování šroubu je často namáhána jenom jedna strana závitu. Při nepřítomnosti dostatečného množství maziva se v materiálu vytváří povrchové kapiláry a třením se materiál svařuje za studena, závit se zadře. Pro přepravu se černé šrouby obvykle opatřují olejovým filmem na ochranu proti korozi. Pro snížení tření se užívají oleje, plastická a tuhá maziva a kluzné laky. Oleje nemají dostatečnou odolnost tlakům při utahování a stárnutí. Plastická maziva jsou složena až z 85% z minerálních olejů a je třeba u nich počítat též z výše uvedenými jevy. Tuhá maziva jsou pevné látky, které díky své struktuře oddělují od sebe povrchy, které po sobě kloužou a tím se zmenšuje tření a případný oděr. Nejvíce se osvědčily grafit a sirník molybdeničitý (MoS_2) ale i měď, hliník, olovo, Mazací účinek grafitu a sirníku molybdenečitého je založen na jejich lamelové krystalické struktuře, viz obr. 1. Ve vrstevnaté mřížce grafitu jsou atomy v jednotlivých vrstvách uspořádány hexagonálně. Slabé vazby mezi vrstvami dovolují snadný přesun jednotlivých lamel, zatímco silné vazby ve vrstvách zajišťují vysokou odolnost proti pronikání nerovností povrchu. Grafit se osvědčuje při vyšších teplotách, nad 400°C , kdy molekuly síry v sirníku molybdenečitého již způsobují místní korozi. U MoS_2 je jedna rovina atomů molybdenu sendvičově obklopena dvěma rovinami atomů síry. Omezením vazby atomů síra-síra se dosáhne velice nízké únosnosti krystalu sirníku molybdenečitého ve střihu. Vrstvy síry se vážou na kovové povrchy a způsobují velice dobré přilnutí. Lamely sirníku se orientují rovnoběžně s povrchem kovu do souvislých, tenkých filmů ($0,1$ až $1,0 \mu\text{m}$) s nízkým součinitelem tření a vysokou odolností proti tlaku. Tuhá maziva se pojí s oleji nebo tuky, aby se zvýšila výkonnost mazání případným opakovaným naplátováním tuhých maziv na povrchy za mezního tření.

Tuhé laky jsou disperze kombinací tuhých maziv (sirník molybdeničitý, grafit, teflon) v organických nebo anorganických vazbách s rozpouštědly. Po vytvrzení/vypálení se vytvoří pevně lpící vrstva s mazacími účinky. Vrstva je navržena tak, aby měla co nejstálější vlastnosti v extrémních podmínkách. Odolává tlaku, horku (přes 300°C) i chladu (do -180°C), chemickým vlivům a má nízký součinitel tření. Přilnavost a schopnost setrvat na žádoucím místě je zajištěna povahou filmu. Podmínkou úspěšné aplikace kluzných laků, ale i tuhých maziv, je důkladné očištění povrchů od nečistot (i transportních ochranných olejů). Kluzné laky se nanášejí v bubnu a pak se vysoušejí, popřípadě se ke zvýšení odolnosti vypalují. Dodržením přesného výrobního postupu se dosahuje nízkých součinitelů tření (až kolem $\mu \approx 0,03$) při velmi malém rozptylu až $\sigma \leq 0,005$, viz obr. 2. Kluzné laky na bázi teflonu nemají estetická omezení v černé barvě, mohou být i transparentní. Upravují se jimi povrchy malých šroubů např. pro elektrotechniku. Na vývoj a průmyslové využití maziv se specializuje řada firem, v ČR např. Koramo a.s. (www.koramo.cz) a Nacházel s.r.o. (www.nachazel.cz).



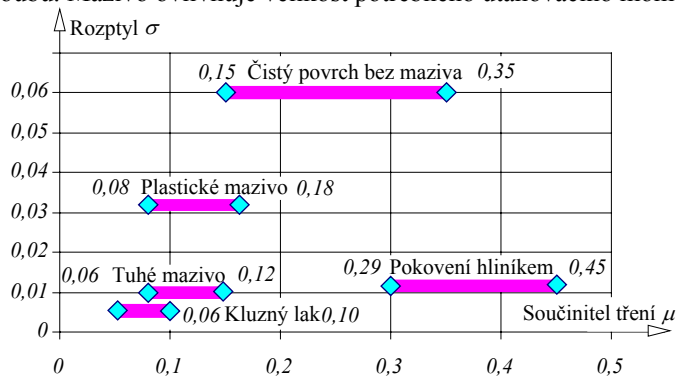
Obr. 1 Krystalická struktura grafitu a siričku molybdeničitého [7]

EXPERIMENTY

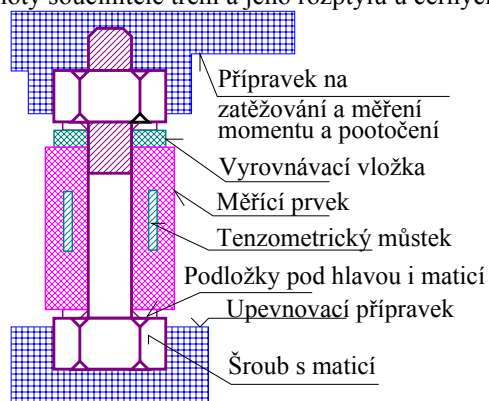
Vliv maziv na utahovací moment a úhel pootočení při dané svěrné síle byl zkoušen na pozinkovaných i na černých šroubech M16x65 podle EN ISO 7412 s měrnou délkou 48 mm [7]. Na přípravku, znázorněném na obr. 3, bylo metodou řízeného utahování zkoušeno pět kusů šroubů v každé zkušební sadě: suchý nenamazaný povrch; lehký olej (Mogul Super 15W-50 viz [8]); kluzný lak (GL 200 viz [10]) na dřívku šroubu a tuhé mazivo (pasta Mogul Molyka viz [9]) v závitě šroubu. Podrobná dokumentace výsledků zkoušek je ve výzkumné zprávě [12]. Výsledky experimentů jsou v tab. 1 a na obr. 4. V tab. 1 je rekapitulace a porovnání výsledků se zkouškami svěrných sil šroubů namazaných pastou Mogul Molyka v závitě a pod maticí, kdy bylo mazivo naneseno podle současné české praxe [11]. Výsledky jsou porovnány pro maximální vyvozenou svěrnou sílu F_{max} a pro návrhovou svěrnou sílu $F_{p.70}$. Svěrná síla ve šroubu se počítá podle vztahu

$$F_{p,Cd} = k_p f_{ub} A_s \quad (1)$$

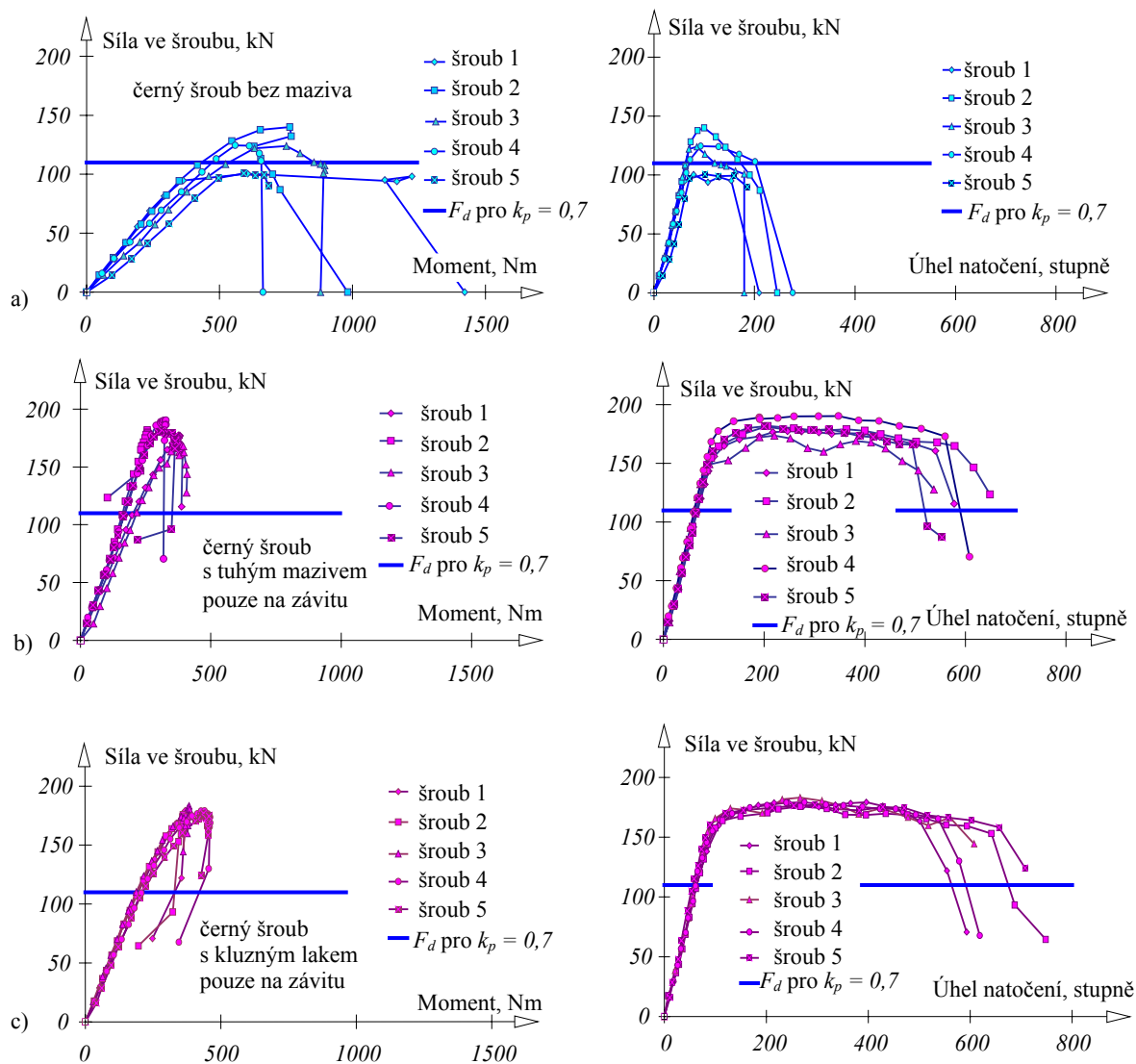
kde A_s je výpočtový průřez šroubu, f_{ub} mez pevnosti šroubu, k_p součinitel předpětí, viz [3] a [4]. Pro $k_p = 0,70$; $F_{p.70} = 0,70 * 1000 * 157 / 1000 = 109,9$ kN. Směrodatná odchylka byla stanovena pro tuhost $K = F_{p.70} / \delta$, odpovídající dané svěrné síle (např. $F_{p.70}$) a deformaci šroubu δ . Tab. 1 a obr. 4, přestože jsou ovlivněny malými zkoušenými soubory, dokumentují, že správné a dostatečné mazání je základní podmínkou pro spolehlivé vyvození návrhové svěrné síly ve šroubu. Mazivo ovlivňuje velikost potřebného utahovacího momentu $M_{p.70}$ výrazně.



Obr. 2 Orientační hodnoty součinitele tření a jeho rozptylu u černých šroubů, podle [2] a [9]



Obr. 3 Šroub ve zkušebním zařízení [7]



Obr. 4 Experimentálně zjištěná závislost síly v černém šroubu M16 x 65 na utahovacím momentu a na úhlu natočení, F_d svěrná síla pro $k_p = 0,7$ pro šroub bez maziva a s tuhým mazivem a kluzným lakem pouze na závitu, podle [12]

Tab. 1: Vliv maziva na svěrnou sílu ve šroubu při experimentech [12], šrouby M16 x 65

Povrch	Mazivo	$M_{p,70}, Nm$			M_{max}, Nm			F_{max}, kN	
		Min.	Směrodatná odchylka tuhosti	Prům.	Min.	Směrodatná odchylka tuhosti	Prům.	Min.	Prům.
Černý	Odmaštěné - bez maziva	431,3	0,47	479,3	558,6	0,47	654,2	100,4	117,9
	Minerální olej	246,2	0,21	261,6	386,2	0,25	430,0	171,4	177,3
	Tuhé mazivo – závít	168,2	0,21	183,8	256,2	0,25	323,4	173,5	180,7
	Kluzný lak – závít	187,4	0,09	198,7	353,4	0,12	392,7	174,1	177,0
	Tuhé mazivo – vše	126,8	0,10	140,5	209,7	0,23	224,2	177,9	183,0
Žárově zinkovaný	Odmaštěné - bez maziva	198,3	0,14	220,8	313,8	0,24	337,9	159,5	168,2
	Minerální olej	214,1	0,13	229,6	351,7	0,20	375,0	158,6	166,8
	Tuhé mazivo – závít	162,5	0,08	183,8	307,4	0,09	343,4	171,0	173,5
	Kluzný lak – závít	178,3	0,15	201,5	334,8	0,16	373,1	173,4	175,8
	Tuhé mazivo – vše	136,8	0,15	168,0	259,0	0,16	298,3	157,2	174,8

ANALYTICKÝ MODEL

Hlavním cílem modelů popisujících chování šroubu při utahování je podrobné pochopení všech faktorů ovlivňujících jejich chování. Závislost utahovacího momentu a svěrné síly je nelineární. Kromě tření v závitu a pod

otáčenou částí ji ovlivňují rychlost utahování, výrobní tolerance a úprava povrchu šroubu, matice a podložky, rovinnost 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 dynamická) používá pouze na nenosné součásti. Vychází se z energetického popisu utahování a povolování, který se upravuje na experimentálně ověřený vztah (2) podle lit. [1] pro utahovací moment na hlavě matice šroubu

$$M_p = F_p \left(\frac{F_p}{\theta_{Sk}} \frac{K_b + K_j}{K_b K_j} + \frac{\mu_t d_t}{\cos \beta} + \mu_n d_n \right) + M_r \quad (2)$$

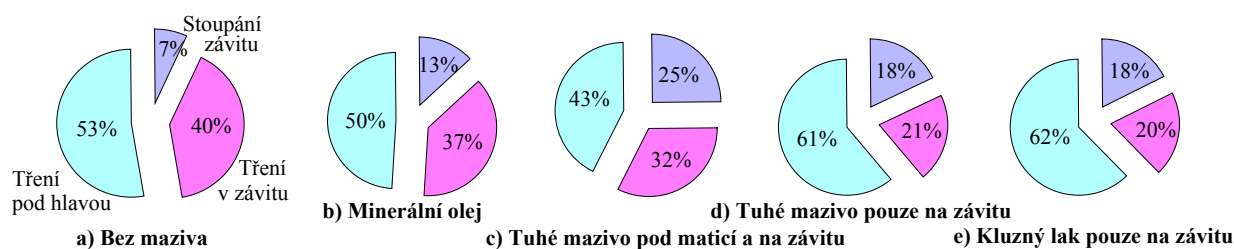
kde F_p je předpínací síla ve šroubu, θ_{Sk} úhel pootočení mezi maticí a závitem šroubu, $K_b = (A_s E) / L_b$ tuhost šroubu, L_b účinná délka šroubu, E modul pružnosti oceli, $K_j = (A_{eff} E) / \Sigma t$ tuhost spojovaných plechů, Σt tloušťka spojovaných plechů, A_{eff} účinná plocha plechů, μ_p 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. Výraz (2) lze zjednodušit do tvaru

$$M_p = F_p \left(\frac{F_p}{2\pi} + \frac{\mu_t d_t}{\cos \beta} + \mu_n d_n \right). \quad (3)$$

V německé praxi [6] se vztah (2) používá pro metrické šrouby v úpravě

$$M_p = F_p (0,16 F_p + 0,58 \mu_t d_t + \mu_n d_n / 2). \quad (4)$$

Výraz dokumentuje vliv tří nejvýraznějších složek na závislost předpínací síly a utahovací moment: vliv stoupání závitu ($0,16 F_p$), tření pod hlavou ($0,58 \mu_t d_t$) a tření na závitu ($\mu_n d_n / 2$). Poměr jednotlivých složek ve výrazu (4) je zobrazen na obr. 5 pro černé šrouby EN ISO 7412 M16-65 (experimenty podle [12]) pro třecí plochy odmaštěné bez maziva, natřené minerálním olejem, opatřené tuhým mazivem (Mogul Molyka) a pro závity šroubu ošetřené kluzným lakem.



Obr. 5 Poměr složek ve vztahu předpínací síly a momentu (5) (pro vliv stoupání závitu, tření pod hlavou a tření na závitu), zpracováno podle experimentů [12]

NORMOVÁ DOPORUČENÍ

V normách pro konstrukční šrouby se obecně uvádí, že šrouby musí být před utažením ošetřeny mazivem, např. pro žárově zinkované šrouby v ISO 10684 [8]. V ČSN 73 1495 [5] se v tab. 8.1 připouští závit matice lehce naolejován. V současné odborné literatuře [1], [6] se úprava povrchu závitu naolejováním pro nepřipustně veliký rozptyl tření v závitu pro spolehlivé předpínání podle experimentů nedoporučuje. V normě [5] se pro šroub a matici s velkým klíčovým rozměrem M16 pevnostní třídy 10.9 pro předpínací sílu 100 kN uvádí utahovací momenty 250 kN (závit matice namazán MoS_2) a 350 kN (závit matice lehce naolejován). V experimentech bylo předpínací síly pro doporučené momenty [5] značně překročena. Nejmenší mezní hodnota utahovacího momentu při porušení šroubu pro tuhé mazivo na závitu šroubu byla ale pouze $256,2 \text{ Nm}$. Normová hodnota, při níž je zajištěno překročení předpínací síly s požadovanou pravděpodobností byla ve zkoušeném případě spolehlivá, ale pro praxi příliš blízko mezní únosnosti šroubu.

ZÁVĚREM

Použití tuhých maziv nebo kluzných laků na závitu šroubu je důležitou podmínkou pro dosažení předpínací síly. Pro snížení rozptylu hodnot svěrných sil se doporučuje ošetřit mazivem i povrch pod utahovanou maticí. Rozptyl součinitele tření v závitu je vysoký, např. v [1], [2] a [6], i pro malý rozptyl součinitele tření jednotlivých materiálů. Pro danou soustavu: šroub, podložka, matice a mazivo lze experimenty zaručit předepnutí na návrhovou svěrnou sílu pouze kontrolou utahovacího momentu. Tabulky utahovacích momentů pro dosažení požadované svěrné síly lze použít pro danou soustavu, jsou-li garantovány dodavatelem spojovacích prostředků: šroubů, podložek a matic pro technologii utahování a jeho kontroly. Další příspěvky založené na výstupech výzkumného úkolu České asociace ocelových konstrukcí se zaměří na žárově pozinkované šrouby a na metody utahování šroubů v třecích spojích.

OZNÁMENÍ

Autoři děkují za podporu práce grantem České asociace ocelových konstrukcí, výzkumným záměrem MŠMT J01-98:210000004. Šrouby pro experimenty vyvinuly a darovaly Šroubárna Kyjov, s.r.o.; maziva Nacházel s.r.o. a Koramo a.s.

Literatura

- [1] Bickford J.H., An introduction to the design and behaviour of bolted joints, Third edition, Marcel Decker inc., New York 1995, s. 953, ISBN 0-8247-9297-1.
- [2] Dejl Z., Konstrukce strojů a zařízení I., spojovací části strojů, Montanex, Ostrava 2000, s. 225. ISBN 80-7225-018-3.
- [3] ČSN P ENV 1993-1-1, Navrhování ocelových konstrukcí, ČNI, Praha 1994, s. 370.
- [4] ČSN 73 1401, Navrhování ocelových konstrukcí, ČNI, Praha 1998, s. 134, včetně změny Z1, ČNI, Praha 2001, s. 7.
- [5] ČSN 73 1495, Šroubové třecí spoje ocelových konstrukcí, ČNI, Praha 2001, s. 18.
- [6] Gänshaimer J., Optimatizace šroubových spojů za pomoci tuhých maziv, Nacházel s.r.o., Praha 1999, s.14.
- [7] ENV 1090-6, Highstrength structural bolting for preloading – Test method for suitability for preloading, návrh, Brusel 1999, s. 12.
- [8] ISO /WD 10684 Fasteners – Hot dip galvanized coatings, návrh, Brusel 1999, s.9.
- [9] Koramo a.s., Tuhá maziva pro šroubové spoje, www.koramo.cz.
- [10] Nacházel, Šroubové spoje, Informační sešit č. 21, Nacházel s.r.o., , Praha 2000, s.11, www.nachazel.cz.
- [11] 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.
- [12] 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.

Prof. František Wald, Ing. Luboš Rozlívka, Ing. Zdeněk Sokol, Prof. Hynek Šertler,
<http://www.fsv.cvut.cz/~wald/>