FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Ústav konstruování a částí strojů

Analýza šroubových spojů při aplikaci moderních spojovacích prvků, povlaků a maziv

Screw Connections with Application of Modern Fasteners, Coatings and Lubricants Analysis

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Lubomír FOJTA

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing. Jan Kanaval, Ph.D.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fojta** Jméno: **Lubomír** Osobní číslo: **434229**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza šroubových spojů při aplikaci moderních spojovacích prvků, povlaků a maziv

Název bakalářské práce anglicky:

Screw Connections with Application of Modern Fasteners, Coatings and Lubricants Analysis

Pokyny pro vypracování:

V rámci závěrečné práce zpracujte formou rešerše přehled na trhu dostupných moderních spojovacích prvků s aplikací speciálních povlaků a suchých kluzných laků (maziv). Porovnejte vlastnosti těchto povlaků z hlediska třecích a silových poměrů v závitové dvojici a z hlediska korozní odolnosti. Pro vybrané závitové prvky (šrouby a matice) s aplikací moderních povlaků a suchých kluzných laků proveďte experimentální ověření velikosti součinitele tření v závitu.

Seznam doporučené literatury:

ŠVEC, V. Části a mechanismy strojů. Spoje a části spojovací. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008. 169 s. ISBN 80-01-01701-X.
Ralph, S. Shoberg: Engineering Fundamentals of Threaded Fastener Design and Analysis. RS Technologies, a Division of PCB Load & Torque, Inc. 24350 Indoplex Circle, Farmington Hils, MI 48335 USA.
Torque Tension Control. Anochrome Group. Inlex Locking Ltd. Wood Lane, Fordhouses, Wolverhampton WV10 8HN. URL: www.anochrome-group.co.uk, 2016-05-20.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Kanaval Ph.D., ústav konstruování a částí strojů FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **27.03.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **09.06.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce | Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

12.4.2017

Datum převzetí zadání | Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Analýza šroubových spojů při aplikaci moderních spojovacích prvků, povlaků a maziv“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Kanavala, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 20. 06. 2017 Lubomír Fojta

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Kanavalovi, Ph.D. za příkladné a odborné vedení v průběhu vypracování práce a dále za organizaci realizace experimentu. Dále děkuji Ing. Františku Starému za realizaci vlastního experimentálního měření a p. Janu Buršíkovi a Josefu Tománkovi za pomoc při zhotovení a instalaci přípravků potřebných k měření.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Lubomír Fojta
Název BP:	Analýza šroubových spojů při aplikaci moderních spojovacích prvků, povlaků a maziv
Anglický název:	Screw Connections with Application of Modern Fasteners, Coatings and Lubricants Analysis
Rok:	2017
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Jan Kanaval, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran 82
	počet obrázků 48
	počet tabulek 28
	počet příloh 6
Klíčová slova:	závit, šroub, matice, předpětí, součinitel tření
Keywords:	thread, screw, nut, preload, coefficient of friction
Anotace:	Tato bakalářská práce se zabývá základní analýzou předepjatého šroubového spoje. Praktická část pojednává o experimentu, při kterém byl stanoven součinitel tření v závitu konkrétních spojovacích prvků.
Abstract:	This bachelor thesis deals with basic analysis of prestressed screw connection. The practical part deals with an experiment in which the coefficient of friction in the thread of specific connecting elements was determined.

OBSAH

1. Úvod 1
2. Rešerše řešené problematiky 2
2.1. Základní pojmy 2
2.2. Historie závitů 4
2.3. Normalizace závitů 5
2.4. Výroba závitů 7
2.5. Tolerování a kontrola závitů 9
2.6. Šroubové spoje 11
2.6.1. Protikorozní ochrana povlakováním závitů 14
2.6.2. Mazání závitů 16
2.6.3. Přehled moderních (na trhu dostupných) spojovacích prvků 17
3. Silový rozbor v závitové dvojici 21
3.1. Silové poměry v závitu 21
3.2. Předepjatý šroubový spoj 25
3.2.1. Utahování předepjatého spoje 25
3.2.2. Deformace v předepjatém šroubovém spoji 29
3.2.3. Základní energetická bilance 31
4. Selhání předepjatého šroubového spoje 32
4.1. Únavová pevnost 32
4.2. Sesedání šroubového spoje 33
4.3. Další možnosti selhání šroubového spoje 34
5. Experimentální stanovení součinitele tření v závitech šroubového spoje 35
5.1. Princip měření 37
5.2. Postup a metodika měření 39
5.3. Použité měřicí přístroje 42
5.4. Použité výpočty 43
5.5. Statistické zpracování naměřených dat 44
5.6. Výsledky měření v tabulkách 45
5.7. Výsledky měření graficky 53

5.8. Chyby ovlivňující výsledky měření 55
5.9. Vyhodnocení výsledků měření 57
6. Závěr 59
Seznam použité literatury a zdrojů 60
Seznam zkratek a symbolů 65
Seznam obrázků 69
Seznam grafů 71
Seznam tabulek 72
Seznam příloh 73
Přílohy 74

1. Úvod

Přestože může být naše současnost, díky stále se rozvíjející technologické vyspělosti, vnímána převážně jako doba tzv. čtvrté průmyslové revoluce, kdy se stále více prosazuje digitalizace a kybernetika, zůstávají i nadále nenahraditelnými některé, historicky již dlouho používané a také osvědčené, konstrukční prvky. Mezi takové bezesporu patří šroubové spoje, které sice byly v minulosti častokráte zkoumány a zdokonalovány, ale vzhledem ke stále trvající potřebě použití šroubových spojů v rozličných odvětvích a oborech, jejich inovace není skončena a je stále žádoucí. Potřeba šroubového spojení se prolíná mnoha sektory lidské činnosti, od těžkého průmyslu, přes jemnou mechaniku, až po využití v medicíně a v mnoha případech je stále ještě nenahraditelná jinými spojovacími technologiemi. Současným trendem výrobců závitových prvků, je zaměření na materiály a optimální povrchovou úpravu, které by vyhovovaly konkrétnímu účelu použití a odolávaly prostředí, kterému budou tyto spojovací prvky vystaveny.

Tato práce se zabývá spojovacími šrouby a maticemi, využitelnými v různých prostředích, s ohledem na použité materiály, povlaky, maziva a protikorozní ochranu. Těžiště této práce bude spočívat především v analýze předepjatého šroubového spoje. Kdy u vybraného vzorku šroubů a matic, budou prakticky ověřeny některé důležité vlastnosti a závislosti.

2. Rešerše řešené problematiky

Šroubové spoje se řadí mezi spoje rozebíratelné, tj. takové, které lze spojit a poté bez poškození znovu rozebrat. Realizují se závitovým spojením strojních součástí, z nichž jedna součást je čep opatřený vnějším závitem, který se zašroubuje do díry s vnitřním závitem ve druhé součásti. V praxi se šroubové spoje používají zejména ze dvou hlavních důvodů. Prvním případem je potřeba transformace otáčivého pohybu v pohyb posuvný (popř. obráceně), a s tím souvisejícím přenosem osové síly a krouticího momentu, zde se jedná o pohybové šrouby. Druhým případem je potřeba pevného rozebíratelného spojení s požadovanými vlastnostmi, které zajišťují spojovací šrouby. [1]

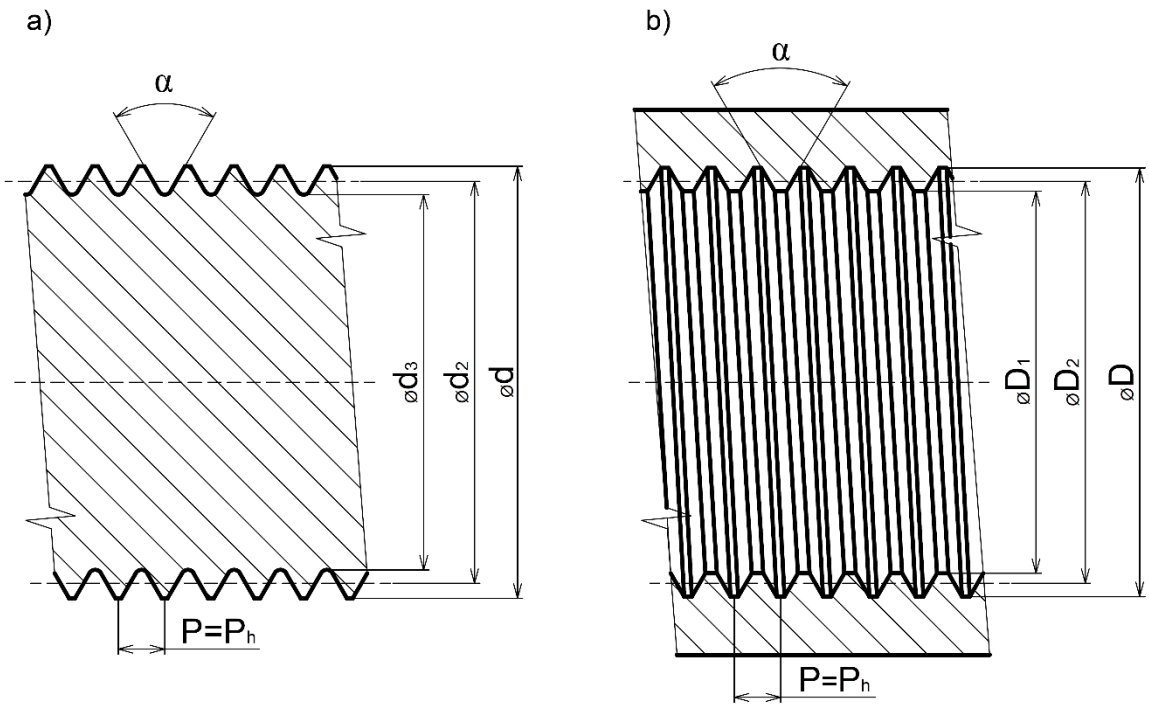
2.1. Základní pojmy

Základní pojmy a termíny, užívané v souvislosti se závity jsou definovány normou ČSN ISO 5408, ve které jsou uvedeny všechny důležité atributy závitů. Viz níže je uvedeno několik základních termínů, použitých ovšem i z jiných zdrojů, kde není pouze striktně uvedena definice, nýbrž podáno vysvětlení, které samozřejmě neodporuje výše uvedené normě.

Šroubovice – je základní prostorová křivka závitu, kterou tvoří bod, který se rovnoměrně otáčí kolem pevné osy a současně se rovnoměrně, ve směru téže osy, posouvá. Podle smyslu otáčení, lze rozlišit šroubovici pravotočivou a levotočivou. Pravotočivá šroubovice má směr navíjení ve směru hodinových ručiček, levotočivá se navíjí opačně. Jiným pohledem je možno šroubovici definovat jako křivku, která vznikne, když je pravoúhlý trojúhelník navinut na rotační válec (popř. kužel), přičemž vlastní šroubovici tvoří přepona trojúhelníku. Pokud bude mít vodorovná odvěsna trojúhelníku velikost obvodu podstavy válce, pak svislá odvěsna bude mít velikost stoupání šroubovice. [1]

Závit – je základním prvkem šroubů (vnější závity) a matic (vnitřní závity). Je tvořen pohybem tvořící plochy po šroubovici. Tvořící plochu - profil závitu, definuje osový řez závitem. Dle profilu závitu (jednoprofilové, víceprofilové) je možno závity rozdělit na jednochodé a vícechodé. [2]

Teoretický profil závitu je myšlený geometrický obrazec, naproti tomu jmenovitý profil závitu vznikne z teoretického profilu závitu zkosením, popř. zaoblením hran. Stoupání závitu P_h je nejkratší vzdálenost dvou stejnolehlých bodů na šroubovici. Rozteč závitu P je nejkratší vzdálenost dvou stejnolehlých bodů, dvou sousedních chodů závitu, z čehož vyplývá, že u jednochodého závitu je rozteč závitu rovna stoupání závitu. Úhel stoupání závitu γ vychází z již zmíněné základní představy o tvorbě šroubovice navinutím pravoúhlého trojúhelníku na základní válec. Tangenta úhlu stoupání je tedy dána poměrem velikosti stoupání závitu k obvodu podstavy základního válce. [2]



Obr. 1 Osový řez a) vnějším, b) vnitřním závitem [autor]

$\emptyset d\ [mm]$	*jmenovitý průměr závitu šroubu*
$\emptyset d_2 [mm]$	*střední průměr závitu šroubu*
$\emptyset d_3 [mm]$	*malý průměr závitu šroubu*
$\emptyset D\ [mm]$	*jmenovitý průměr závitu matice*
$\emptyset D_2 [mm]$	*střední průměr závitu matice*
$\emptyset D_1 [mm]$	*malý průměr závitu matice*
$\alpha\ [°]$	*vrcholový úhel závitu*
$P_h\ [mm]$	*stoupání závitu*

2.2. Historie závitů

První použití šroubu, jako konstrukčního prvku, nelze s určitostí přiřadit k žádnému konkrétnímu datu. Lze se domnívat, že inspirací pro šroubovitý tvar byla původně příroda. Někteří autoři uvádějí, že prapůvodním základem pro šrouby mohl být provazec navinutý na dřevěnou kulatinu, čehož se ve starověku používalo jako pohonu. Opotřebením, či zatvrdnutím provazu, popř. vydřením drážky v kulatině, mohl být vytvořen primitivní závit. Dle některých historických pramenů lze šroubovou plochu, jako použitelný prvek pohybových šroubů, zařadit do 3 stol. př. n. l. do doby Archiméda (287 – 212 př. n. l), jemuž je připisováno prvenství v aplikaci technicky využitelného šroubu. Archimédův šroub byl využíván v zavodňovacích čerpacích strojích, které Archimédes postavil. Jiné historické prameny uvádí, že již mnohem dříve před narozením Archiméda bylo ve starém Egyptě k čerpání vody využíváno šnekových čerpadel.

Obr. 2 Archimédes [4]

Obr. 3 Leonardo Da Vinci [5]

Doložené použití prvních lisů, postavených k výrobě vína a olejů, opatřených šroubovým mechanismem, se datuje do roku 239 př. n. l. Návrhem lisů se zabýval také učený Leonardo Da Vinci (1452 – 1519), jednalo se o lisy na víno a oleje a také navrhnul jednovřetenový lis na knihy. Johann Danner z Norimberku použil v r. 1550 poprvé mosazné vřeteno ke knihařskému lisu. Architekt z Padovy Vittorio Zonca (1568 – 1602) doporučoval u lisu na knihy použít vřeteno odlité z kovu, popř. ze železa se čtyřchodým závitem. Matice měla být kovová.

Závitová plocha se dále uplatňovala také k vrtání do země, ke zdvihání břemen, k vyvozování pohybu anebo v konstrukci přístrojů a nářadí. Pokud se týče čistě spojovacího šroubového spojení, není dosud žádný doklad o jeho prvním použití. Je možno se domnívat, že již starověký řecký matematik a válečník

Archytas (440 př. n. l.) vyrobil jistý druh šroubového hřebíku. Z doby antiky a raného středověku je dle literatury dochováno jen velmi malé množství nálezů, užitných a dekorativních předmětů. Mezi ně patří např. šroub bez hlavy z r. 350 nalezen v Anglii v sídle Silchestr, nebo čtyřboká železná matice z r. (180 – 260) s pěti závity, nalezená v Limes u Niederbiber. V Gradac v Herzegovině byl nalezen bronzový šroub do dřeva z r. 350. Z období 4. a 5. století existují nálezy zejména náramků, spon a křížů opatřených různými závity. Poté skoro tisíc let následuje období, kdy není použití závitů nijak doloženo. Zhruba od 15. stol. se znovu objevují šrouby a matice jako potřeby pro domácnost, dále např. u rytířských brnění. V této době už byla hlava šroubu upravena pro klíč, nebo pro šroubovák. Koncem 18. století nastává rozmach použití šroubů do dřeva (vrutů), které se staly obchodním artiklem nejdříve. [3]

2.3. Normalizace závitů

Obr. 4 Joseph Whitworth [9]

Okolo roku 1800 byl Henrym Maudslayem, v Anglii, vyvinut soustruh v již moderním pojetí. Do tohoto období je datován počátek snahy o standardizaci, zpřesnění výroby a možnosti zaměnitelnosti závitových součástí. Do té doby a ještě i dlouho poté probíhala výroba závitů tak, že v každém regionu, či oblasti měly vyrobené závity jiný rozměr, nešlo je dokonce zaměnit ani v rámci jedné konkrétní dílny. Každý řemeslník a později s rozvojem manufaktury každá větší dílna, měli svou vlastní závitovou soustavu založenou na palcové míře. V roce 1841 Joseph Whitworth představil rozměrovou řadu svého univerzálně použitelného Whitworthova závitu. Nová Whitworthova norma se rozšířila také díky britské železnici, která ji začala rovněž používat. Od Whitworthovy normy byly odvozeny některé další britské soustavy závitů (BSF, BSPP, BSTP). Nezávisle na Whitworthovi, zhruba ve stejném období, přišel v USA William Sellers se svým palcovým Sellersovým závitem, který byl později zaveden jako United States Standard (USS). Koncem 19. stol. vznikaly ve Francii a Německu různé metrické

soustavy, které byly sjednoceny založením International Organization for Standardization (ISO – zal. r. 1947). V roce 1948 byly zejména v USA a Kanadě sjednoceny palcové normy vznikem unifikované palcové soustavy (UTS). V dnešní době patří mezi nejužívanější normy ISO, DIN a UTS. Standardizace závitů umožnila zlevnění, zrychlení a zpřesnění výroby a zejména přechod k hromadné a sériové výrobě. [6], [7], [8]

Jednotlivá označení různých druhů závitů používaných v České republice specifikuje norma ČSN 01 4004, která také odkazuje na ostatní příslušné normy, které upravují konkrétní typy používaných závitů spojovacích i pohybových.

Tab. 1 Používané spojovací závity

ZÁVIT	OZN.	NÁZEV NORMY	OZN. NORMY
Metrický	M	Závity ISO pro všeobecné použití – Základní profil – Část 1: Metrické závity	ČSN ISO 68-1
		Metrické závity ISO pro všeobecné použití - Přehled	ČSN ISO 261
		Metrické závity ISO pro všeobecné použití – Základní rozměry	ČSN ISO 724
		Metrické závity pro jemnou mechaniku a optiku. Průměry a rozteče	ČSN 01 4021
		Metrický závit pro součásti z plastů	ČSN 01 4026
Whitworthův	W	Základní pravidla zaměnitelnosti. Whitworthův závit	ČSN 01 4030
Trubkový válcový	G	Trubkové závity pro spoje netěsnící na závitech – Část 1: Rozměry, tolerance, označování	ČSN EN ISO 228-1
Tr. vnější kuželový	R	Trubkové závity pro spoje těsnící na závitech – Část 1: Rozměry, tolerance, označování	ČSN ISO 7-1
Tr. vnitřní kuželový	Rc		
Tr. vnitřní válcový	Rp		
Oblý	Rd	Základní pravidla zaměnitelnosti. Oblé závity	ČSN 01 4037
Edisonův	E	Edisonův závit	ČSN 01 4038
Pancéřový	P	Pancéřový závit	ČSN 01 4035
Unifikovaný palcový	UN UNC UNF UNEF UNS	Unified Inch Screw threads	ANSI/ASME B1.1 – 2003
		Unified Screw threads	BS 1580

Tab. 2 Používané pohybové závity

ZÁVIT	OZN.	NÁZEV NORMY	OZN. NORMY
Lichoběžníkový rovnoramenný	Tr	Základní pravidla zaměnitelnosti. Lichoběžníkový závit rovnoramenný jednochodý	ČSN 01 4050
		Základní pravidla zaměnitelnosti Lichoběžníkový závit rovnoramenný vícechodý	ČSN 01 4051
Lichoběžníkový nerovnoramenný (Pilový)	S	Lichoběžníkový závit nerovnoramenný. Základní rozměry	ČSN 01 4052

Pozn.: Mimo výše uvedeného přehledu, se dále okrajově používají některé další speciální typy závitů, jako např. varianty Whitworthova závitu (BSW, BSF, BSC) upravené normou BS 84 – 2007. V minulosti byl, v některých aplikacích, jako pohybový šroub používán také závit čtvercový, který není normalizován a který se v dnešní době již nevyužívá.

2.4. Výroba závitů

Technologie výroby závitů je závislá zejména na možnostech použitých materiálů. Nejběžnějším způsobem výroby ocelových závitů je třískové obrábění, dále se používá tváření a na posledním místě stojí lisování a lití, což se týká především plastických hmot. Pro řezání vnějších závitů se používají závitové čelisti, které se v případě ručního řezání upínají do vratidel a v případě strojního řezání do držáku. Při řezání na soustruhu je využíváno automatových závitových čelistí, nebo produktivních závitových hlav s noži. Pro řezání vnitřních závitů se používají závitníky. Pro ruční řezání se užívá sady závitníků, které se taktéž upínají do vratidel. V případě strojního řezání vnitřních závitů se používají závitníky, které jsou upínány do závitových hlav závitořezných strojů. Při soustružení závitů se dále používají soustružnické nože jednoprofilové, kdy je závit řezán postupně v několika záběrech anebo také hřebenové, kdy je závit vyřezán při jediném záběru. Závity lze realizovat také frézováním, pomocí kotoučových, hřebenových a stopkových závitových fréz. Dále do plného materiálu je možno, v případě číslicově řízených automatů, vrtat a současně řezat vnitřní závit pomocí obkružovací frézovací hlavy.

Jako dokončovací operaci, např. při zvýšeném požadavku na tvar a povrch závitu, se používá broušení pomocí jednoprofilových, nebo víceprofilových kotoučů na speciálních bruskách.

Obr. 5 CNC řezání závitu [11]

Při výrobě závitů tvářením nedochází k odebírání třísky, nýbrž k plastické deformaci, po které nastává zpevnění materiálu, což je výhodné z hlediska možnosti většího zatížení závitového spoje. Pro tváření vnitřních závitů se používají tvářecí závitníky, přičemž výsledný povrch, tvar i mechanické vlastnosti předčí závity vyráběné klasickým třískovým obráběním. Vnější závity se tvářejí válcováním, což je velmi produktivní způsob výroby závitů. Radiální válcování probíhá pomocí válcovacích čelistí, nebo mezi kotouči. Válcovat lze také axiálně, a to na soustruhu za užití závitové válcovací hlavy. [10]

Obr. 6 Válcování závitu [12]

2.5. Tolerování a kontrola závitů

Vnější závity (šrouby) se tolerují na střední průměr d_2 [mm] a velký průměr d [mm], vnitřní závity (matice) se tolerují na střední průměr D_2 [mm] a malý průměr D_1 [mm]. Uložení s vůlí je nejvíce rozšířené a pro ISO metrický závit je stanoví norma ČSN 01 4315, která udává doporučené hodnoty, mezních úchylek pro běžné použití. Doporučené uložení s vůlí je 6H/6g a lze je zašroubovat rukou.

Tab. 3 Uložení s vůlí

MATICE		ŠROUBY			LÍCOVÁNÍ
G	H	e	g	h	
	4H5H			4h	Jemné
6G	**6H**, 5H6H	6e	**6g**	6h	Střední
	7H		8g		Hrubé

Uložení přechodné je uložení s malou vůlí, nebo s malým přesahem, což zajišťuje určitou těsnost spoje, pro metrický závit je stanoví norma ČSN 01 4316. Přechodné uložení se užívá kupříkladu u zašroubovaných konců závrtných šroubů a nelze je v ruce zašroubovat nebo vyšroubovat. [2]

Tab. 4 Uložení přechodné

Závit	Průměr závitu	d [mm]		Základní úchylka	Stupeň přesnosti
		od	do		
Vnější	d [mm]	5	45	g, h	6
	d_2 [mm]	5	16	jk, k, m, mn	1, 2, 4
		18	30	j, k, m, mn	1, 2, 4
		33	45	jh, k, mn	1, 4
Vnitřní	D [mm]	5	45	H	-
	D_2 [mm]	5	30		2, 3, 4, 5
		33	45		2, 5
	D_1 [mm]	5	45		5, 6

Uložení s přesahem pro metrický závit stanoví norma ČSN 01 4317.

Tab. 5 Uložení s přesahem

Závit	Průměr závitu	Základní úchylky při rozteči P		Stupeň přesnosti
		do 1,25 mm	přes 1,25 mm	
Vnější	$\mathrm{d}\ [\mathrm{mm}]$	e	c	6
	$\mathrm{d}_2\ [\mathrm{mm}]$	n, p, r		2, 3
Vnitřní	$\mathrm{D}\ [\mathrm{mm}]$	H		-
	$\mathrm{D}_2\ [\mathrm{mm}]$	H		2
	$\mathrm{D}_1\ [\mathrm{mm}]$	D	C	4, 5

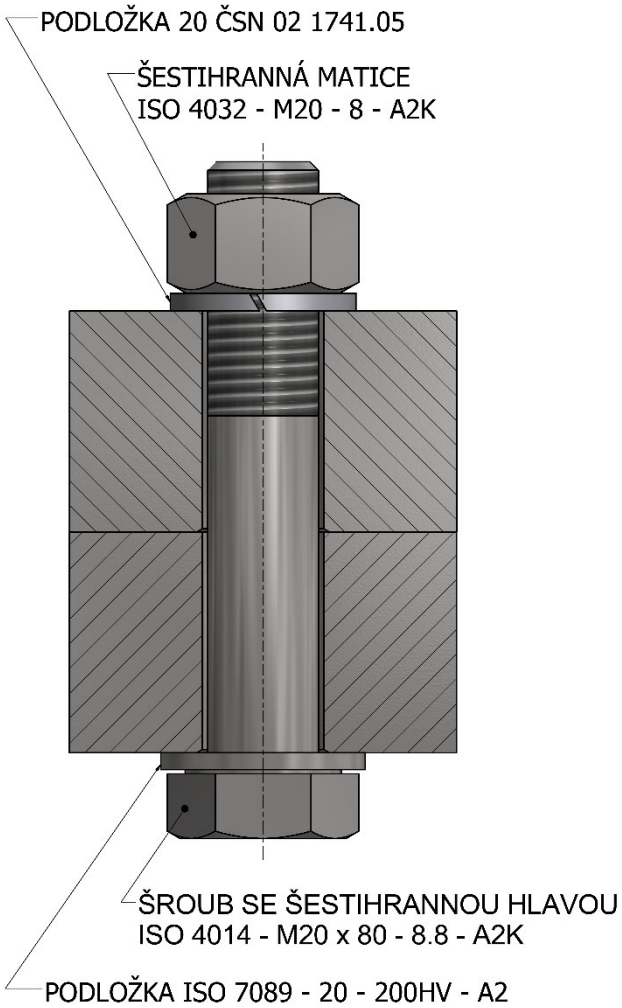
Pozn.: Výše uvedené hodnoty základních úchylek a stupňů přesnosti platí pro určité hodnoty délek zašroubování, jež jsou v příslušných zmíněných normách uvedeny.

U vnějších metrických závitů se kontroluje a měří jmenovitý průměr $\mathrm{d}\ [\mathrm{mm}]$ pomocí posuvného měřítka, mikrometru, optickými metodami apod. Střední průměr $d_2\ [\mathrm{mm}]$ je možno stanovit závitovým mikrometrem, nebo pomocí tzv. „třídrátkové“ metody která je upravena normou ČSN 25 4108. Stoupání, popř. rozteč závitu lze měřit posuvným měřítkem, nebo závitovými šablonami viz norma ČSN 25 4620. Ke kontrole závitů se dále používají třmenové závitové kalibry (které lze seřizovat) a mezní kalibry – pevné závitové kroužky (dobré a zmetkové) upravené normami třídy 2540 U vnitřních metrických závitů je pro kontrolu využíváno závitových válečkových kalibrů (závitových trnů), které mají dobrou a zmetkovou stranu. Při přesných měřeních závitů se používají také mikroskopy, jimiž lze měřit všechny charakteristiky závitů. [13]

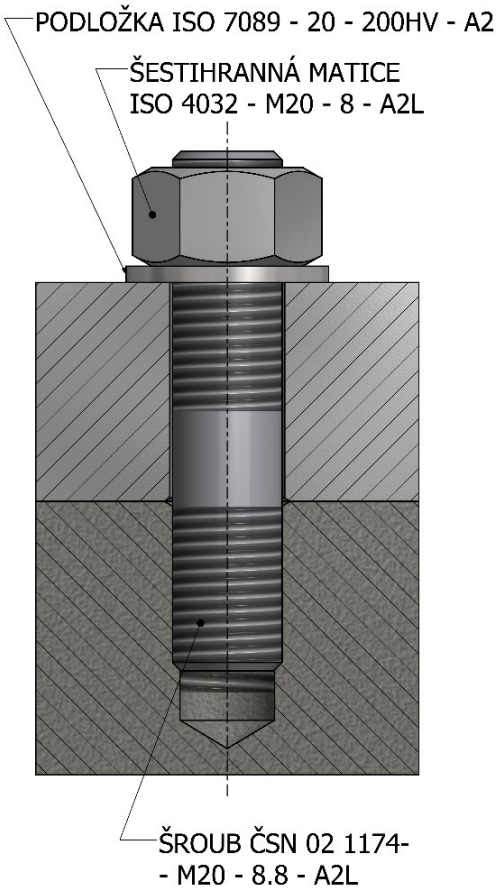
Obr. 7 Závitový trn (kalibr) [13]

2.6. Šroubové spoje

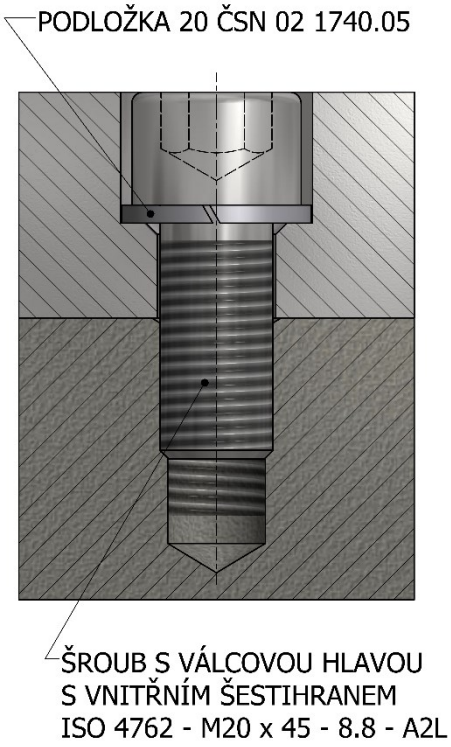
Účelem a hlavní výhodou šroubových spojení je možnost opakované montáže a demontáže rozličných strojních dílů a skupin. Ke spojení dvou nebo více součástí se používá šroubů, matic a většinou také podložek. V některých případech je vnitřní nebo vnější závit vytvořen přímo na spojované součásti. Dotažením závitové dvojice je pak realizováno pevné rozebíratelné spojení, které může přenášet různé typy zatížení, na které musí být dimenzováno. Tímto dojde k vytvoření požadovaného spoje, jehož vlastnosti jsou závislé na mnoha faktorech, mezi něž patří materiál, jakost povrchu, typ závitu, povlak, mazání apod. Na dnešním trhu se spojovacím materiálem je pestrá škála šroubů a matic s normalizovanými tvary, typy závitů a stoupáními závitů. Některé běžně používané způsoby provedení šroubových spojení jsou naznačeny níže.



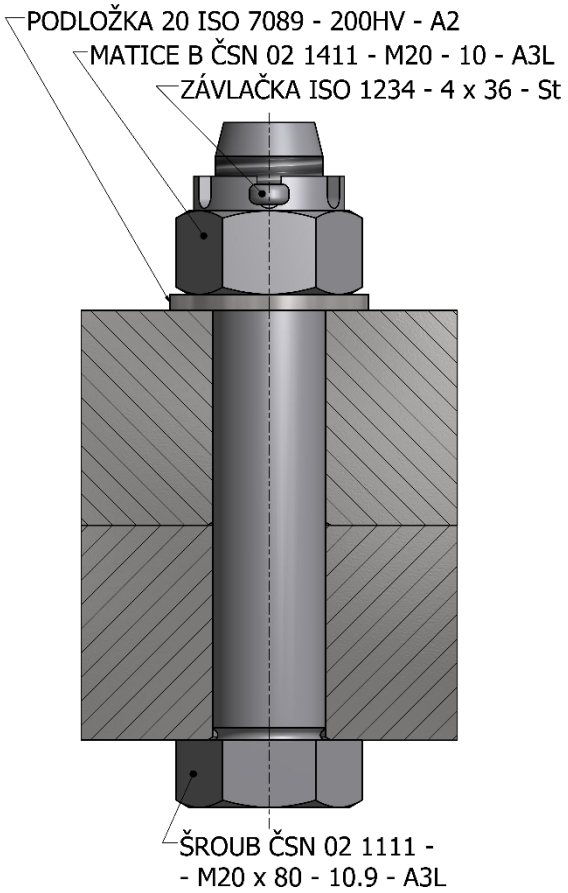
Obr. 8 Spoj s průchozími dírami [autor]



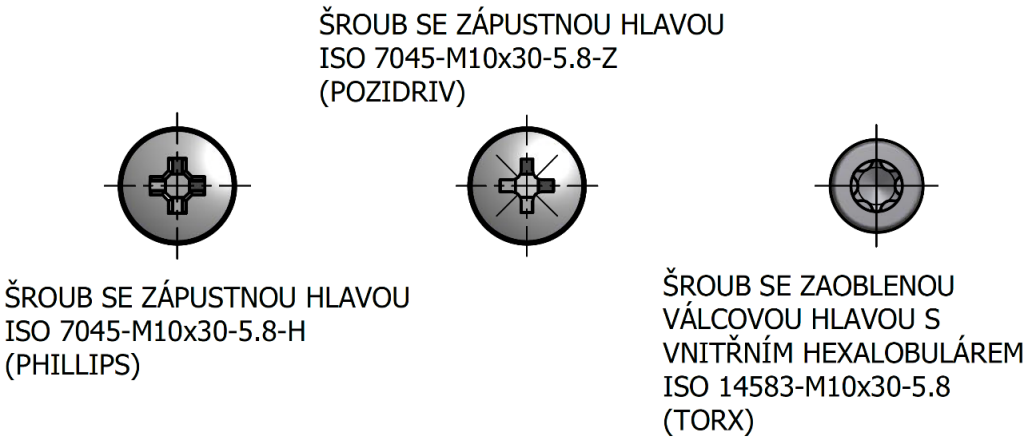
Obr. 9 Spoj se závrtným šroubem [autor]



Obr. 10 Spoj se zapuštěnou hlavou šroubu (INBUS) [autor]



Obr. 11 Spoj s lícovaným šroubem a korunovou maticí, pojištěný závlačkou [autor]



Obr. 12 Další používané typy šroubů [autor]

Spojovací prvky, šrouby a matice se vyrábějí z uhlíkových ocelí, ocelí legovaných, korozivzdorných, z mosazi, slitin hliníku a také z plastů. Nejrozšířenější využití v našem strojírenství má však stále ocel. Šrouby a matice se rozdělují do tříd pevností. Značky jednotlivých tříd pevností šroubů tvoří dvě číslice oddělené tečkou. Číslo vlevo od tečky udává $1/100$ jmenovité pevnosti v tahu $Rm\ [N/mm^2]$, číslo vpravo od tečky udává desetinásobek poměru jmenovité meze kluzu $Re\ [N/mm^2]$, popř. $Rp_{0,2}\ [N/mm^2]$, ke jmenovité pevnosti v tahu $Rm\ [N/mm^2]$.

Tab. 6 Pevnostní třídy šroubů dle ČSN EN ISO 898 – 1: 2014

Třída pevnosti šroubů	Materiál
4.6 4.8 5.6 5.8 6.8	Uhlíková ocel
8.8 9.8 10.9	Uhlíková ocel s přísadami (B, Mn, Cr) kalená a popouštěná Uhlíková ocel kalená a popouštěná Legovaná ocel kalená a popouštěná
12.9	Legovaná ocel kalená a popouštěná
<u>12.9</u>	Uhlíková ocel s přísadami (B, Mn, Cr, Mo) kalená a popouštěná

U matic běžných a vysokých je třída pevnosti určena jedním číslem, které odpovídá číslu vlevo od max. vhodné třídy šroubu, se kterým mohou být smontovány. Matice nízké jsou značeny dvěma čísly, nula značí redukovanou schopnost zavedení matice, druhé číslo udává $1/100$ jmenovité pevnosti v tahu.

Tab. 7 Pevnostní třídy matic dle ČSN EN ISO 898 – 2: 2014

Třída pevnosti matic	Materiál
04	Uhlíková ocel
05	Uhlíková ocel (kalená i popouštěná)
5 6 8 9	Uhlíková ocel
10 12	Uhlíková ocel (kalená a popouštěná)

2.6.1. Protikorozní ochrana povlakováním závitů

Spojovací součásti šrouby, matice a také podložky, jsou povrchově upravovány různými technologiemi, v závislosti na požadované odolnosti vůči prostředí, kterému mají být vystaveny a také vzhledem ke své velikosti.

Tab. 8 Přehled povrchových úprav závitů dle ČSN 01 4060

Základní skupina povrchové úpravy	Podkladový kov	Povrchová úprava
Nekovové anorganické povlaky	ocel, litina, hliník a jeho slitiny	černění, fosfátování, anodická oxidace
Kovové elektrolyticky vyloučené povlaky	ocel, litina	zinkování, kadmiování, cínování, niklování, niklování na mezivrstvě mědi, niklování a chromování,
	měď a její slitiny	vylučování slitinových povlaků niklování, niklování a chromování, cínování
Kovové mechanicko – chemicky vyloučené povlaky	ocel, litina	zinkování, kadmiování, vylučování slitinových povlaků
Kovové difuzní povlaky	ocel, litina	chromování
Vakuové povlaky	ocel, litina	zinkování, kadmiování, hliníkování
Chemicky vyloučené povlaky	ocel, litina	niklování

Nejvíce používaným prvkem při ochraně oceli je zinek. Na vlhkém vzduchu tvoří zinek zásadité uhličitany, jež jej chrání před další korozí. Aby bylo dosaženo také požadovaných mechanických vlastností povlaku, používá se ve slitinách s dalšími prvky (Al, Cu, Mg, Ti, Ni, Cr). Zinek má dobrou korozní odolnost ve vodě a anodický charakter vůči oceli. Elektrolytické povlaky zinku a jeho slitin nacházejí nejčastější použití u šroubů a matic menších rozměrů. Jsou upraveny normou ČSN EN ISO 4042 a využívají se v automobilovém průmyslu, elektrotechnice, apod. Žárové povlaky zinku nanášené ponorem v tavenině, upravuje norma ČSN EN ISO 10684. Používají se obvykle pro šrouby a matice větších rozměrů, využitelné ve stavebnictví, stejně jako difuzní povlaky (sherardizace) viz norma ČSN EN ISO 13811. K výrobě šroubů a matic se používají také korozivzdorné oceli (1.4301, 1.4401). U kterých však hrozí riziko vzniku bimetalické koroze (galvanický článek), zvláště jsou-li užity při spojování žárově zinkovaných dílů. [14], [15]

Neelektrolyticky nanášené povlaky ze zinkových mikrolamel – jsou moderní alternativou elektrolytických a žárově nanášených zinkových povlaků. Tato technologie je upravena normou ČSN EN ISO 10683, zajišťuje vysoký stupeň ochrany při malých tloušťkách vrstev. Zinkové mikrolamely jsou hlavní složkou základních povlaků – Base Coats, označují se jako Zinc Flake Coatings (FlZn). Vlastní povlak je tvořen nanášením suspenze zinkových a hliníkových mikrolamel, s vhodným pojivem. Působením tepla dochází k vytvrzení povrchu. Povlaky ze zinkových mikrolamel mají celou řadu výhod, mezi které patří například absence dnes již zakázaného šestimocného chromu, protože při této technologii nedochází k vyvíjení vodíku, není zdrojem vodíkové křehkosti, také lze předem zhruba volit požadovaný součinitel tření. Ocel je chráněna před korozí, protože zinek je méně ušlechtilý než ocel a koroduje přednostně, a to do jisté míry i tehdy když je povlak poškozen. [14], [16]

K velmi rozšířeným systémům povlakování zinkovými mikrolamelami patří ***DELTA – MKS® – Systeme***. Základní povlaky (base coats) jsou nabízeny v různých variacích, organických i anorganických provedeních, s obchodními názvy *Delta tone* a *Delta protekt*. Pro zvýšení korozní a chemické odolnosti se dále používají vrchní krycí povlaky (top coats). Jedná se o epoxy – fenolické, vysoce zesíťované povlaky *Delta Seal, Delta Flex* apod. Některé top coats mají již integrované mazivo a jsou dodávány v různých barevných odstínech. Představitelem vodou ředitelných systémů základního (FlZn) povlaku je ***GEOMET*** firmy Dacral, který také může obsahovat integrované mazadlo. I zde je možno použít krycí vrstvu, pro zvýšení korozní ochrany a odolnosti, nebo lubrikant. ***MAGNI*** je anorganický ředidlový systém (FlZn), který se skládá ze základní vrstvy a pasivace, opět s možností integrovaného lubrikantu. Posledním významným představitelem technologie povlakováním zinkovými mikrolamelami je ***ZINTEK*** firmy Kunz, použitelný jako samostatný povlak, nebo také s krycím povlakem (Techseal). [17], [18]

Doplnění k výše uvedeným způsobům protikorozní ochrany, tepelné a chemické odolnosti, tvoří různé další systémy, užívané k utěsnění a zajištění šroubových spojů. Tyto materiály jsou barevně označeny a aplikovány na předepsaný počet závitů.

2.6.2. Mazání závitů

Přítomnost mazadla v závitech, popř. pod hlavou šroubu, má stěžejní význam při vyvozování svěrných sil, při utahování šroubového spoje. Při absenci maziva se v závitové ploše vytváří povrchové kapiláry a tím dochází k zadírání. Což lze pozorovat např. při použití vysoce legovaných šroubů a matic z austenitických ocelí, které na povrchu nemají žádnou oxidickou vrstvu, a tak může velmi lehce dojít ke svaření za studena. Součinitel smykového tření mezi dvěma ocelovými povrchy, při těchto kombinacích materiálů, je přibližně $f > 0{,}3$. Použití maziva tento součinitel snižuje, a tím lze ve spoji dosáhnout větších svěrných sil. Vlivem menšího tření v závitu je dřík šroubu méně namáhán na krut a dosahuje se lepšího záběhu závitových ploch, vlivem snížení místních špiček pnutí.

Pro snížení tření v závitové dvojici se obecně užívají oleje, plastická maziva, tuhá maziva a kluzné laky. Použití olejů není příliš vhodné, protože špatně odolávají tlakům a stárnutí, což se týká i plastických maziv. Z tuhých maziv se nejvíce používají grafit a MoS_2 (sulfid molybdenu), které mají lamelovou strukturu. Výhodou grafitu je možnost použití při vysokých teplotách (nad 400°C). Chemickým složením MoS_2 je dána jeho dobrá přilnavost a vysoká odolnost proti tlaku. Tuhá maziva bývají smíchána s oleji, nebo plastickými mazivy. Dále se k mazání využívají i další prvky, jako jsou měď, olovo a hliník. Aplikace kluzných laků je moderním trendem mazání. Kluzné laky jsou tvořeny kombinací tuhých maziv (grafit, MoS_2, teflon, popř. jiné syntetické látky) s rozpouštědly. Po nanesení vrstvy kluzného laku dojde k vytvrzení na vzduchu, popř. vypálení v peci. Kluzná vrstva velmi dobře odolává tlaku i teplotám, je chemicky odolná a ve speciálních případech snižuje koeficient tření až na hodnotu $f \approx 0{,}03$. Příklady moderních maziv vhodných pro mazání šroubových spojů, viz ***Příloha 1***. [19]

2.6.3. Přehled moderních (na trhu dostupných) spojovacích prvků

V současné době je na trhu nepřeberné množství, různých druhů standardních i speciálních spojovacích prvků, které jsou výrobci a dodavateli nabízeny v různých provedeních, co se týče materiálů, povlaků a korozní odolnosti. Následující přehled nabízí možnosti dostupných řešení, využitelných pro realizaci třecích šroubových spojů pro různá použití. Nabídka moderních produktů firmy Bossard:

ecosyn® - fix – šroub s integrovanou pružnou podložkou odolává vibracím a otřesům, snižuje ztráty předpětí, kompenzuje roztažnost, zajišťuje spolehlivý a trvanlivý spoj.

ecosyn® grip – šroub, který má vysokou odolnost proti únavě a brání uvolnění spoje v prostředí s vibracemi. Je optimalizován tak, aby nedocházelo k šíření trhlin podél hranic zrn při dlouhodobém namáhání.

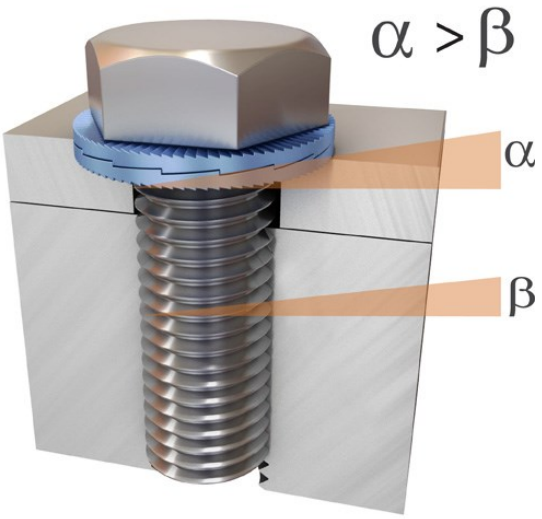
Obr. 13 Šroub ecosyn® - fix [20]

Obr. 14 Šroub ecosyn® grip [20]

Obr. 15 Šrouby ošetřené povlakem ecosyn® lubric [20]

ecosyn® lubric – je tribologický suchý povlak, jedná se o neelektrolyticky nanášenou povrchovou úpravu spojovacích prvků, která má výborné mazací vlastnosti a také ochranu proti korozi. Tímto je zaručen nízký konstantní koeficient tření a malý rozptyl. Povlak je složen z kompozitu fluorovaných polymerů a submikroskopických částic tuhého maziva organického původu v syntetické pryskyřici a rozpouštědlech. Tato úprava je schopna také vyrovnávat nerovnoměrnost povrchu. [20]

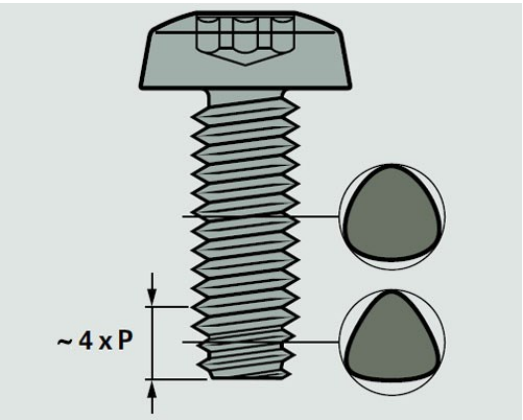
NORD LOCK **®** - systém společnosti Nord-lock Group zajišťující spoje, které jsou velmi dynamicky zatížené. Úhel styčných ploch podložek je větší než úhel stoupání závitu, povolování je zamezeno klínovým účinkem ploch. [21]



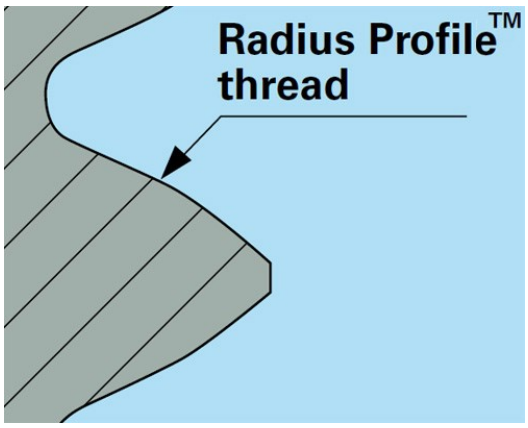
Obr. 16 spoj zajištěný klínovými samojistícími podložkami [21]

Obr. 17 Detail klínové podložky s radiálními zuby na vnější straně [21]

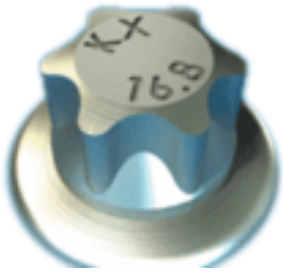
TAPTITE® - samotvářecí šrouby firmy Arnold Unformtechnik, licencované firmou KAMAX. Jedná se o šrouby, které do předpřipraveného otvoru vytvoří závit bez vytvoření třísky. Šrouby mají trojúhelníkový průřez a rádiusový profil závitu, což umožňuje použití nižšího krouticího momentu, při vyšším předpětí s malým rozptylem. [22]



Obr. 18 TAPTITE DUO se dvěma stabilizačními závity, pro kolmé zavedení [22]

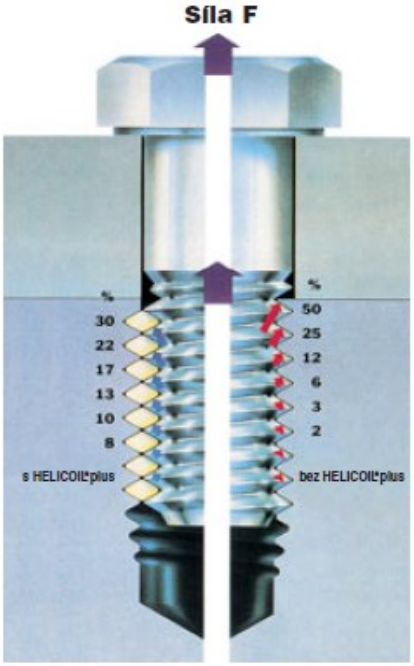


Obr. 19 Detail závitu TAPTITE [22]



Obr. 20 Šroub pevnosti 16.8 [23]

Ultrapevné šrouby firmy KAMAX, zabývající se převážně výrobou šroubů pro automobilový průmysl. Vysoké pevnosti šroubů 14.8, 15.8 a 16.8 jsou kombinovány s vynikající tuhostí. Zvýšení napínací síly se oproti běžným šroubům pohybuje okolo (20–30)%, při zachování elasticity. Vzhledem k použitým materiálům nejsou šrouby ohroženy vodíkovou křehkostí. [23]

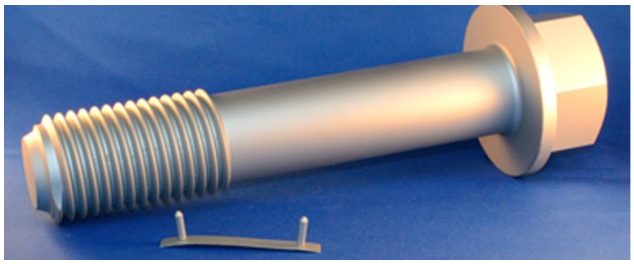


Obr. 21 Rozložení zatížení [24]

HELICOIL® PLUS - závitová vložka firmy Böllhoff, která je určena pro realizaci pevnostních závitů, zejména v materiálech menších pevností, jako jsou např. slitiny neželezných kovů. Síly se v závitu vložky přenášejí z boku na bok, tím pádem je zatížení rozloženo rovnoměrněji na větší počet závitů, než v případě klasického závitového spojení. Vložka je vyrobena z drátu, z ušlechtilé oceli ve tvaru šroubovice, který má lichoběžníkový profil, přičemž výsledkem přesné výrobní technologie je vnitřní kalibrovaný závit. [24]

Obr. 22 Závitová vložka [24]

GEOMET 500 - povrchová úprava mikrolamelami zinku na vodní bázi, nahrazující DACROMET 500. Působí zejména proti korozi, a to kombinací mikrolamel zinku a hliníku, které v tenké vrstvě (5–7) μm vytvářejí bariéru mezi ocelí a korozním prostředím. Hodnota koeficientu tření v závitech je vlivem integrovaného mazadla cca 0,15 přičemž tuto hodnotu je možno snížit další úpravou povrchu. [25]



Obr. 23 Šroub s povlakem Geomet 500 [25]

Systém HRC – sestava šroubu s kalibrovaným předpětím. Skládá se ze šroubu s drážkovaným dvanácticípým koncem, pevnosti 10.9, HRD matice a podložky. V klasické sestavě šroubu a matice je po dotažení nakumulováno velké množství krouticího momentu, který má tendenci spoj povolovat, zvláště u dynamicky namáhaných konstrukcí. Sestava HRC není utahována klasickým způsobem, nýbrž smykovou dotahovačkou, která způsobí vznik pouze axiálního

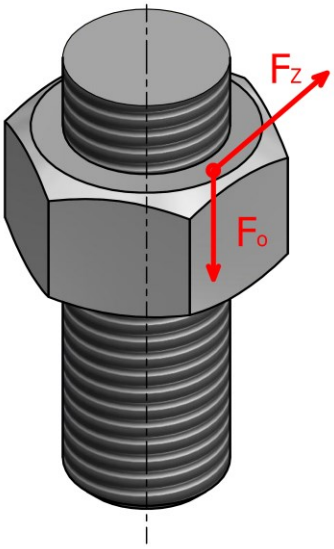
Obr. 24 HRC se zapuštěnou hlavou [26]

napětí ve šroubu, bez krouticího momentu. Smyková utahovačka je elektrický stroj se dvěma objímkami a planetovými převody. Při dotahování drží vnitřní objímka utahovačky drážkovaný konec šroubu a vnější objímka otáčí maticí, dokud není vytvořeno správné napětí. Poté se vnější objímka zastaví a vnitřní objímka se začne otáčet a odkroutí smykem konec drážkovaného šroubu. Správné napětí je zajištěno lomovým krčkem umístěným mezi koncem šroubu s drážkováním a jeho prvním závitem, a dále koeficientem tření. Tato technologie se řadí mezi velmi účinnou a bezpečnou technologii provedení třecích šroubových spojů a byla aplikována na mnoha mostních konstrukcích, stadionech apod. Společnost: Tension Control Bolts Ltd. [26]

Obr. 25 HRC svorník [26]

3. Silový rozbor v závitové dvojici

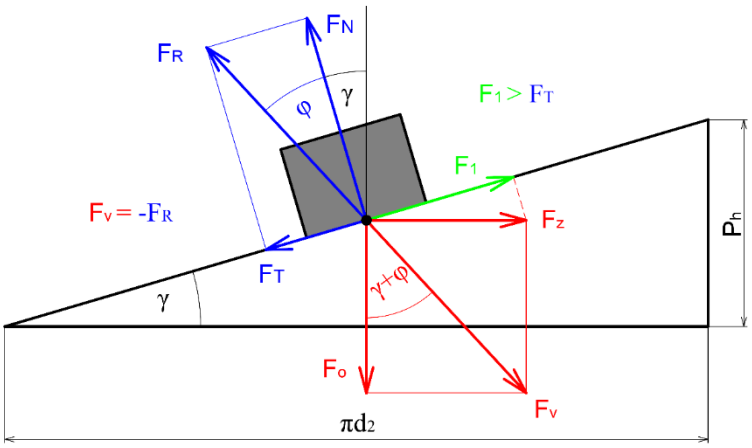
3.1. Silové poměry v závitu



Obr. 26 Závitová dvojice [autor]

Při analýze silových poměrů v reálné závitové dvojici, je jako zjednodušený model uvažován nejprve plochý profil závitu. Přičemž je využita analogie s tělesem pohybujícím se po nakloněné rovině. Síly, které jsou reálně rozloženy v závitu, jsou zde pro jednoduchost redukovány do jediného bodu. Rovina je nakloněna o úhel stoupání závitu γ. Hnací obvodová síla otáčející maticí F_Z působí na rameni, kterým je polovina středního průměru závitu d_2. Ve směru osy šroubu působí zatěžující osová síla F_O, která odpovídá tíze břemene, na nakloněné rovině. Výslednice těchto dvou sil F_V vyvozuje opačnou reakční sílu F_R, kterou lze rozložit na třecí sílu F_T působící proti smyslu otáčení matice, ve směru vinutí závitu a na ní kolmou normálovou složku F_N. Úhel, který odklání reakční sílu F_R od její normálové složky F_N je třecí úhel φ. Situace při utahování matice je naznačena na *Obr. 27* a platí pro ni následující vztah *3.1.1*. [27]

$$F_Z = F_O \cdot tg\,(\gamma + \varphi) \qquad 3.1.1$$

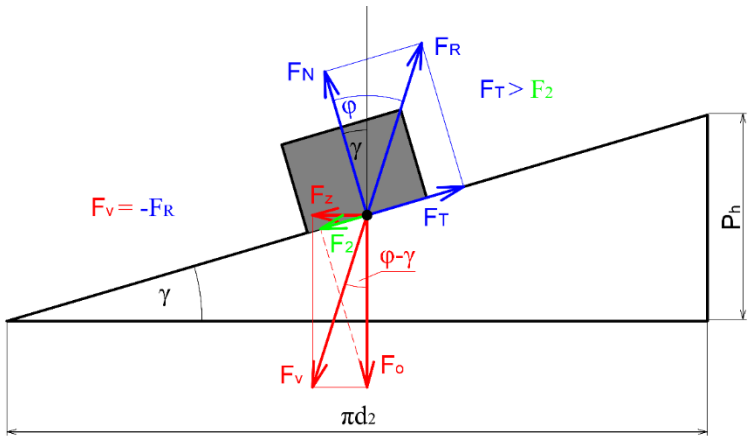


Obr. 27 Utahování matice [27]

Při analýze povolování matice je třeba brát v úvahu tzv samosvornost závitové dvojice. Samosvornost závitu se uplatňuje zejména u spojovacích šroubů, kde je jejich důležitou vlastností, bez níž by nebylo možno realizovat ve šroubovém spoji předpětí. U pohybových šroubů je samosvornost žádoucí například u svěráků, popř. u různých typů mechanických šroubových zvedáků automobilů, lisů apod. Podmínkou samosvornosti je, aby se matice nedala do pohybu působením pouze osové síly, tudíž aby třecí síla F_T byla větší než síla F_2 vyvozená zatěžující silou F_O. Po dosazení do této podmínky a algebraických úpravách vychází podmínka samosvornosti, která koresponduje s *Obr. 28* a platí pro ni vztahy *3.1.2* a *3.1.3*. [27]

$$\varphi > \gamma \qquad 3.1.2$$

$$F_Z = F_O \cdot tg\,(\,\varphi - \gamma\,) \qquad 3.1.3$$

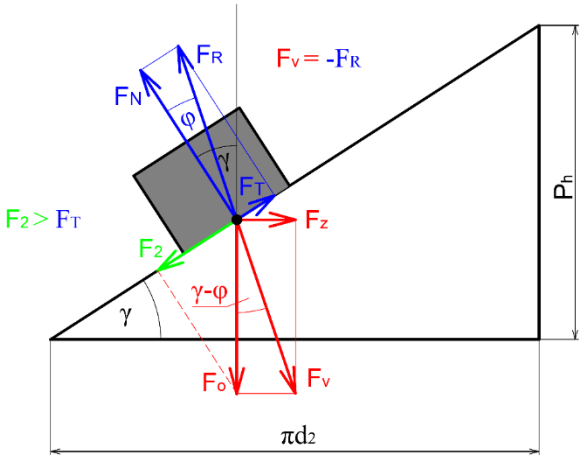


Obr. 28 Samosvorný závit - povolování matice [27]

Nesamosvorné závity nacházejí uplatnění v případě pohybových šroubů a matic při přenosu krouticího momentu v osovou sílu a naopak. U nesamosvorných závitů je třecí síla F_T menší než síla F_2 vyvozená zatěžující silou F_0, a proto se matice může dát do pohybu působením pouze této osové síly F_O viz *Obr. 29*. Pro tento případ platí následující vztahy *3.1.4* a *3.1.5*. [27]

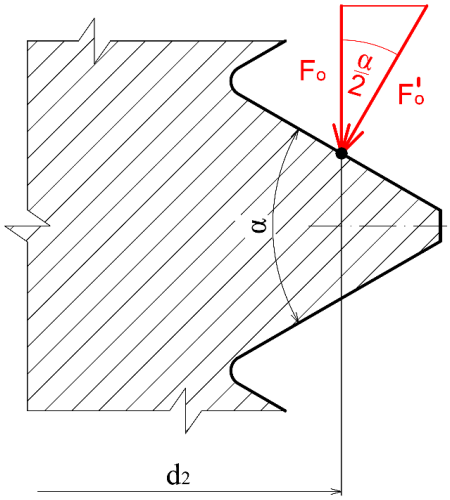
$$\gamma > \varphi \qquad 3.1.4$$

$$F_Z = F_O \cdot tg\,(\,\gamma - \varphi\,) \qquad 3.1.5$$



Obr. 29 Nesamosvorný závit - povolování matice [27]

Výše uvedené skici a závislosti platí, jak již bylo zmíněno, pro plochý profil závitu. Reálně používané závity mají nejčastěji profil závitu ostrý, čímž dále dochází k odklonu sil dle obr. 30 a pro třecí sílu F_T platí následující vztahy. [27]



$$F_T = F_O' \cdot f \qquad 3.1.6$$

$$F_T = \frac{F_O}{\cos(\frac{\alpha}{2})} \cdot f \qquad 3.1.7$$

$$F_T = F_O \cdot f' \qquad 3.1.8$$

Obr. 30 Detail profilu závitu s ostrým úhlem [27]

Pro ostrý závit má součinitel smykového tření tvar:

$$f' = tg\ \varphi' = \frac{f}{\cos(\frac{\alpha}{2})} \qquad 3.1.9$$

Zátěžný krouticí moment pro utahování matice s ostrým závitem:

$$M_Z = \frac{d_2}{2} \cdot F_O \cdot tg\,(\gamma + \varphi') \qquad 3.1.10$$

Zátěžný krouticí moment pro povolování matice s ostrým samosvorným závitem:

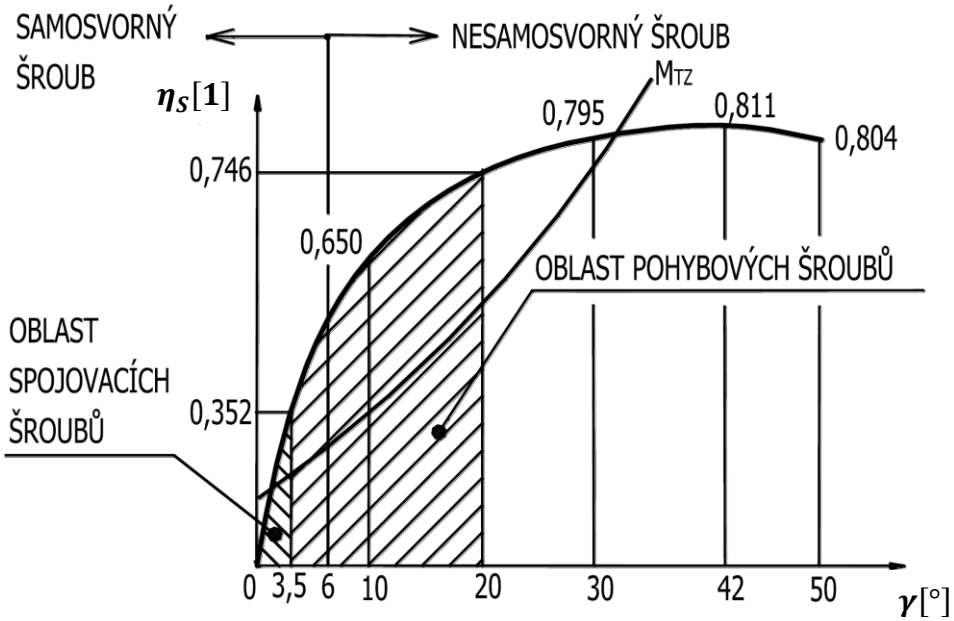
$$M_Z = \frac{d_2}{2} \cdot F_O \cdot tg\,(\varphi' - \gamma) \qquad 3.1.11$$

Zátěžný krouticí moment pro povolování matice s ostrým nesamosvorným závitem:

$$M_Z = \frac{d_2}{2} \cdot F_O \cdot tg\,(\gamma - \varphi') \qquad 3.1.12$$

Účinnost závitové dvojice při utahování matice:

$$\eta_S = \frac{A_{od}}{A_{\text{př}}} = \frac{F_O \cdot P_h}{F_Z \cdot \pi \cdot d_2} = \frac{F_0 \cdot tg\,(\gamma)}{F_O \cdot tg\,(\gamma + \varphi')} = \frac{tg\,(\gamma)}{tg\,(\gamma + \varphi')} \qquad 3.1.13$$

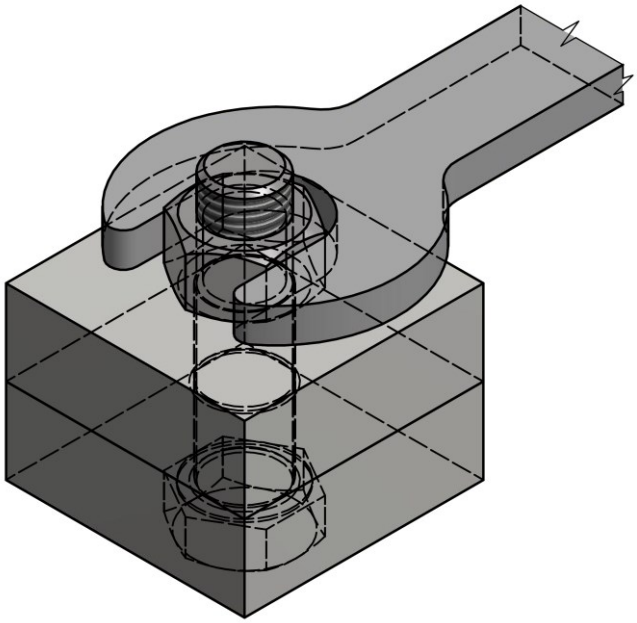


Obr. 31 Závislost účinnosti na úhlu stoupání [27]

3.2. Předepjatý šroubový spoj

Šroubové spoje lze rozdělit z hlediska zatížení na spoje bez předpětí, které se vyskytují spíše okrajově a spoje předepjaté, jichž je většina. Předepjatý šroubový spoj je postupně dotahován potřebným utahovacím momentem. Tím postupně narůstá vnitřní osová síla Q ve spoji, až do požadované hodnoty Q_O, zajišťující kompaktnost celého šroubového uzlu. Zde je rozdíl oproti osové síle pohybových závitových mechanismů F_O, která je silou vnější. Správně realizovaný předepjatý spoj zajišťuje neměnnost vzájemné polohy jednotlivých součástí a odolává i proměnnému zatížení vnějších provozních sil, na které je dimenzován. [28]

3.2.1. Utahování předepjatého spoje



Obr. 32 Utahování matice [autor]

Jako příklad jsou použity dvě desky s průchozími dírami, které jsou spojeny pomocí šestihranného šroubu s metrickým závitem a příslušnou šestihrannou maticí, která bude utahována pomocí ručního klíče. Výchozí poloha odkud započne utahování, nastane ve chvíli, kdy matice dosedne na horní desku, přičemž mezi součástmi je již nulová vůle, ale ještě nezačaly působit žádné svěrné síly. Při utahování matice se začne prodlužovat šroub a stlačovat desky, a to stejnou osovou silou Q, dokud nebude dosaženo požadovaného osového předpětí Q_O. [28]

Pro utahovací moment na klíči platí následující vztah *3.2.1.1.*

$$M_{KK} = M_Z + M_{TM} \qquad 3.2.1.1$$

Třecí moment v závitu:

$$M_Z = \frac{d_2}{2} \cdot Q \cdot tg\ (\gamma + \varphi') \qquad 3.2.1.2$$

Třecí moment pod dosedací plochou matice:

$$M_{TM} = Q \cdot f_M \cdot \rho_M \qquad 3.2.1.3$$

Dále je potřeba brát v úvahu také třecí moment pod dosedací plochou hlavy šroubu:

$$M_{TH} = Q \cdot f_H \cdot \rho_H \qquad 3.2.1.4$$

f_M [1] *součinitel tření pod maticí*

f_H [1] *součinitel tření pod hlavou šroubu*

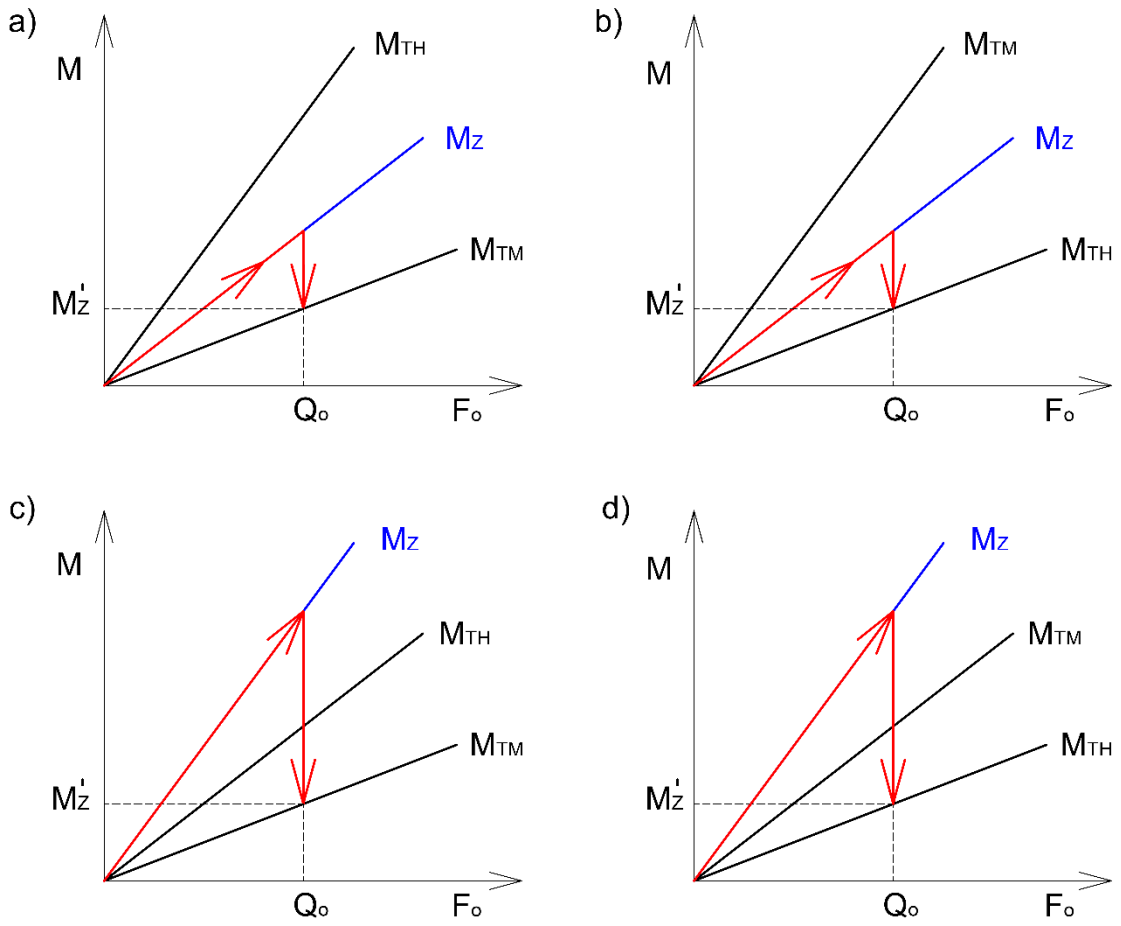
ρ_M $[mm]$ *třecí poloměr matice*

ρ_H $[mm]$ *třecí poloměr hlavy šroubu*

Je zřejmé, že pokud bude třecí moment pod hlavou M_{TH} větší než moment v závitu M_Z, je možno matici šroubu dotahovat a dřík šroubu bude namáhán krutem. V opačném případě dojde k protáčení šroubu a bude nutno použít druhý klíč také na hlavu šroubu a vyvodit pomocný moment, pro který platí:

$$M_{KK}' + M_{TH} = M_Z \qquad 3.2.1.5$$

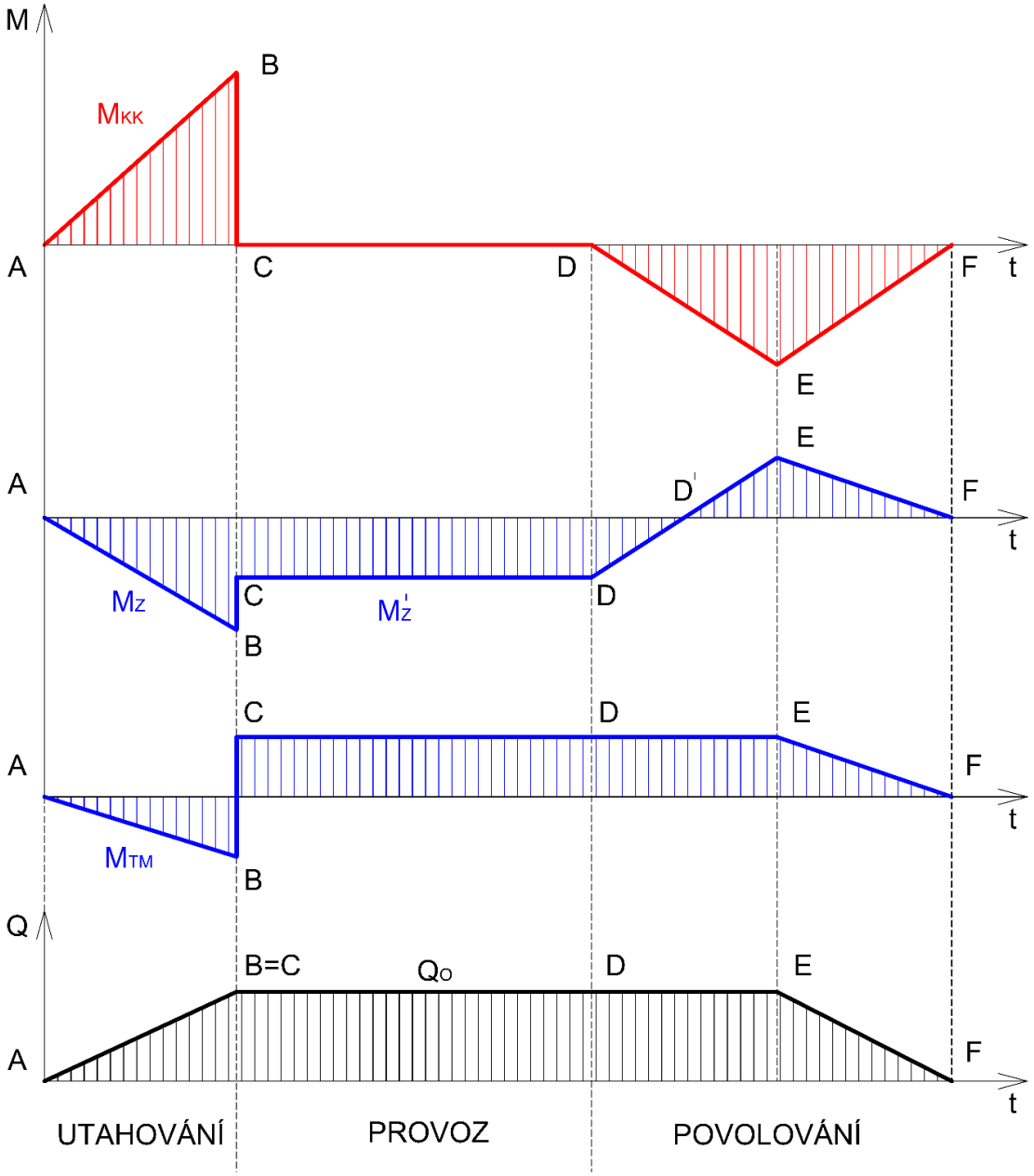
Po dotažení matice předepsaným momentem a dosažení požadované hodnoty předpětí, nyní v elasticky zkrouceném dříku šroubu působí moment M_Z, který se snaží navrátit dřík do dřívější nezatížené polohy. Proti tomuto momentu působí třecí moment pod hlavou šroubu a třecí moment pod maticí. Vzhledem k tomuto může dále nastat několik variant chování šroubového spoje. Jestliže třecí moment pod hlavou šroubu M_{TH} nebo třecí moment pod matkou M_{TM} budou menší, než moment v závitu M_Z, dojde ke zpětnému protočení ve stykové ploše pod hlavou šroubu, nebo pod maticí a hodnota M_Z se sníží na rovnovážnou hodnotu M_Z' jak je naznačeno v *Obr. 33*. [28]



Obr. 33 Varianty, při poklesu momentu Mz [28].

Z hlediska praxe je pro šroubové spojení výhodná varianta a) viz *Obr. 33*. Při utahování se neprotáčí hlava šroubu a moment v dříku šroubu M_Z po montáži poklesne na rovnovážný moment $M_Z{}'$. Při utahování této varianty (dále viz *Obr. 34*), utahovací moment na klíči M_{KK} překonává odpor třecích momentů M_Z a M_{TM}, až po dosažení hodnoty předpětí Q_O, kdy dosahuje svého maxima (A-B). Po ukončení dotahování, okamžitě poklesne M_{KK} na nulovou hodnotu. Zkroucený dřík šroubu se následně spolu s maticí snaží protočit opačným směrem, proti čemuž působí moment M_{TM}. Jelikož akumulovaný moment v dříku M_Z je větší než M_{TM}, poklesne na rovnovážnou provozní hodnotu $M_Z{}'$ (B-C). V případě povolování se nejprve protáčí dřík s maticí, jako jeden celek v dosedací ploše matice vůči spojované součásti. Povolovací moment na klíči M_{KK} neustále narůstá a ve stejném směru působí M_Z. Matice neustále prokluzuje a M_Z klesá, až dojde k vymizení nakroucení dříku šroubu a $M_Z = 0$ (D-D'). Další růst M_{KK}, působí další prokluz matice, přičemž

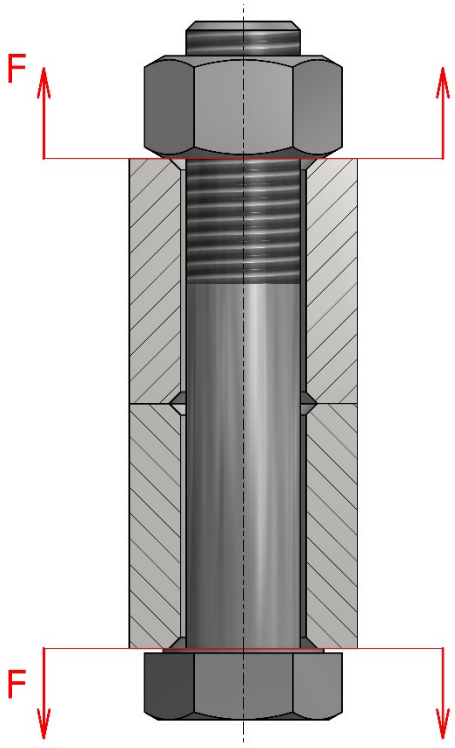
M_Z změní smysl a začne působit proti povolování (D'-E). Dále po dosažení maximální hodnoty povolovacího momentu M_{KK} se matice začne protáčet také vůči šroubu a nastává pokles všech momentů a dojde k uvolnění předepjatého šroubového spoje (E-F). [28]



Obr. 34 Proces utahování a povolování šroubového spoje [28].

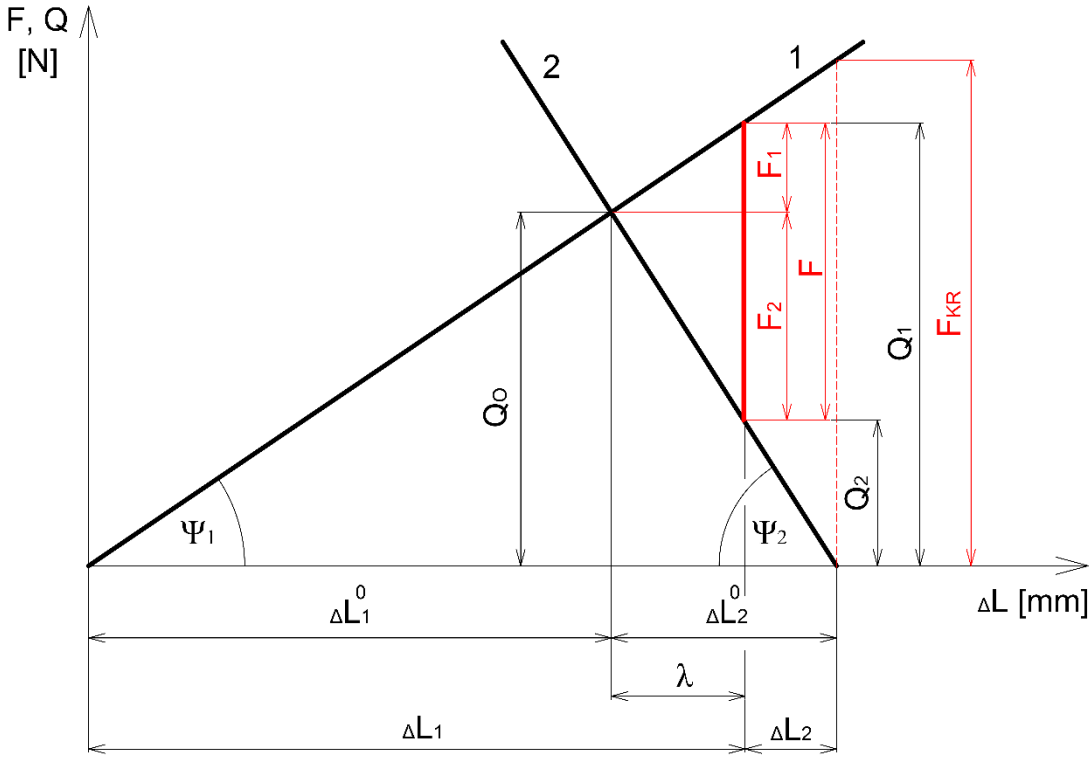
Pozn.: Ve skutečnosti je moment na klíči při povolování větší než při utahování. Příčinou je zaklínění mikronerovností ve spoji ⇒ statický součinitel tření je větší než dynamický, plus ostatní vlivy provozu.

3.2.2. Deformace v předepjatém šroubovém spoji



Obr. 35 Předepjatý šroubový spoj, zatížený osovou silou F [autor]

Pro základní představu o deformacích, které probíhají při realizaci předepjatého šroubového spoje byl vybrán model šroubového spojení dvou trubek. Ve spoji bylo při montáži vyvozeno předpětí Q_O, tím se matice posunula směrem k hlavě šroubu o hodnotu ΔL. Tato celková deformace je rozdělena na dílčí prodloužení šroubu ΔL_1^0 a stlačení spojovaných trubek ΔL_2^0. Na šroub i na trubky je možno pohlížet jako na pružiny velkých tuhostí. Přičemž jednotlivé konstanty tuhosti vyjadřují lineární závislost mezi vnitřní osovou silou Q a jí vyvolanou deformací ΔL. Působením vnější osové síly F, která je pro tento jednoduchý případ konstantní a působí v dosedacích plochách šroubu a matice, dojde ke zvětšení deformace šroubu o hodnotu λ, a tím také ke zmenšení deformace trubek o stejnou hodnotu. Na šroub nyní působí vnitřní síla Q_1 a na trubky vnitřní síla Q_2, oproti předchozímu nezatíženému stavu, kdy na šroub i trubky působilo stejné předpětí Q_O. Vnějším zatížením tedy došlo ke zvětšení deformace šroubu na hodnotu ΔL_1 a deformace trubek poklesla na hodnotu ΔL_2. Danou problematiku řeší Rötscherův diagram viz *Obr. 36*. Přímka 1 v diagramu představuje šroub (části přitěžované), přímka 2 se týká sevřených částí (části odlehčované). Směrnice přímek $tg\psi_1$ a $tg\psi_2$ odpovídají jednotlivým tuhostem částí přitěžovaných C_1 a částí odlehčovaných C_2. Obecně bývá řešení složitější, a to zejména s ohledem na působiště zatěžující síly a na větší počet součástí o různých tuhostech. V případě zatěžování předepjatého spoje a jeho následné analýzy, hraje důležitou roli dynamika zatěžování. Mimo tohoto triviálního případu osového zatěžování konstantní silou, jsou v praxi nejčastější kombinované způsoby namáhání s časově proměnlivými silami [28].



Obr. 36 Rötscherův diagram předepjatého spoje [28]

Konstanta tuhosti šroubu v tahu $C_1[N/mm]$ a konstanta tuhosti trubek v tlaku $C_2[N/mm]$:

$$C_1 = tg\,\Psi_1 = \frac{Q_O}{\Delta L_1^0} \quad ; \quad C_2 = tg\,\Psi_2 = \frac{Q_O}{\Delta L_2^0} \qquad 3.2.2.1$$

Síla přitěžující šroubu $F_1[N]$ a odlehčující trubkám $F_2[N]$:

$$F_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot F \quad ; \quad F_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot F \qquad 3.2.2.2$$

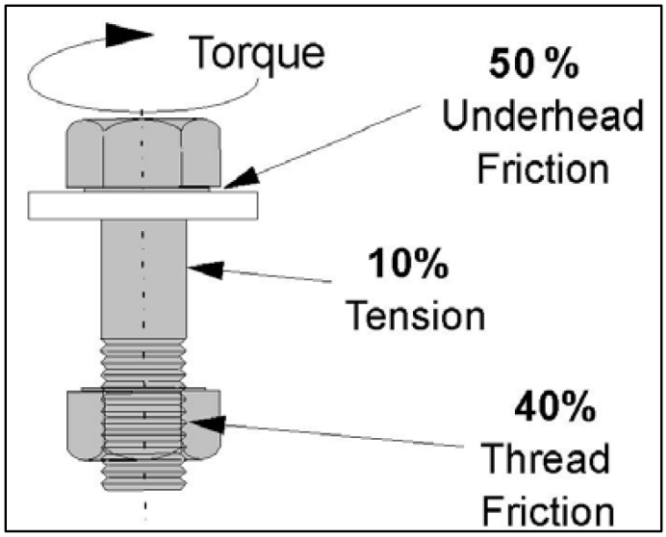
Vnitřní síla ve šroubu $Q_1[N]$ a v trubkách $Q_2[N]$:

$$Q_1 = Q_O + F_1 \quad ; \quad Q_2 = Q_O - F_2 \qquad 3.2.2.3$$

Problematika statické a dynamické pevnostní kontroly šroubových spojů zatěžovaných kombinovaným namáháním tahem a krutem, plus namáhání přídavným ohybem, kontrola měrného tlaku, viz Švec [28], Kaláb [27].

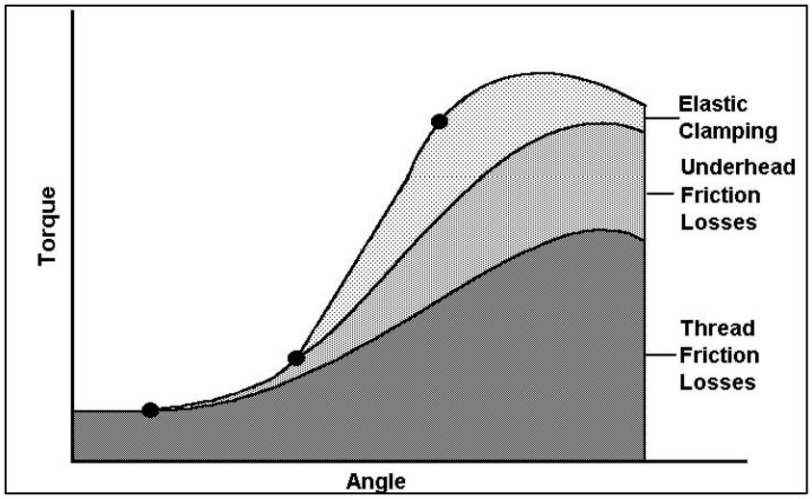
3.2.3. Základní energetická bilance

Při utahování předepjatého šroubového spoje dochází k přenosu mechanické energie, která je z části kumulována ve spoji ve formě vytvořeného napětí a z části je spotřebovávána na překonání pasivních odporů. Základní rozdělení utahovacího momentu je znázorněno níže. Přibližně 50% energie je spotřebováno na tření pod hlavou, 40% energie spotřebovává tření v závitu a jen 10% energie je akumulováno jako předpětí ve spoji. [29]



Obr. 37 Absorbce utahovacího momentu [29]

Závislost utahovacího momentu na úhlu pootočení je znázorněna v obr. 38, kdy plochy pod křivkou znázorňují jednotlivé energetické podíly elastického předpětí, ztráty třením pod hlavou a v závitu. [29].



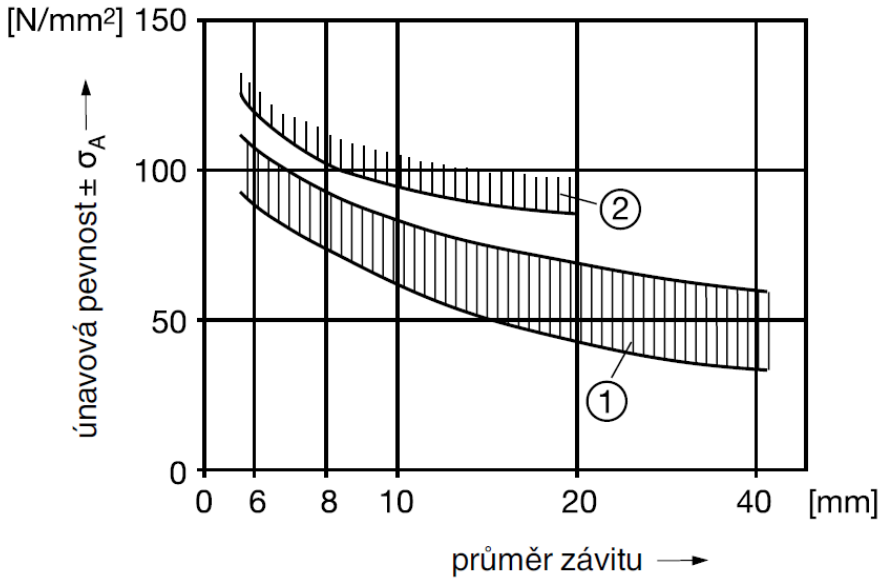
Obr. 38 Závislost utahovacího momentu na úhlu pootočení [29]

4. Selhání předepjatého šroubového spoje

K selhání šroubového spojení může dojít z několika důvodů. Mezi nejčastější příčiny patří chybně dimenzované spojovací součásti, obzvláště při dynamickém zatížení, nesprávně provedená montáž, korozní prostředí, tepelné podmínky atd. Mimo nevratného poškození spojovacích součástí, v podobě různých typů lomu, stržení závitů apod. může nastat ztráta předpětí, a tím může dojít k samovolnému povolení šroubového spoje. U spojů zatížených v ose dochází k sesedání ploch. Při zatížení spoje dynamickou střižnou silou dochází ke kluznému pohybu dílů, což může způsobit rotaci šroubu a matice, vedoucí ke ztrátě předpětí. [30]

4.1. Únavová pevnost

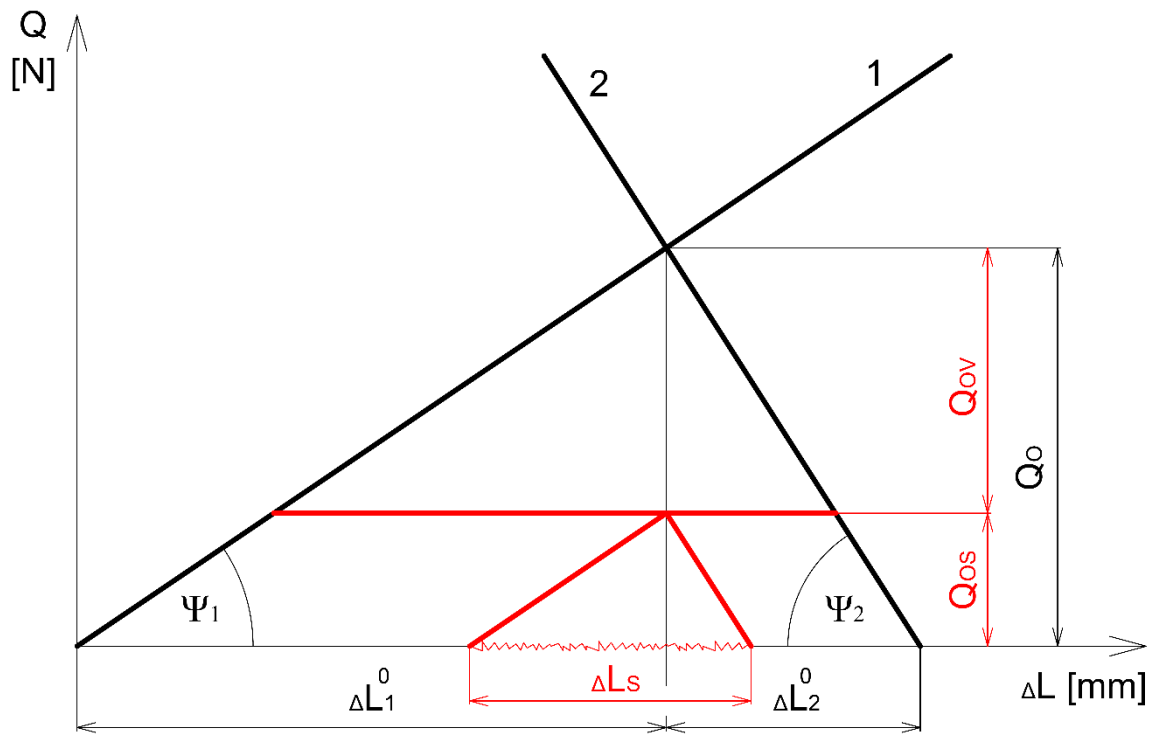
Šroub jako součást s vrubem (závit), podléhá při dynamickém zatěžování nebezpečí vzniku únavového lomu, který v 90% případů nastává v první nosné části závitu, kde je koncentrováno největší zatížení. Únavová pevnost nezávisí na statickém zatížení. Odolnost proti únavě klesá s rostoucí pevností a jemností stoupání. Ke zvýšení odolnosti proti únavě přispívá zabránění kombinovanému namáhání, snížení špiček pnutí, používání delších šroubů, používání pružných šroubů s redukovaným dříkem a kontrolované předpětí. [30]



Obr. 39 Únavová pevnost dle směrnice VDI 2230, 1. Závit válcován, poté kalen a popouštěn, 2. Závit kalen a popouštěn a poté válcován [30]

4.2. Sesedání šroubového spoje

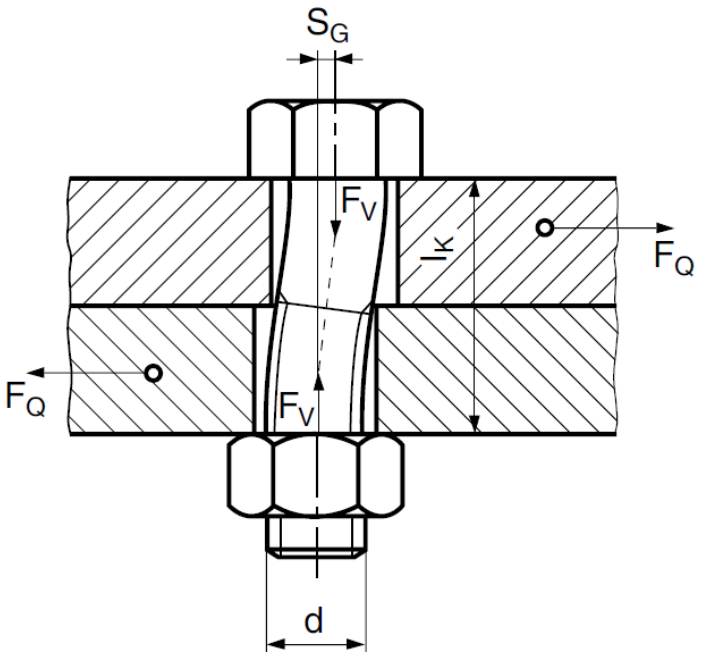
Po dotažení předepjatého šroubového spoje dochází ke stlačování dělících rovin součástí a také dotykových ploch v závitech. Vlivem mikronerovností povrchů kontaktních ploch, dochází k plastickým mikrodeformacím, a tím k zarovnávání povrchů, což vede ke ztrátě předpětí. K tomuto jevu dochází ihned po skončení montáže a dále trvá v řádu hodin či dnů. Na sesedání má vliv drsnost povrchů, geometrické nerovnosti, počet dělících rovin a také překročení mezního tlaku na jednotku plochy (viz ***Příloha 2***). Mezní měrný tlak lze ovlivnit zkosením hrany otvoru, čímž se vytvoří styčná opěrná plocha pro šroub. U ocelových šroubů lze tímto dosáhnout až o 25% vyššího měrného tlaku, než je povoleno. Mezní měrný tlak lze dále snížit také strojním utahováním, použitím přírubových šroubů a matic. Sesedání materiálů lze zabránit použitím čistých a hladkých dělících rovin, minimalizací jejich počtu, použitím dostatečně tuhých spojovacích prvků, použitím pružných podložek ke kompenzaci ztráty předpětí, použitím spojovacích prvků s většími dosedacími plochami. [30], [31]



Obr. 40 Rötscherův diagram po sesednutí spoje. ΔL_S – hodnota sesednutí, Q_{OV} – výsledené předpětí po sesednutí, Q_{OS} – ztráta předpětí po sesednutí, [30]

4.3. Další možnosti selhání šroubového spoje

Povolení vlivem rotace – Vlivem dynamických střižných sil působících v předepjatém spoji, může dojít ke kluznému pohybu mezi spojovanými díly. Vlivem tohoto pohybu může dojít k rotaci šroubu a matice a k následné ztrátě předpětí až na nulovou hodnotu. [30]



Obr. 41 Ilustrační obrázek: zatížení dynamickými střižnými silami [30]

Povolení vlivem teploty – Při provozních teplotách $(150 - 300)°C$ může dojít ke změnám mechanických vlastností materiálů spojovacích součástí. Zvýšení teplot může způsobit snížení dolní meze kluzu, nebo meze v tahu. Při nepřetržitém provozu za vyšších teplot může dojít k relaxaci napětí, což je doprovázeno ztrátou svěrné síly ve spoji, což se týká obzvláště materiálů zpevněných tvářením. [30]

Stržení závitu – ke stržení závitu šroubu dochází při kombinování nízkopevnostních šroubů s maticemi vyšších pevností, ke stržení závitu u matice dochází v opačném případě. [30]

5. Experimentální stanovení součinitele tření v závitech šroubového spoje

Jak již bylo v předchozích kapitolách naznačeno, při montáži předepjatého šroubového spoje je nutno znát potřebný utahovací moment na klíči, který ve spoji vyvodí optimální předpětí. Z tohoto důvodu je potřeba znát mimo jiné součinitel tření v závitu. Stanovení tohoto součinitele není jednoduché, protože jej ve skutečnosti ovlivňuje velké množství faktorů jako je materiál, mazivo, kvalita opracování ploch, nečistoty, tlak mezi dotykovými plochami, změna úhlu profilu závitu vlivem deformace, teplota apod. Mnoha experimenty prováděnými v minulosti bylo zjištěno, že nelze stanovit střední hodnotu součinitele tření v závitu, která by měla obecnou platnost. Z výše uvedeného je zřejmé, že je tedy vždy nutno počítat s jistým rozptylem měřených hodnot. [2] Celou komplexní problematiku předepjatých šroubových spojů řeší německá směrnice VDI 2230, která je široce používaná i v naší strojírenské praxi, protože z ní vychází mnoho firem zabývajících se šroubovými spoji.

Zadavatelem požadavku na experimentální zjištění hodnot součinitele tření v závitu u jednotlivých typů šroubů a matic byla firma Sécheron Tchequie spol. s.r.o. zabývající se dodávkami komponent a systémů pro železniční dopravu. Měl být stanoven a posouzen pouze součinitel tření v závitu, bez dalších pasivních odporů působících ve šroubovém spoji. Firmou Sécheron byly k tomuto účelu dodány vzorky šroubů, matic a maziva používaných v praxi při realizaci jejich zakázek.

Obr. 42 Dodané vzorky použité k experimentu [autor]

Z dodaného spojovacího materiálu byly pro experiment vybrány tyto následující vzorky šroubů a matic:

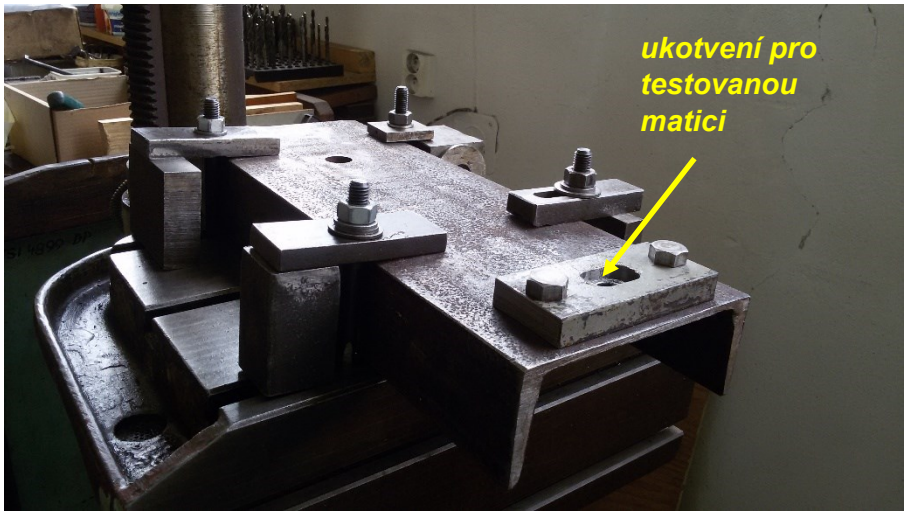
Šroub se šestihrannou hlavou M12 x 60 – A4 – 70	*2 Ks*
Šestihranná matice M12 – A4 – 80	*2 Ks*
(nerez bez povrchové úpravy)	
Šroub se šestihrannou hlavou M12 x 60 – 8.8	*2 Ks*
Šestihranná matice M12 – 8	*2 Ks*
(povrchová úprava GEOMET)	
Šroub se šestihrannou hlavou M8 x 65 – A4-70	*2 Ks*
Šestihranná matice M8 – A4-80	*2 Ks*
(nerez bez povrchové úpravy)	
Šroub se šestihrannou hlavou M8 x 60 – 8.8	*2 Ks*
Samojistná matice M8 – 8	*2 Ks*
(povrchová úprava GEOMET)	

Dodané mazivo:

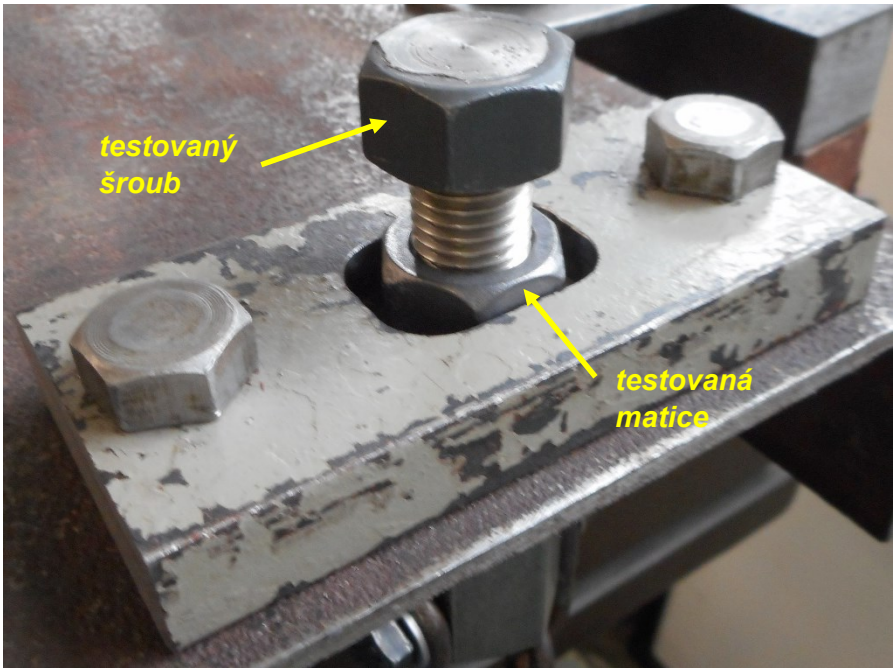
GLATTOL 4303 LT2 – speciální nízkoteplotní plastické mazivo na bázi minerálního oleje a vápenatého mýdla. Dle výrobce by se mělo jednat o mazivo s vysokou ochranou proti korozi s mechanickou a chemickou odolností a nízkým odporem při pohybu za studena. (viz ***Příloha 3***).

5.1. Princip měření

Vlastní měření probíhalo v laboratoři Ústavu konstruování a částí strojů FS ČVUT. Princip experimentu byl následující. Do kotvícího přípravku připevněného ke zkušebnímu stolu byla neotočně vsazena testovaná matice, do níž byl vždy zašroubováván vybraný testovaný šroub.

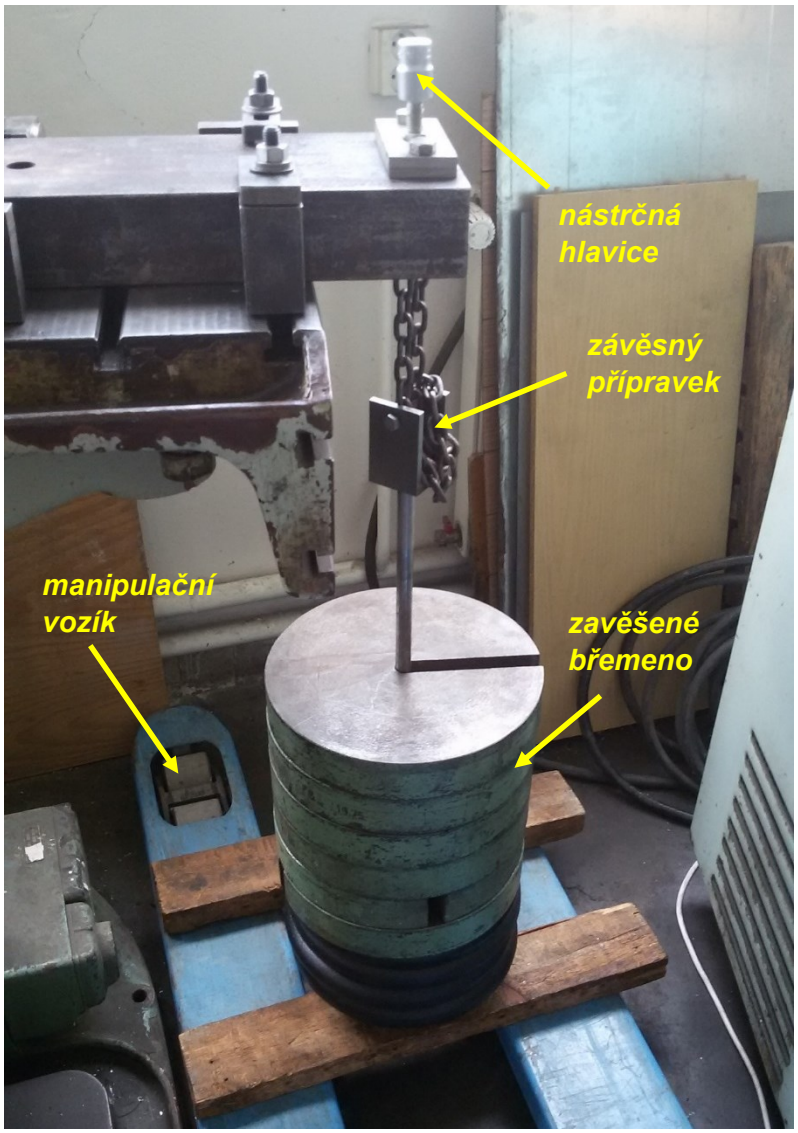


Obr. 43 Kotvící přípravek [autor]



Obr. 44 Detail ukotvení šroubu a matice [vedoucí práce]

Na konec šroubu byla pomocí závěsného přípravku postupně umísťována kalibrovaná závaží, čímž došlo k vyvození příslušné zatěžující osové síly působící na zkoušenou závitovou dvojici. Poté bylo prostřednictvím snímače krouticího momentu, osazeným na hlavu šroubu, ručně otáčeno v jednom nebo ve druhém směru. Vzhledem k tomu, že byly testovány spojovací šrouby a matice s metrickým závitem, byla zaručena samosvornost šroubové vazby. Tímto způsobem bylo vždy postupně spouštěno a zdviháno zavěšené břemeno určité hmotnosti, kterému odpovídala konkrétní hodnota krouticího momentu potřebná k otočení šroubu. Propojením snímače krouticího momentu s dalšími měřícími komponenty byly získány hodnoty krouticího momentu pro jednotlivé hodnoty závaží a směry jeho pohybu.



Obr. 45 Vzorek připravený k měření [autor]

5.2. Postup a metodika měření

Metodika vlastního experimentu byla stanovena vedoucím bakalářské práce. Byla založena na základě zkušeností obdobných provedených měření, která proběhla v minulosti, po konzultaci se zadávajícími firmami.

1) Montáž a příprava přípravků nejprve byl ke zkušebnímu stolu pomocí šroubů, matic a podložek připevněn kotvící přípravek viz *Obr. 43*. K dispozici byly dva kotvící přípravky, pro velikost matic M12 a M8, které se při změně velikosti závitové dvojice vyměnily. Dále byly k dispozici dva závěsné přípravky, pro velikosti šroubů M12 a M8, které byly před vlastním experimentem zváženy.

2) Příprava závaží k dispozici byla na místě pro daný experiment připravena závaží kalibrovaná i nekalibrovaná, která byla účelně rozdělena tak, aby při vlastním měření nedocházelo k záměně jednotlivých závaží, a tím i ke zkreslení výsledků měření. K jednotlivým závažím byla při vyhodnocování výsledků vždy připočtena také hmotnost závěsného přípravku.

Hmotnosti nekalibrovaných závaží:	$4\ x\ 10\ kg$
Hmotnosti kalibrovaných závaží:	$1\ x\ 19{,}85\ kg,\ 3\ x\ 19{,}80\ kg,\ 1\ x\ 19{,}75\ kg$
	$1\ x\ 19{,}65\ kg,\ 1\ x\ 9{,}95\ kg,\ 2\ x\ 9{,}90\ kg$
	$1\ x\ 9{,}80\ kg,\ 2\ x\ 9{,}70\ kg,\ 2\ x\ 4{,}95\ kg$
	$2\ x\ 4{,}85\ kg,\ 1x\ 4{,}80\ kg$
Hmotnosti závěsných přípravků:	$m_{Z12} = 2{,}79\ kg$
	$m_{Z8} = 2{,}63\ kg.$

3) Příprava vzorků jednotlivé vzorky šroubů byly před vlastním měřením upraveny, z důvodu bezpečného pojištění spoje šroubu a závěsného přípravku. Na konci každého šroubu byla vyvrtána průchozí díra stejného průměru jako na dlouhé matici závěsného přípravku. Po sešroubování zkušebního vzorku a dlouhé matice závěsného přípravku bylo závitové spojení pojištěno čepem.

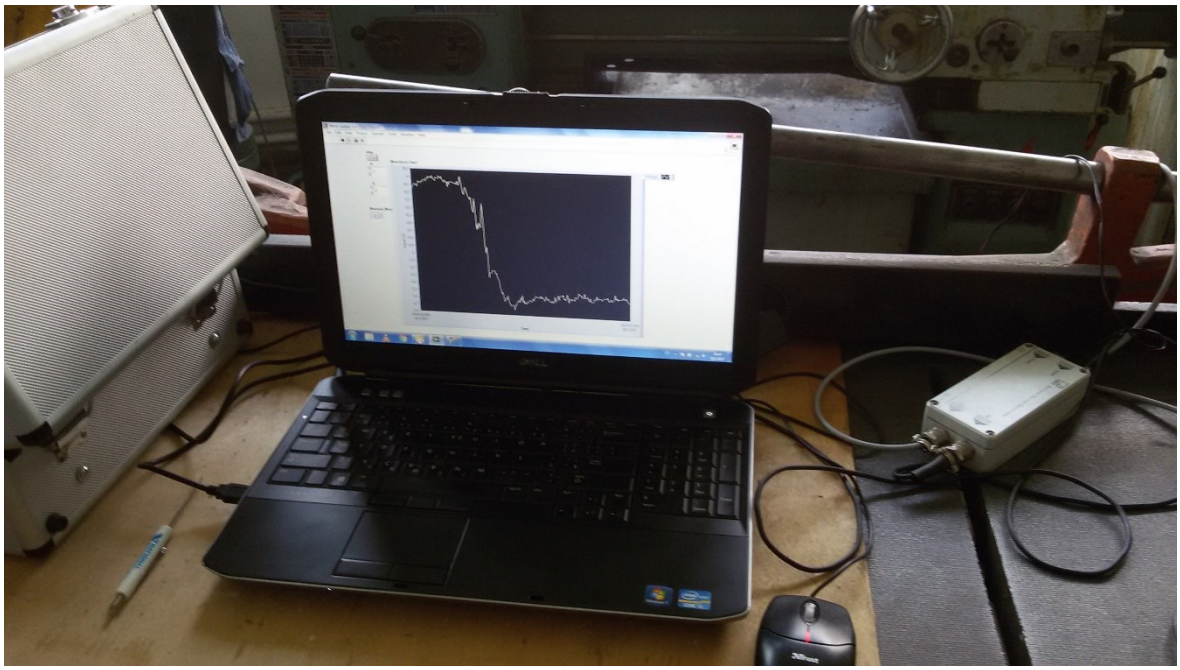
4) Příprava měřícího stanoviště před měřením bylo připraveno a zapojeno měřící stanoviště (viz kap. 5.3), které bylo prostřednictvím výpočetní techniky, vybavené potřebným hardwarem a softwarem, připojeno ke snímači krouticího momentu.

5) Metodika měření vlastní měření probíhalo tak, že po upevnění testovaného vzorku šroubu a matice do kotvícího přípravku, byl na konec testovaného šroubu připojen a poté zajištěn závěsný přípravek. Na testovaný šroub byla nasazena nástrčná hlavice, na kterou byl posléze nasazen snímač krouticího momentu s vratidlem. Metodika měření byla stanovena tak, že každý vzorek byl postupně čtyřikrát zatěžován přidávanými závažími v rostoucím sledu o celkových hmotnostech: $82{,}39\ kg/161{,}44\ kg/200{,}54\ kg/244{,}79\ kg$ (pro velikost M12). Přičemž bylo ručně otáčeno vratidlem snímače krouticího momentu nejprve doprava, což zapříčinilo pohyb šroubu se zavěšeným břemenem směrem dolů.

Obr. 46 Otáčení vratidlem snímačem krouticího momentu, při měření [autor].

Pro každou zavěšenou hmotnost byla v jistém časovém úseku, dvěma experimentátory nezávisle na sobě, vizuálně vyhodnocována křivka průběhu krouticího momentu, potřebného k překonání tření v závitu. To probíhalo za současného ručního otáčení vratidlem třetím experimentátorem. Z jednotlivých, výpočetní technikou zaznamenaných křivek, byla vždy stanovena průměrná

hodnota krouticího momentu, která byla zanesena jako výsledek měření do připravených tabulek. Po čtyřech měřeních při pohybu směrem dolů, následovalo pro stejný vzorek další měření, tentokráte otáčením vratidla směrem doleva s pohybem šroubu s břemenem směrem vzhůru. Šroub byl tentokráte zatěžován v opačném, klesajícím sledu: $244{,}79\ kg/200{,}54\ kg/161{,}44\ kg/82{,}39\ kg$ (pro velikost M12), přičemž byly stejným způsobem zaznamenávány hodnoty krouticího momentu. Pro jednu sadu vzorků tak byly naměřeny vždy $4 + 4$ hodnoty krouticího momentu potřebného k překonání tření ve šroubové vazbě. Celá sada měření byla provedena vždy ve stavu bez maziva a posléze s naneseným plastickým mazivem *GLATTOL 4303 LT2.*



Obr. 47 Zaznamenávání a vizuální vyhodnocování krouticího momentu [autor]

6) <u>Podmínky měření</u> Vlastní měření bylo realizováno při pokojové teplotě. Na měření se podíleli celkem tři experimentátoři. Dodané vzorky nebyly před vlastním experimentem nijak čištěny, ani odmašťovány. Důvodem pro měření se vzorky v dodaném stavu bylo přiblížení se realitě každodenní praxe, a nikoliv laboratorním podmínkám. Při měření jednotlivých vzorků, ve směru nahoru a posléze ve směru dolů, byla použita vždy jedna a tatáž matice a šroub. Přičemž v případě šroubu byl k měření využit vždy nový nepoužitý úsek závitu. Pro jednotlivé sady měření bez maziva a s mazivem byly použity vždy nový šroub i matice.

5.3. Použité měřicí přístroje

Snímač krouticího momentu T20WN vyráběn firmou Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, slouží k měření statického a dynamického krouticího momentu, rychlosti otáčení a úhlu natočení. Nastavený měřící rozsah 20 Nm s výstupním signálem krouticího momentu +/- 10 V (viz ***Příloha 4***). [32]

Propojovací krabice VK20 příslušenství snímače krouticího momentu, sloužící pro jeho integraci do celého měřícího komplexu. Obsahuje svorkovnici pro potřebné signály, ochranné obvody a stabilizaci napájení (viz ***Příloha 5***). [33]

Obr. 48 Snímač krouticího momentu T20WN s propojovací krabicí VK20 [autor]

Měřicí karta NI cDAQ-9174 od firmy National industries pro měření široké škály analogových a digitálních signálů, s vysokorychlostní rozhraním USB 2.0. [34]

Modul NI 9201 od firmy National Industries sloužící pro sběr dat, poskytuje rozhraní USB 2.0. [35]

LABVIEW software od firmy National Industries instalovaný na počítači (viz *Obr. 47*), zpracovávající a zaznamenávající data měření.

5.4. Použité výpočty

1) Stanovení úhlu stoupání pro závit M12:

Stoupání závitu $P_h = 1{,}75\ mm$ *Střední průměr závitu* $d_2 = 10{,}863\ mm$

$$\gamma = arctg\left(\frac{P_h}{\pi \cdot d_2}\right) = arctg\left(\frac{1{,}75}{\pi \cdot 10{,}863}\right) = 2{,}935° \qquad 5.4.1$$

2) Stanovení úhlu stoupání pro závit M8:

Stoupání závitu $P = 1{,}25\ mm$ *Střední průměr závitu* $d_2 = 7{,}188\ mm$

$$\gamma = arctg\left(\frac{P_h}{\pi \cdot d_2}\right) = arctg\left(\frac{1{,}25}{\pi \cdot 7{,}188}\right) = 3{,}168° \qquad 5.4.2$$

3) Stanovení třecího úhlu pro spouštění břemene:
(otáčení vratidlem směrem doprava) byl použit vztah *3.1.11*, ze kterého byl odvozen vzorec pro výpočet třecího úhlu v ostrém závitu:

$$\varphi' = arctg\left(\frac{2 \cdot M_k}{F_O \cdot d_2}\right) + \gamma \qquad 5.4.3$$

4) Stanovení třecího úhlu pro zvedání břemene:
(otáčení vratidlem směrem doleva) byl použit vztah *3.1.10*, ze kterého byl odvozen vzorec pro výpočet třecího úhlu v ostrém závitu:

$$\varphi' = arctg\left(\frac{2 \cdot M_k}{F_O \cdot d_2}\right) - \gamma \qquad 5.4.4$$

5) Stanovení součinitele tření v závitu:

$$f' = tg(\varphi') \qquad 5.4.5$$

$$f = f' \cdot cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \qquad 5.4.6$$

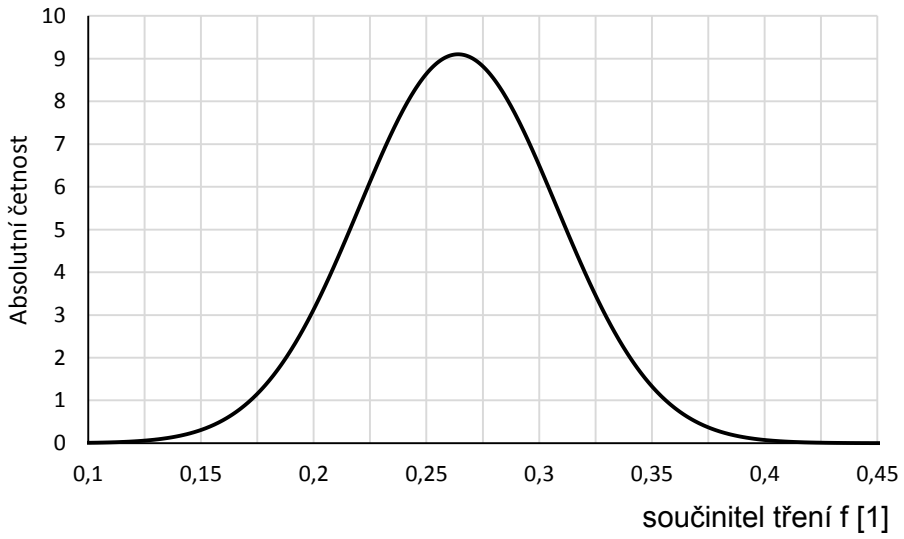
(Úhel profilu metrického závitu $\alpha = 60°$*)*

5.5. Statistické zpracování naměřených dat

Při měření a získávání měřených hodnot obecně, nelze i při dodržení relativně stejných podmínek měření získat data, které budou naprosto přesná. Tudíž nikdy nedosáhnou skutečné (pravé) hodnoty. Důvodem jsou chyby a nepřesnosti vznikající při měření. Chyby měření je možno rozdělit na chyby systematické, které se stále opakují a chyby náhodné. Zdrojem systematických chyb je kupříkladu přesnost použitých měřících přístrojů, metoda měření, vliv lidského faktoru apod. (viz kap. 5.8). Náhodné chyby pak souvisejí s náhodnou změnou měřících podmínek, při každém opakování měření. Výsledná chyba při měření je pak dána součtem obou typů chyb. Se soubory naměřených a chybami ovlivněných hodnot pracuje matematická statistika. Při vyhodnocování souboru naměřených dat byly v tomto náhodném výběru stanoveny pro každou sadu měření dvě charakteristické veličiny, výběrový průměr μ a výběrová směrodatná odchylka σ. [36]

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \qquad 5.5.1$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\mu - x_i)^2}{n \cdot (n-1)}} \qquad 5.5.2$$



Graf 1 Normální Gaussovo rozdělení hodnot součinitele tření, sada měření 1a, $\mu = 0{,}264$, $\sigma = 0{,}044$, zpracováno v MS EXCEL [autor]

5.6. Výsledky měření v tabulkách

Tab. 9 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 1a)

ŠROUB: M12 x 60 - A4 - 70 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MATICE: M12 - A4 - 80 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
BEZ MAZIVA						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	82,39	808,25	0,80	13,263	0,236	0,204
2.	161,44	1583,73	2,10	16,655	0,299	0,259
3.	200,54	1967,30	3,00	18,618	0,337	0,292
4.	244,79	2401,39	3,80	19,178	0,348	0,301
Výběrový průměr μ				16,929	0,305	0,264
Výběrová směrodatná odchylka σ				2,672	0,051	0,044

Tab. 10 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 1b)

ŠROUB: M12 x 60 - A4 - 70 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MATICE: M12 - A4 - 80 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
BEZ MAZIVA						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	244,79	2401,39	5,60	20,300	0,370	0,320
2.	200,54	1967,30	5,00	22,141	0,407	0,352
3.	161,44	1583,73	5,00	27,232	0,515	0,446
4.	82,39	808,25	1,70	18,233	0,329	0,285
Výběrový průměr μ				21,977	0,405	0,351
Výběrová směrodatná odchylka σ				3,850	0,080	0,069

Tab. 11 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 2a)

ŠROUB: M12 x 60 - A4 - 70 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MATICE: M12 - A4 - 80 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MAZIVO GLATTOL 4303 LT2						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	82,39	808,25	1,20	18,224	0,329	0,285
2.	161,44	1583,73	2,50	19,141	0,347	0,301
3.	200,54	1967,30	3,70	22,035	0,405	0,351
4.	244,79	2401,39	3,50	17,956	0,324	0,281
Výběrový průměr μ				19,339	0,351	0,304
Výběrová směrodatná odchylka σ				1,867	0,037	0,032

Tab. 12 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 2b)

ŠROUB: M12 x 60 - A4 - 70 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MATICE: M12 - A4 - 80 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MAZIVO GLATTOL 4303 LT2						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	244,79	2401,39	7,50	26,964	0,509	0,441
2.	200,54	1967,30	5,00	22,141	0,407	0,352
3.	161,44	1583,73	3,70	20,339	0,371	0,321
4.	82,39	808,25	3,30	33,997	0,674	0,584
Výběrový průměr μ				25,860	0,490	0,425
Výběrová směrodatná odchylka σ				6,103	0,136	0,118

Tab. 13 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 3a)

ŠROUB: M12 x 60 - 8.8 (povrchová úprava GEOMET)						
MATICE: M12 - 8 (povrchová úprava GEOMET)						
BEZ MAZIVA						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	82,39	808,25	1,40	20,623	0,376	0,326
2.	161,44	1583,73	1,95	15,708	0,281	0,244
3.	200,54	1967,30	2,05	13,796	0,246	0,213
4.	244,79	2401,39	1,75	10,577	0,187	0,162
Výběrový průměr μ				15,176	0,272	0,236
Výběrová směrodatná odchylka σ				4,204	0,079	0,069

Tab. 14 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 3b)

ŠROUB: M12 x 60 - 8.8 (povrchová úprava GEOMET)						
MATICE: M12 - 8 (povrchová úprava GEOMET)						
BEZ MAZIVA						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	244,79	2401,39	3,20	10,849	0,192	0,166
2.	200,54	1967,30	3,00	12,747	0,226	0,196
3.	161,44	1583,73	2,80	15,095	0,270	0,234
4.	82,39	808,25	1,35	14,158	0,252	0,218
Výběrový průměr μ				13,212	0,235	0,203
Výběrová směrodatná odchylka σ				1,847	0,034	0,029

Tab. 15 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 4a)

ŠROUB: M12 x 60 - 8.8 (povrchová úprava GEOMET)						
MATICE: M12 - 8 (povrchová úprava GEOMET)						
MAZIVO GLATTOL 4303 LT2						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	82,39	808,25	1,20	18,224	0,329	0,285
2.	161,44	1583,73	1,70	14,115	0,251	0,218
3.	200,54	1967,30	2,10	14,054	0,250	0,217
4.	244,79	2401,39	1,90	11,223	0,198	0,172
Výběrový průměr μ				14,404	0,257	0,223
Výběrová směrodatná odchylka σ				2,882	0,054	0,047

Tab. 16 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 4b)

ŠROUB: M12 x 60 - 8.8 (povrchová úprava GEOMET)						
MATICE: M12 - 8 (povrchová úprava GEOMET)						
MAZIVO GLATTOL 4303 LT2						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	244,79	2401,39	3,20	10,849	0,192	0,166
2.	200,54	1967,30	2,70	11,245	0,199	0,172
3.	161,44	1583,73	2,10	10,784	0,190	0,165
4.	82,39	808,25	1,25	12,958	0,230	0,199
Výběrový průměr μ				11,459	0,203	0,176
Výběrová směrodatná odchylka σ				1,020	0,019	0,016

Tab. 17 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 5a)

ŠROUB: M8 x 65 - A4 - 70 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MATICE: M8 - A4 - 80 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
BEZ MAZIVA						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	82,23	806,68	0,90	20,414	0,372	0,322
2.	161,28	1582,16	2,20	24,320	0,452	0,391
3.	200,38	1965,73	3,10	26,860	0,506	0,439
4.	244,63	2399,82	3,40	24,683	0,460	0,398
Výběrový průměr μ				24,069	0,448	0,388
Výběrová směrodatná odchylka σ				2,682	0,056	0,048

Tab. 18 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 5b)

ŠROUB: M8 x 65 - A4 - 70 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MATICE: M8 - A4 - 80 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
BEZ MAZIVA						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	244,63	2399,82	4,75	25,674	0,481	0,416
2.	200,38	1965,73	4,00	26,350	0,495	0,429
3.	161,28	1582,16	3,10	25,430	0,475	0,412
4.	82,23	806,68	1,50	24,188	0,449	0,389
Výběrový průměr μ				25,410	0,475	0,412
Výběrová směrodatná odchylka σ				0,903	0,019	0,017

Tab. 19 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 6a)

ŠROUB: M8 x 65 - A4 - 70 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MATICE: M8 - A4 - 80 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MAZIVO GLATTOL 4303 LT2						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	82,23	806,68	1,10	23,946	0,444	0,385
2.	161,28	1582,16	2,10	23,438	0,434	0,375
3.	200,38	1965,73	2,30	21,201	0,388	0,336
4.	244,63	2399,82	3,70	26,387	0,496	0,430
Výběrový průměr μ				23,743	0,440	0,381
Výběrová směrodatná odchylka σ				2,128	0,044	0,038

Tab. 20 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 6b)

ŠROUB: M8 x 65 - A4 - 70 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MATICE: M8 - A4 - 80 (nerezová ocel, bez povrchové úpravy)						
MAZIVO GLATTOL 4303 LT2						
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	244,63	2399,82	5,00	26,933	0,508	0,440
2.	200,38	1965,73	3,10	20,523	0,374	0,324
3.	161,28	1582,16	3,00	24,647	0,459	0,397
4.	82,23	806,68	1,25	20,155	0,367	0,318
Výběrový průměr μ				23,065	0,427	0,370
Výběrová směrodatná odchylka σ				3,286	0,068	0,059

Tab. 21 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 7a)

ŠROUB: M8 x 60 - 8.8 (povrchová úprava GEOMET)							
MATICE: SAMOJISTNÁ M8 - 8 (povrchová úprava GEOMET)							
BEZ MAZIVA							
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Mk* [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	82,23	806,68	0,70	0,20	7,115	0,125	0,108
2.	161,28	1582,16	0,80	0,30	6,188	0,108	0,094
3.	200,38	1965,73	0,90	0,40	6,409	0,112	0,097
4.	244,63	2399,82	1,00	0,50	6,486	0,114	0,098
Výběrový průměr μ					6,550	0,115	0,099
Výběrová směrodatná odchylka σ					0,397	0,007	0,006

(Mk - krouticí moment po odečtení pojistného momentu matice Mp = 0,5 Nm)*

Tab. 22 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 7b)

ŠROUB: M8 x 60 - 8.8 (povrchová úprava GEOMET)							
MATICE: SAMOJISTNÁ M8 - 8 (povrchová úprava GEOMET)							
BEZ MAZIVA							
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Mk* [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	244,63	2399,82	2,00	1,50	13,034	0,231	0,200
2.	200,38	1965,73	1,65	1,15	12,414	0,220	0,191
3.	161,28	1582,16	1,45	0,95	12,653	0,224	0,194
4.	82,23	806,68	0,97	0,47	12,377	0,219	0,190
Výběrový průměr μ					12,619	0,224	0,194
Výběrová směrodatná odchylka σ					0,302	0,006	0,005

(Mk - krouticí moment po odečtení pojistného momentu matice Mp = 0,5 Nm)*

Tab. 23 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 8a)

ŠROUB: M8 x 60 - 8.8 (povrchová úprava GEOMET)							
MATICE: SAMOJISTNÁ M8 - 8 (povrchová úprava GEOMET)							
MAZIVO GLATTOL 4303 LT2							
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Mk* [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	82,23	806,68	0,70	0,20	7,115	0,125	0,108
2.	161,28	1582,16	0,80	0,30	6,188	0,108	0,094
3.	200,38	1965,73	0,95	0,45	6,813	0,119	0,103
4.	244,63	2399,82	1,05	0,55	6,817	0,120	0,104
Výběrový průměr μ					6,733	0,118	0,102
Výběrová směrodatná odchylka σ					0,390	0,007	0,006

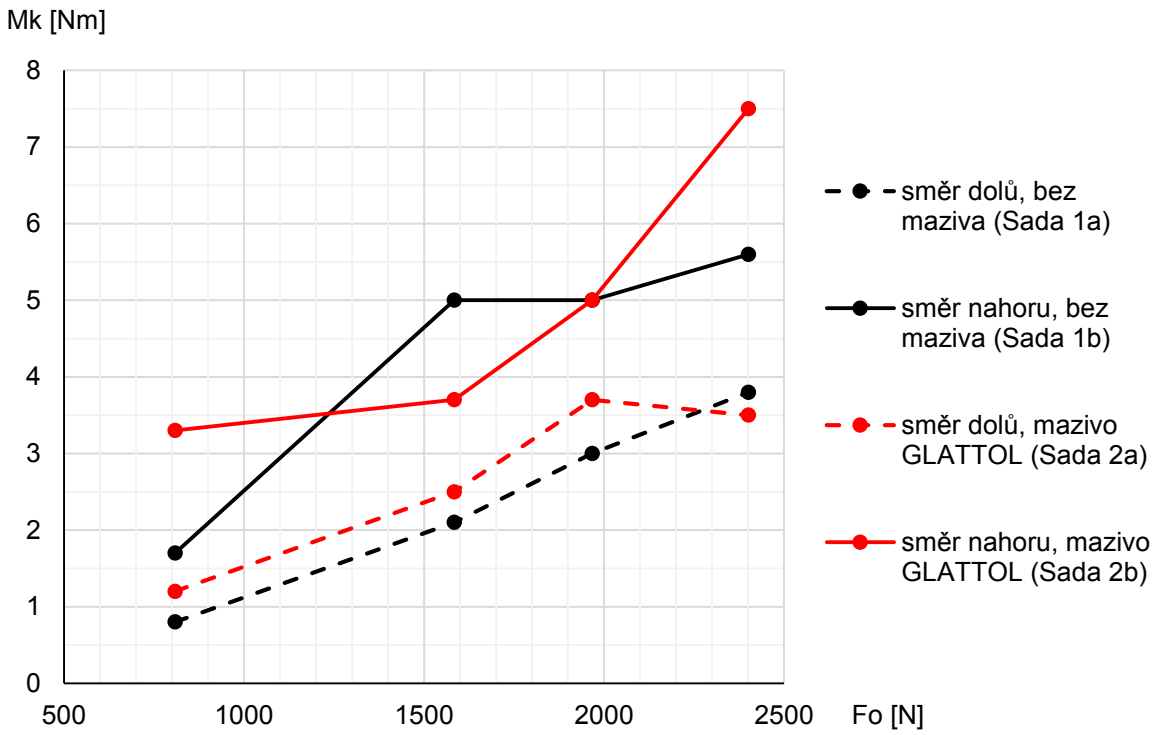
(Mk* - krouticí moment po odečtení pojistného momentu matice Mp = 0,5 Nm)

Tab. 24 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 8b)

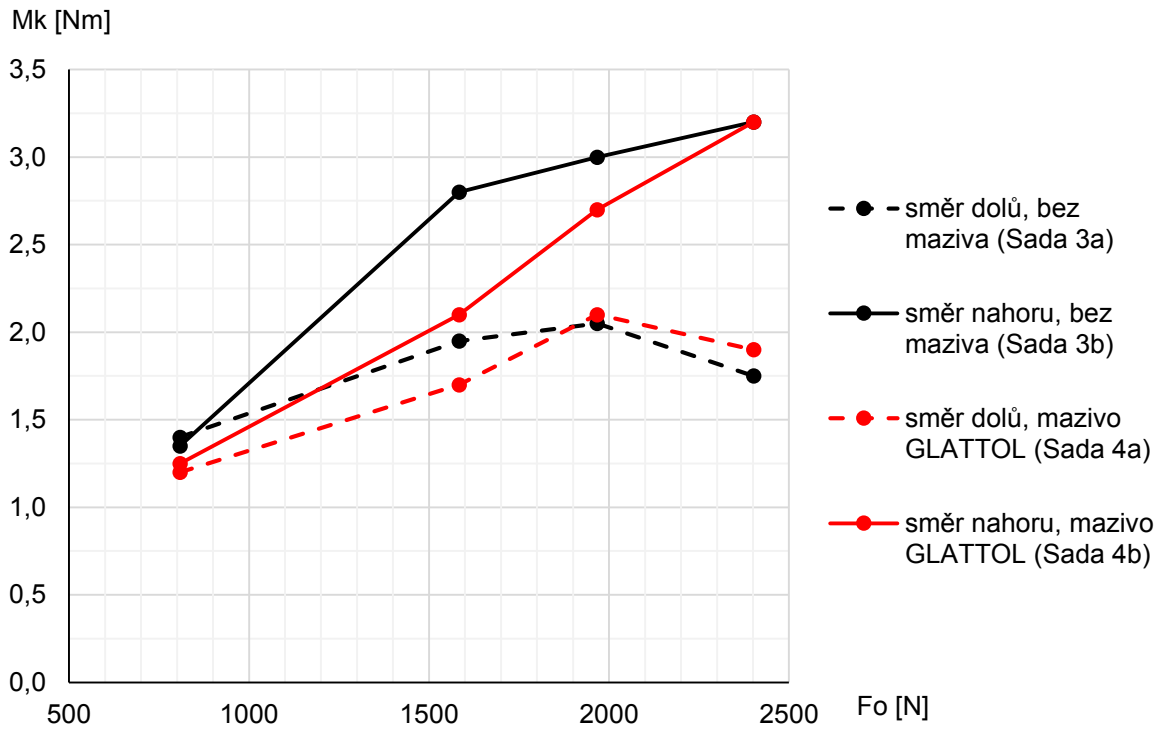
ŠROUB: M8 x 60 - 8.8 (povrchová úprava GEOMET)							
MATICE: SAMOJISTNÁ M8 - 8 (povrchová úprava GEOMET)							
MAZIVO GLATTOL 4303 LT2							
Č. m.	Závaží [kg]	Osová síla Fo [N]	Mk [Nm]	Mk* [Nm]	Třecí úhel φ´ [°]	Souč. tření v závitu f´[1]	Součinitel tření f [1]
1.	244,63	2399,82	1,90	1,40	12,388	0,220	0,190
2.	200,38	1965,73	1,70	1,20	12,808	0,227	0,197
3.	161,28	1582,16	1,45	0,95	12,653	0,224	0,194
4.	82,23	806,68	1,00	0,50	12,953	0,230	0,199
Výběrový průměr μ					12,701	0,225	0,195
Výběrová směrodatná odchylka σ					0,242	0,004	0,004

(Mk* - krouticí moment po odečtení pojistného momentu matice Mp = 0,5 Nm)

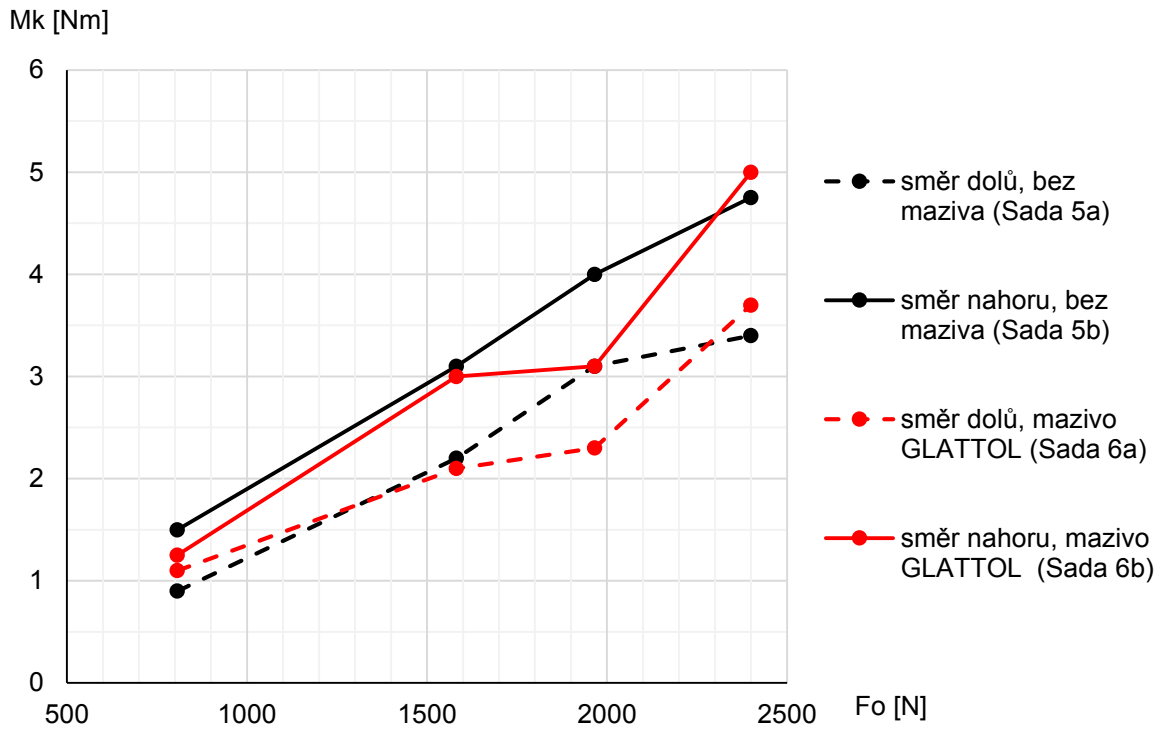
5.7. Výsledky měření graficky



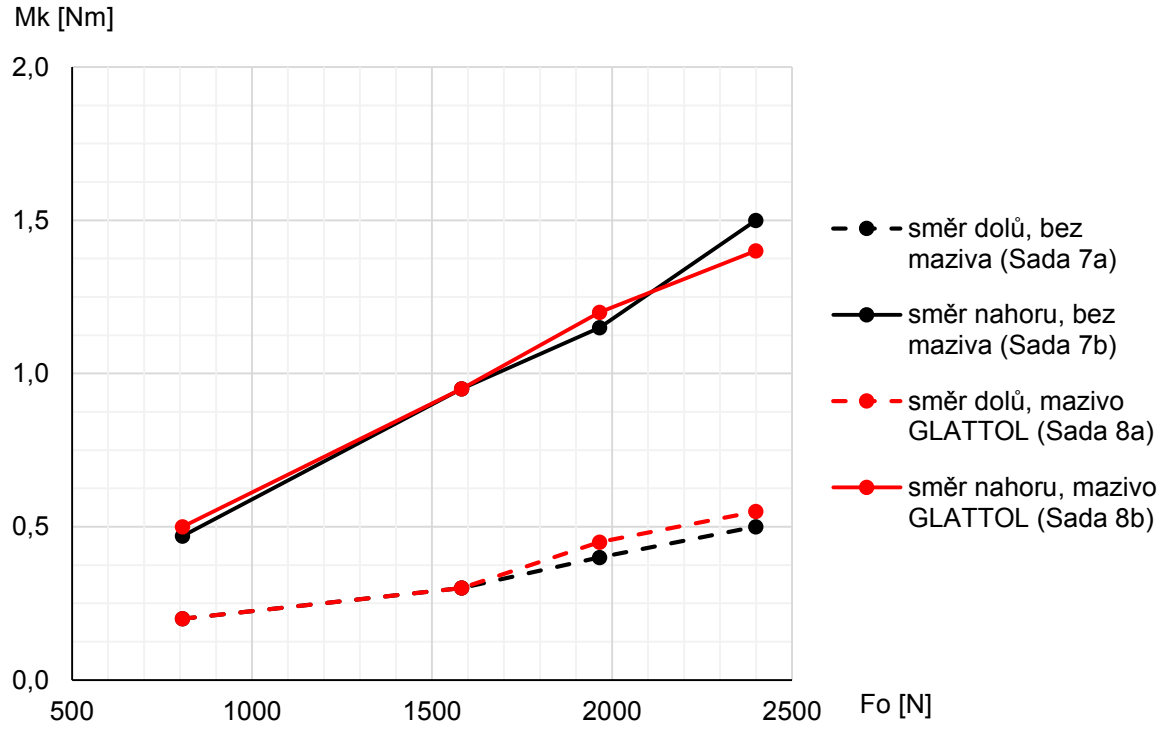
Graf 2 Šroub M12x60 – A4-70, MATICE M12 – A4-80 (NEREZ)



Graf 3 Šroub M12x60 – 8.8, MATICE M12 – 8 (GEOMET)



Graf 4 Šroub M8x65 – A4-70, MATICE M8 – A4-80 (NEREZ)



Graf 5 Šroub M8x60 – 8.8, SAMOJISTNÁ MATICE M8 – 8 (GEOMET)

5.8. Chyby ovlivňující výsledky měření

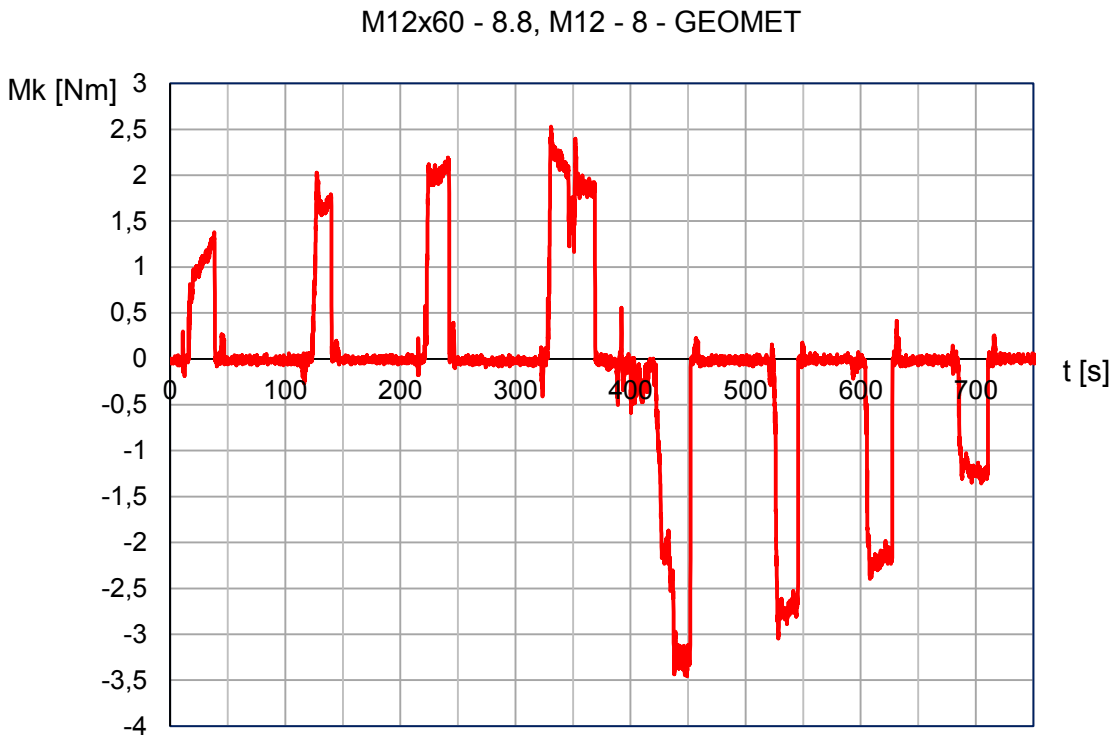
1) Princip měření při samotném měření bylo ručně otáčeno vratidlem snímače krouticího momentu. Při takto prováděném měření nelze zabezpečit konstantní rychlost otáčení vratidla, což je důležité s ohledem na zatěžující hmotu, která je takto uváděna do rotace. Může tedy nastat situace, kdy je nutno překonávat při otáčení také setrvačné účinky závaží, což jistě může do jisté míry mít vliv na výsledky experimentu.

2) Nečistoty a výrobní nepřesnosti zkušební vzorky byly k měření použity v dodaném stavu a také mazivo bylo nanášeno dle předpokladu běžně prováděné montáže. Povrch vzorků tedy mohl obsahovat nepatrná poškození a nečistoty, které také mohly ovlivnit měření.

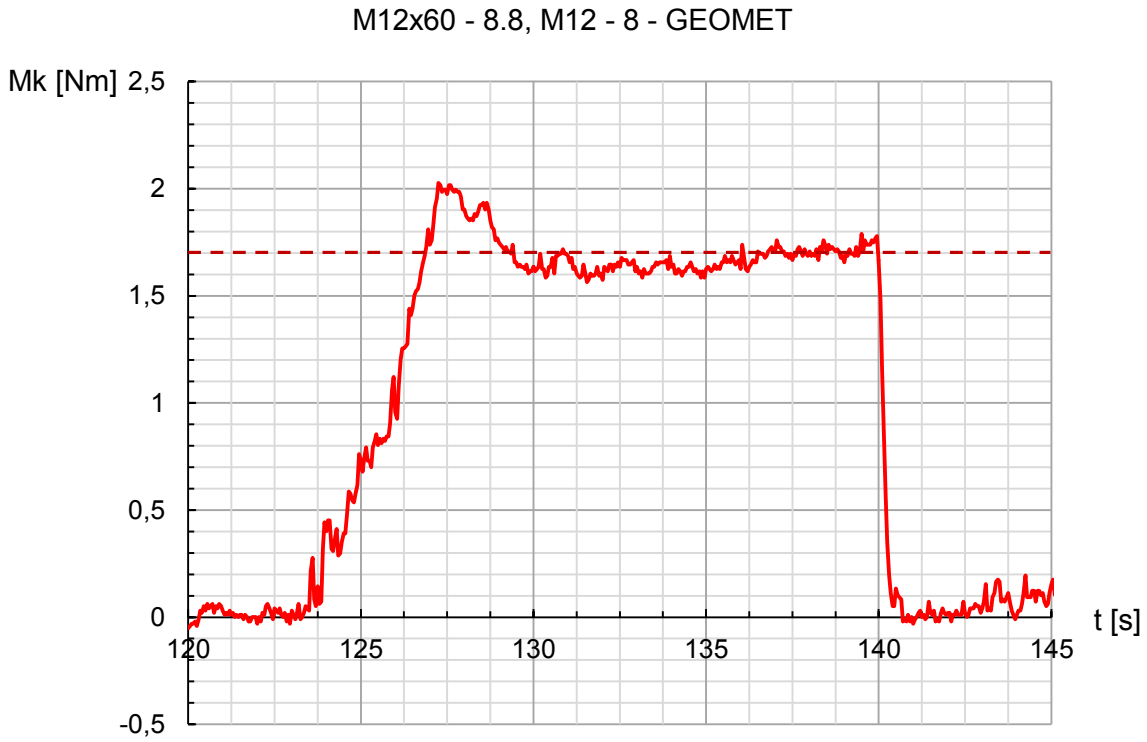
3) Vizuální stanovení hodnot měření Výsledný krouticí moment byl jako výstup software LABVIEW k dispozici ve formě křivky, ze které byly odečítány průměrné hodnoty pro jednotlivá měření, což dále mohlo přispět k ovlivnění výsledků. Při vyhodnocování výsledného krouticího momentu, bylo vždy nutno počkat do doby ustálení křivky okolo rovnovážné hodnoty tak, aby zkreslení výsledku bylo co nejmenší. Zde se tedy velkou měrou uplatňovala chyba lidského faktoru. Pro základní představu jsou v *Grafu 5* znázorněny výsledky měření pro sadu 4a/4b. Kdy je názorně vidět jak v časovém sledu po sobě nastupují extrémy křivky pro jednotlivé měřené úseky. Jednotlivé vrcholy kolísají okolo rovnovážné polohy, kterou je měřený krouticí moment.

4) Počet měření Vzhledem ke kapacitě závaží a délce závěsného přípravku byl proveden omezený počet měření pro každou sadu, což se z hlediska statistického zpracování dat může jevit jako neoptimální.

5) Chyba měřících přístrojů Vzhledem k povaze a metodě měření, byla chyba přístrojů v tomto případě zanedbatelná.



Graf 6 Výsledky měření (Sada 4a/4b), data: výstup z LABVIEW, zpracováno v MS EXCEL



Graf 7 Detail měřeného úseku viz Graf 6, data: výstup z LABVIEW, zpracováno v MS EXCEL, průměrná hodnota stanovena Mk=1,7 Nm

5.9. Vyhodnocení výsledků měření

Výsledky všech měření byly zpracovány do přehledné tabulky, ze které jsou patrny střední hodnoty součinitele tření v závitu.

Tab. 25 Výsledné střední hodnoty součinitele tření pro jednotlivé vzorky

Název	Sada	Pohyb	Mazivo	Součinitel tření f [1]	Střední souč. tření f [1]
M12 - nerez	1a	dolů	-	0,264	0,307
	1b	nahoru		0,351	
	2a	dolů	GLATTOL	0,304	0,364
	2b	nahoru		0,425	
M12 - GEOMET	3a	dolů	-	0,236	0,220
	3b	nahoru		0,203	
	4a	dolů	GLATTOL	0,223	0,199
	4b	nahoru		0,176	
M8 - nerez	5a	dolů	-	0,388	0,400
	5b	nahoru		0,412	
	6a	dolů	GLATTOL	0,381	0,376
	6b	nahoru		0,370	
M8 - GEOMET	7a	dolů	-	0,099	0,147
	7b	nahoru		0,194	
	8a	dolů	GLATTOL	0,102	0,149
	8b	nahoru		0,195	

Před vlastním měřením byl učiněn základní předpoklad experimentu, ohledně použití maziva ve šroubovém spoji. A to takový, že při použití maziva by mělo dojít ke snížení součinitele tření v závitu. Jak ukazují výsledky provedených měření v předchozích dvou kapitolách a obzvláště je to patrné z průběhu křivek v *Grafu 5*, použité mazivo nemělo žádný prokazatelný účinek na snížení hodnoty součinitele tření. V některých případech (viz *Graf 2*) tomu bylo spíše opačně. Vzhledem k tomu, že obdobné výsledky dávají šrouby a matice různých velikostí, materiálů a povrchu, je možno ze zjištěných hodnot učinit závěr, že dodané a v praxi používané plastické mazivo *GLATTOL 4303 LT2* není vhodné k mazání předepjatých šroubových spojů a nelze jej tedy doporučit pro další užívání k tomuto účelu. Použití plastických maziv není v těchto případech doporučováno ani v odborné literatuře, jak uvádí Wald [19],

plastická maziva špatně odolávají tlakům při utahování. Z důvodu maximální objektivity je zapotřebí vzít v úvahu také okolnost, že vzorky bez aplikovaného maziva nebyly dostatečně suché, protože nebyly odmaštěny. I přes to se lze domnívat, že tato skutečnost neměla na výsledek dominantní vliv. Moderním trendem mazání šroubových spojů je použití kluzného laku, popř. mazacích past (viz ***Příloha 1***), což lze ověřit dalšími experimenty.

Srovnáme – li výsledné střední hodnoty součinitelů tření, pro jednotlivé šroubové dvojice, uvedené v *Tab. 25*, lze konstatovat, že dle očekávání jsou součinitele tření pro šrouby s úpravou GEOMET nižší než pro nerezové šrouby. Pro povrch GEOMET je dle [18] a [25] udáván součinitel tření v závitu, bez použitého maziva, cca $0{,}15 - 0{,}16$. Dle ***Přílohy 6*** je pro zinkové mikrolamely mazané tukem stanovena hodnota $0{,}08 - 0{,}16$. Experimentálně stanovené střední hodnoty pro šroubové dvojice M12 – GEOMET jsou mírně vyšší a hodnoty pro M8 – GEOMET přibližně odpovídají tabulkovým hodnotám. Stanovení součinitele tření šroubů a matic vyrobených z austenitické nerezové oceli je v literatuře zmiňováno jako problematické a podléhající značnému rozptylu. ***Příloha 6*** stanoví pro austenitickou ocel bez maziva součinitel tření $\geq 0{,}3$, čemuž experimentem stanovené střední hodnoty neodporují.

Vzhledem k výše uvedenému, podmínkám měření (viz kap. 5.8) a relativně jednoduchému principu celého experimentu lze konstatovat, že zvolená experimentální metoda je pro dané účely vyhovující. I přesto je na Ústavu konstruování a částí strojů, z důvodu přesnějšího měření součinitele tření v závitech, plánována realizace nového zkušebního stanoviště, kde budou nedostatky stávajícího postupu minimalizovány.

6. Závěr

Tato bakalářská práce předkládá základní náhled do rozsáhlé problematiky předepjatých šroubových spojů. Nedílnou součástí práce bylo také zpracování rešerše moderních spojovacích prvků, povlaků a maziv používaných v naší strojírenské praxi. V praktické části byly experimentem stanoveny střední hodnoty součinitele tření v závitu pro konkrétní spojovací materiál a příslušné mazivo. Přičemž ze získaných poznatků experimentu byly vyvozeny závěry přímo použitelné v praxi.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

[1] BOLEK, Alfred a KOCHMAN, Josef aj. *Části strojů*: Technický průvodce 6 – 1. svazek, páté přepracované vydání. Praha: SNTL Praha, 1989. ISBN 80-03-00046-7.

[2] POSPÍŠIL, František. *Závity, šrouby, matice a příslušenství*. Praha: SNTL Praha, 1975. typové číslo L13-E1-IV-51/22385.

[3] SÝKORA, Jan. *Historie a vývoj šroubů*. Hodonín – Ždánice. Šroubárna Ždánice, n. p. 1975

[4] Archimedes. In: *Pictures of Archimedes*. [online]. [vid. 20.4.2017]. Dostupné z: https://www.math.nyu.edu/~crorres/Archimedes/Pictures/ArchimedesPictures.html

[5] File:Possible Self-Portrait of Leonardo da Vinci.jpg. In: Wikipedia Commons. [online]. [vid. 20.4.2017]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Possible_Self_Portrait_of_Leonardo_da_Vinci.jpg

[6] NEANDER, Martin. Standards: The search for a read Thread. In: *Bolted* [online]. č.1, 2016, s.8-11. Nord-lock, Spoon (Malmö). [vid. 2.4.2017]. Dostupné z: http://www.nord-lock.com/cs/bolted/standards-the-search-for-a-red-thread/

[7] GRUBER, Josef. Sir Joseph Whitworth. In: *Zpravodaj SPŠS Plzeň* [online], květen, 2016. [vid. 30.3.2017]. Dostupné z: http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/whitw.pdf

[8] MATOUŠEK, Jiří. Je tohle o restaurování? [online]. [b.m.], [b.r.]. [vid. 30.3.2017]. Dostupné z: http://www.cz-museums.cz/UserFiles/file/Knizka_Matousek.pdf

[9] Joseph Whitworth. In: *Grace´s Guide to British Industrial History* [online]. Grace´s Guide Ltd, © 2017. [vid. 20.4.2017]. Dostupné z: http://www.gracesguide.co.uk/Joseph_Whitworth

[10] BRYCHTA, Josef, ČEP, Robert, NOVÁKOVÁ, Jana, PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II – 2 díl*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava 2007. ISBN 978-80-248-1641-8. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/tech_II

[11] Řezání závitů. In: *Promat* [online]. PROMAT CZ spol. s. r. o., [b. r.]. [vid. 18.5.2017]. Dostupné z: http://www.promatcz.cz/cz/cnc-vyroba/rezani-zavitu/

[12] Válcování závitu. In: *VALENTA závitové tyče* [online]. Valenta ZT s. r. o., [b. r.]. [vid. 18.5.2017]. Dostupné z: https://www.valentazt.cz/vyrobni-moznosti.html

[13] *ELUC* [online]. Railsformers s.r.o. [vid. 19.5.2017]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1109

[14] VALDAUF, Jiří. Moderní řešení protikorozní ochrany. *Tribotechnika* [online]. VI, 6/2013, pp. 18 – 20. [vid. 19.5.2017]. ISSN 1338 – 0524. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/application_data/tribo/uploads/Data/132617384-tribotechnika-2-2013.pdf

[15] KREISLOVÁ, Kateřina, KOUKALOVÁ, Alena, PARÁKOVÁ, Markéta, JÁGLOVÁ, MARTINA. Povrchové úpravy spojovacích součástí. *Tribotechnika* [online]. VI, 2/2013, pp. 47 – 49. [vid. 19.5.2017]. ISSN 1338 – 2233. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/application_data/tribo/uploads/Data/132617384-tribotechnika-2-2013.pdf

[16] HLAVÁČEK, Vratislav, KREIBICH, Viktor. Povlaky s mikrolamelami zinku. *MM průmyslové spektrum* [online]. 10/2004, pp. 30. [vid. 20.5.2017]. 041093. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/povlaky-s-mikrolamelami-zinku.html

[17] PAPLINSKI, Kazimierz. Neelektrolyticky nanášené povlaky ze zinkových mikrolamel. *Povrcháři* [online]. 3, 4/2010, pp. 7–12. [vid. 22.5.2017]. ISSN 1802- 9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/index.php?show=casopis&lang=cze

[18] Houštěk, Jan. Povrchové úpravy šroubů. *MM průmyslové spektrum* [online]. 4/2006, pp. 64. [vid. 22.5.2017]. 060424. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-sroubu.html

[19] WALD, František, ROZLÍVKA, Luboš, SOKOL, Zdeněk, ŠERTLER, Hynek. Vliv maziva na utahování šroubů třecích spojů [online]. [b. m.], [b.r.]. [vid. 23.5.2017]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~wald/.../Vliv_maziva_na_VP_srouby.pdf

[20] *BOSSARD Proven Productivity* [online]. Bossard Group 2017.[vid. 23.5.2017]. Dostupné z: https://www.bossard.com/cs/produktova-reseni/bossard-ecosyn.aspx

[21] Nord-Lock Group. [online]. *Nord-Lock washers* 2015.[vid. 25.5.2017]. Dostupné z: http://www.nord-lock.com/cs/about-us/nord-lock-group/

[22] *SFS intec* [online]. SFS intec 2017.[vid. 25.5.2017]. Dostupné z: https://www.sfsintec.biz/en/web/technologies___products/mechanical_fastening/systemproducts_1/taptite_1/taptite_1.html

[23] *KAMAX* [online]. KAMAX.[vid. 25.5.2017]. Dostupné z: http://www.kamax.com/cz/vyrobky/specialni-srouby/#c647

[24] *BÖLLHOFF*. [online]. Böllhoff s. r. o. 2013 [vid. 25.5.2017]. Dostupné z: http://www.boellhoff.cz/cs/cz/spojovaci_prvky/specialni_spojovaci_prvky/zavitove_technologie/helicoil.php

[25] *Anocote* [online]. Anochrome Group 2017.[vid. 25.5.2017]. Dostupné z: http://anocote.cz/procesy/geomet/

[26] HOLLAS, Daniel. Systém HRC – použití sestav šroubů s kalibrovaným předpětím na mostních konstrukcích. In: *KONSTRUKCE* [online], 31.8. 2016. [vid. 10.5.2017]. Dostupné z: http://www.konstrukce.cz/clanek/system-hrc-pouziti-sestav-sroubu-s-kalibrovanym-predpetim-na-mostnich-konstrukcich/

[27] KALÁB,Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře: Části spojovací.* Ostrava: VŠB – TU Ostrava 2008. ISBN 978-80-248-1290-8.

[28] ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: Spoje a části spojovací*. třetí vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze 2008. ISBN 978-80-01-04138-3.

[29] PCB PIEZOTRONICS MTS SYSTEMS CORPORATION [online]. *Engineering Fundamentals of Threaded Fastener Design and Analysis.* [b.r.]. [vid. 15.6.2017]. Dostupné z: http://www.hexagon.de/rs/engineering%20fundamentals.pdf

[30] BOSSARD. [online]. *Technické informace spojovací technika*. [2017]. [vid. 7.6.2017]. Dostupné z: https://shop.bossard.com/index.cfm?app_action=file_open&app_fileID...app...

[31] NORD-LOCK. Šroubové spoje v komb. s umělými hmotami a kompozitními materiály. In: *Bolted* [online]. Nord-lock International. 2016. [vid. 2.4.2017]. Dostupné z: https://www.nord-lock.com/cs/bolted-category/knowledge-cs/page/3/

[32] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH [online]. *T20WN Torque transducers – Data sheet*. [b.r.]. [vid. 11.6.2017]. Dostupné z: http://www.hbm.cz/produkty/snimace-krouticiho-momentu/t20wn/

[33] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH [online]. *VK20A Junction box – Data sheet*. [b.r.]. [vid. 11.6.2017]. Dostupné z: http://www.hbm.cz/produkty/snimace-krouticiho-momentu/t20wn/

[34] NATIONAL INSTRUMENTS [online].
NI cDAQ-9171/9174/9178 – User Manual. [2016]. [vid. 11.6.2017]. Dostupné z: http://search.ni.com/nisearch/app/main/p/bot/no/ap/global/lang/cs/pg/1/q/nicdaq%209174/

[35] NATIONAL INSTRUMENTS [online]. *USER GUIDE AND SPECIFICATIONS NI USB 9201/9221.* [2007]. [vid. 11.6.2017]. Dostupné z: http://search.ni.com/nisearch/app/main/p/bot/no/ap/tech/lang/cs/pg/1/sn/catnav:pm/q/ni9201/

[36] KOHOUT, Zdeněk, a kolektiv. *Laboratorní cvičení z fyziky*. druhé vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze 2010. ISBN 978-80-01-03703-4.

[37] MADOIL [online]. *GLEITMO 1874 V.* [b.r.]. [vid. 14.6.2017]. Dostupné z: http://www.madoil.cz/dodavatelsky-program/fuchs/technicke_listy/PI/Pi-L0205.pdf

[38] EXVALOS [online]. *MOLYKOTE Průmyslová maziva.* [b.r.]. [vid. 14.6.2017]. Dostupné z: http:// www.exvalos.cz/soubory/File/MOLYKOTE_katalog.pdf

[39] DECKENBACH [online]. *MOLYDUVAL Speciální maziva.* [b.r.].
[vid. 14.6.2017]. Dostupné z: http://www.fina-oleje.cz/files/produkty/molyduval/mazaci_pasty_pro_srouby_a_cepy.pdf

[40] MAAGTECHNIC ERIKS [online]. *Glattol 4303 LT2.* [2014]. [vid. 15.6.2017]. Dostupné z: http:// www.maagtechnic.ch/fileadmin/user.../Glattol_4303_LT2_d.pdf

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky

Al	Hliník
ANSI	American National Standards Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
B	Bor
BS	British Standard
BSC	British Standard Cycle
BSF	British Standard Fine
BSPP	British Standard Parallel Pipe
BSTP	British Standard Tapered Pipe
BSW	British Standard Whitworth
Cr	Chrom
Cu	Měď
ČSN	Česká státní norma
DIN	Deutsches Institut für Normung
FIZn	Zinc Flake Coatings
ISO	International Organization for Standardization
Mg	Hořčík
Mn	Mangan
Mo	Molybden
MoS_2	Sirník molybdeničitý (sulfid molybdenu)
Ni	Nikl
Ti	Titan
UN	Unified National Fixed Pitch Series
UNC	Unified National Coarse Series
UNEF	Unified National Extra Fine Series
UNF	Unified National Fine Series
UNS	Unified National Special
USS	United States Standard
UTS	Unified Thread Standard

Symboly – latinská abeceda

A_{od}	$[J]$	odvedená práce
$A_{př}$	$[J]$	přivedená práce
C_1	$[N/mm]$	konstanta tuhosti části přitěžované
C_2	$[N/mm]$	konstanta tuhosti části odlehčované
d	$[mm]$	jmenovitý průměr závitu šroubu
D	$[mm]$	jmenovitý průměr závitu šroubu
D_1	$[mm]$	malý průměr závitu matice
D_2	$[mm]$	střední průměr závitu matice
d_2	$[mm]$	střední průměr závitu šroubu
d_3	$[mm]$	malý průměr závitu šroubu
f	$[\ 1\ ]$	součinitel tření
f'	$[\ 1\ ]$	součinitel tření v ostrém závitu
f_H	$[\ 1]$	součinitel tření pod hlavou šroubu
f_M	$[\ 1\ ]$	součinitel tření pod maticí
F	$[N]$	obecná zatěžující síla
F_1	$[N]$	síla přitěžující
F_2	$[N]$	síla odlehčující
F_{KR}	$[N]$	kritická síla
F_N	$[N]$	normálová síla v závitu
F_O	$[N]$	zatěžující osová síla v závitu
$F_O{}'$	$[N]$	zatěžující osová síla v ostrém závitu
F_R	$[N]$	reakční síla v závitu
F_T	$[N]$	třecí síla v závitu
F_V	$[N]$	výsledná zatěžující síla v závitu
F_Z	$[N]$	hnací obvodová síla v závitu
i	$[1]$	proměnná $\{1, 2, \dots n\}$
M	$[Nmm]$	obecný kroutící moment
M_K	$[Nm]$	měřený kroutící moment
$M_K{}^*$	$[Nm]$	kroutící moment po odečtení pojistného momentu
M_{KK}	$[Nmm]$	utahovací moment na klíči

M_{KK}'	$[Nmm]$	pomocný utahovací moment na druhém klíči
M_{TH}	$[Nmm]$	třecí moment pod dosedací plochou hlavy šroubu
M_{TM}	$[Nmm]$	třecí moment pod dosedací plochou matice
M_Z	$[Nmm]$	třecí moment v závitu
M_Z'	$[Nmm]$	rovnovážný třecí moment v závitu
n	$[1]$	počet členů v množině
P	$[mm]$	rozteč závitu
P_h	$[mm]$	stoupání závitu
Q	$[N]$	vnitřní osová síla
Q_O	$[N]$	vnitřní předpětí
Q_{OS}	$[N]$	ztráta předpětí po sesednutí
Q_{OV}	$[N]$	výsledné předpětí po sesednutí
Q_1	$[N]$	vnitřní síla ve šroubu
Q_2	$[N]$	vnitřní síla v trubce
R_m	$[N/mm^2]$	mez pevnosti v tahu
R_e	$[N/mm^2]$	mez kluzu
$R_{P0,2}$	$[N/mm^2]$	smluvní mez kluzu
t	$[s]$	čas
x_i	$[1]$	i-tý člen množiny dat

Symboly – řecká alfabeta

α	[°]	vrcholový úhel profilu závitu
γ	[°]	úhel stoupání závitu
ΔL	$[mm]$	celková deformace předepjatého spoje
ΔL_1	$[mm]$	deformace šroubu po zatížení silou F
ΔL_1^0	$[mm]$	deformace šroubu vlivem předpětí
ΔL_2	$[mm]$	deformace trubek po zatížení silou F
ΔL_2^0	$[mm]$	deformace trubek vlivem předpětí
ΔL_S	$[mm]$	deformace po sesednutí
η_S	$[1]$	účinnost šroubové vazby
λ	$[mm]$	změna deformace po zatížení silou F
μ	$[1]$	výběrový průměr

ϱ_H	$[mm]$	třecí poloměr hlavy šroubu
ϱ_M	$[mm]$	třecí poloměr matice
σ	$[1]$	směrodatná výběrová odchylka
σ_a	$[N/mm^2]$	únavová pevnost
φ	$[\,^\circ\,]$	třecí úhel v závitu
φ'	$[\,^\circ\,]$	třecí úhel v ostrém závitu
ψ_1	$[\,^\circ\,]$	úhel směrnice přímky šroubu
ψ_2	$[\,^\circ\,]$	úhel směrnice přímky trubek

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Osový řez a) vnějším, b) vnitřním závitem [autor] 3
Obr. 2 Archimédes [4] 4
Obr. 3 Leonardo Da Vinci [5] 4
Obr. 4 Joseph Whitworth [9] 5
Obr. 5 CNC řezání závitu [11] 8
Obr. 6 Válcování závitu [12] 8
Obr. 7 Závitový trn (kalibr) [13] 10
Obr. 8 Spoj se závrtným šroubem [autor] 11
Obr. 9 Spoj s průchozími dírami [autor] 11
Obr. 10 Spoj se zapuštěnou hlavou šroubu (INBUS) [autor] 12
Obr. 11 Spoj s lícovaným šroubem a korunovou maticí, poj. závlačkou [autor] ... 12
Obr. 12 Další používané typy šroubů [autor] 12
Obr. 13 Šroub ecosyn® - fix [20] 17
Obr. 14 Šroub ecosyn® grip [20] 17
Obr. 15 Šrouby ošetřené povlakem ecosyn® lubric [20] 17
Obr. 16 spoj zajištěný klínovými samojistícími podložkami [21] 18
Obr. 17 Detail klínové podložky s radiálními zuby na vnější straně [21] 18
Obr. 18 TAPTITE DUO se dvěma stabilizačními závity, pro kolmé zavedení [22] 18
Obr. 19 Detail závitu TAPTITE [22] 18
Obr. 20 Šroub pevnosti 16.8 [23] 19
Obr. 21 Rozložení zatížení [24] 19
Obr. 22 Závitová vložka [24] 19
Obr. 23 Šroub s povlakem Geomet 500 [25] 19
Obr. 24 HRC se zapuštěnou hlavou [26] 20
Obr. 25 HRC svorník [26] 20
Obr. 26 Závitová dvojice 21
Obr. 27 Utahování matice [27] 21
Obr. 28 Samosvorný závit - povolování matice [27] 22
Obr. 29 Nesamosvorný závit - povolování matice [27] 23
Obr. 30 Detail profilu závitu s ostrým úhlem [27] 23

Obr. 31 Závislost účinnosti na úhlu stoupání [27] 24

Obr. 32 Utahování matice [autor] 25

Obr. 33 Varianty, při poklesu momentu Mz [28]. 27

Obr. 34 Proces utahování a povolování šroubového spoje [28]. 28

Obr. 35 Předepjatý šroubový spoj, zatížený osovou silou F [autor] 29

Obr. 36 Rötscherův diagram předepjatého spoje [28] 30

Obr. 37 Absorbce utahovacího momentu [29] 31

Obr. 38 Závislost utahovacího momentu na úhlu pootočení [29] 31

Obr. 39 Únavová pevnost dle směrnice VDI 2230, 1. Závit válcován, poté kalen a popouštěn, 2. Závit kalen a popouštěn a poté válcován [30] 32

Obr. 40 Rötscherův diagram po sesednutí spoje. ΔLS – hodnota sesednutí, Q_{OV} – výsledené předpětí po sesednutí, Q_{OS} – ztráta předpětí po sesednutí, [30] 33

Obr. 41 Ilustrační obrázek: zatížení dynamickými střižnými silami [30] 34

Obr. 42 Dodané vzorky použité k experimentu [autor] 35

Obr. 43 Kotvící přípravek [autor] 37

Obr. 44 Detail ukotvení šroubu a matice [vedoucí práce] 37

Obr. 45 Vzorek připravený k měření [autor] 38

Obr. 46 Otáčení vratidlem snímačem krouticího momentu, při měření [autor]. 40

Obr. 47 Zaznamenávání a vizuální vyhodnocování krouticího momentu [autor] .. 41

Obr. 48 Snímač krouticího momentu T20WN s propojovací krabicí VK20]autor] 42

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Normální Gaussovo rozdělení hodnot součinitele tření, sada měření 1a, $\mu = 0{,}264$, $\sigma = 0{,}044$, zpracováno v MS EXCEL [autor] 44

Graf 2 Šroub M12x60 – A4-70, MATICE M12 – A4-80 (NEREZ) 53

Graf 3 Šroub M12x60 – 8.8, MATICE M12 – 8 (GEOMET) 53

Graf 4 Šroub M8x65 – A4-70, MATICE M8 – A4-80 (NEREZ) 54

Graf 5 Šroub M8x60 – 8.8, SAMOJISTNÁ MATICE M8 – 8 (GEOMET) 54

Graf 6 Výsledky měření (Sada 4a/4b), data: výstup z LABVIEW, zpracováno v MS EXCEL 56

Graf 7 Detail měřeného úseku viz Graf 6, data: výstup z LABVIEW, zpracováno v MS EXCEL, průměrná hodnota stanovena Mk=1,7 Nm 56

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Používané spojovací závity 6
Tab. 2 Používané pohybové závity 7
Tab. 3 Uložení s vůlí 9
Tab. 4 Uložení přechodné 9
Tab. 5 Uložení s přesahem 10
Tab. 6 Pevnostní třídy šroubů dle ČSN EN ISO 898 – 1: 2014 13
Tab. 7 Pevnostní třídy matic dle ČSN EN ISO 898 – 2: 2014 13
Tab. 8 Přehled povrchových úprav závitů dle ČSN 01 4060 14
Tab. 9 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 1a) 45
Tab. 10 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 1b) 45
Tab. 11 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 2a) 46
Tab. 12 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 2b) 46
Tab. 13 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 3a) 47
Tab. 14 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 3b) 47
Tab. 15 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 4a) 48
Tab. 16 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 4b) 48
Tab. 17 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 5a) 49
Tab. 18 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 5b) 49
Tab. 19 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 6a) 50
Tab. 20 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 6b) 50
Tab. 21 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 7a) 51
Tab. 22 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 7b) 51
Tab. 23 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: dolů (sada měření 8a) 52
Tab. 24 Naměřené a vypočtené hodnoty, směr: nahoru (sada měření 8b) 52
Tab. 25 Výsledné střední hodnoty součinitele tření pro jednotlivé vzorky 57
Tab. 26 Experimentálně zjištěné hodnoty měrného tlaku dle VDI 2230 [30] 77
Tab. 27 Měrný tlak pod hlavou šroubu dle VDI 2230 [30] 78
Tab. 28 Hodnoty koeficientů tření [30] 82

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 *Firemní prospekt GLEITMO 1874 V [37]* *74*

Katalog MOLYKOTE – Průmyslová maziva, str. 10, [38] *75*

Katalog MOLYDUVAL – Speciální maziva, str. 7, [39] *76*

Příloha 2 *Tab. 26 Exp. zjištěné hodnoty měrného tlaku dle VDI 2230 [30]* *77*

Příloha 3 *Tab. 27 Měrný tlak pod hlavou šroubu dle VDI 2230 [30]* *78*

Příloha 4 *Prospekt mazva GLATTOL 4303 LT2 firmy MAAGTECHNIC [40]* *79*

Příloha 5 *Prospekt snímače krouticího momentu T20WN firmy HBM [32]* *80*

Prospekt propojovací krabice VK20A firmy HBM [33] *81*

Příloha 6 *Tab. 28 Hodnoty koeficientů tření [30]* *82*

PŘÍLOHY

Příloha 1

Produkt-
I N F O R M A C E

FUCHS

GLEITMO 1874 V

PI-L 0205

Kluzný lak na vodní bázi se sulfidem molybdeničitým

Popis

GLEITMO 1874V je kluzný lak na vodní bázi, zasychající na vzduchu, s obsahem anorganického pojiva. Účinnou mazací složkou je synergicky působící kombinace pevných maziv s převažujícím podílem sulfidu molybdeničitého.

Přednosti

- **rozsah užitných teplot: od - 180 do + 400 °C**
- **neobsahuje organická rozpouštědla a je proto při použití zdravotně nezávadný**
- **vytváří suchý, pevně přilnavý kluzný film**
- **odolává nejvyšším zatížením**
- **vykazuje nízké, konstantní tření**
- **zamezuje trhavému kluznému pohybu (stick-slip).**

Oblasti použití

GLEITMO 1874V byl vyvinut jako kluzný lak pro ty případy použití, při kterých může být nanášení prováděno jen štětcem nebo válečkem. Speciální přísady optimalizují smáčecí vlastnosti.
Po oschnutí zanechává rovnoměrný, na omak pevný a dobře přilnavý suchý mazací film.

Příklady použití:

Kluzné a vodící dráhy: lehké ovládání bez trhavých pohybů, dobrý záběh, nízké tření.

Nastavovací mechanizmy: nízké tření, žádné zadírání, bezpečná funkce.

Velká šroubení: vysoká upínací síla, žádné zadírání.

Vulkanizační formy: vysoká odolnost proti tlaku, nepatrné tření, bezpečná funkce, vysoká životnost.

Použití

Kluzný lak GLEITMO 1874V byl vyvinut speciálně pro nanášení štětcem nebo válečkem, může však být nanášen i pomocí nízkotlakých vzduchových a vysokotlakých bezvzduchových stříkacích zařízení.
Pokyny pro použití:
- odstranit otřepy a ostré hrany,
- povrchy určené k ošetření je nutné předem pečlivě odmastit a nechat oschnout,
- nádoby důkladně protřepat a obsah zamíchat,
- nanášet produkt nezředěný nebo zředěný demineralizovanou vodou,

Skladovatelnost: v uzavřeném originálním balení při teplotě místnosti 12 měsíců.

Charakteristika

Vlastnosti	*Jednotka*	*Údaje*	*Zkouška dle*
Barva	-	šedočerná	-
Rozsah užitných teplot	°C	- 180 až + 400	-
Pojivo	-	anorganické	-
Pevná maziva	-	sulfid molybdeničitý	-
Viskozita (tryska 3, 20 °C)	s	cca 35	DIN 53 211
Hustota při 20 °C	kg/m^3	cca 1200	DIN 51 757
Bod vzplanutí	-	nemá	DIN EN 57
Doba schnutí při 20 °C	min	30	-
Doba vytvrzování při 20 °C	min	60	-
Doporučená tloušťka vrstvy (v závislosti na způsobu nanášení)	µm	2 - 20	
Ředidlo	-	demineralizovaná voda	

1997-10-16/HW (02/00/Do) *Firemní prospekt GLEITMO 1874 V [37]* PI-L0205.DOC

Pasty na šrouby

Molykote® 1000

- **Popis** – Pasta s tuhými mazivy pro šroubové spoje. Neobsahuje olovo a nikl.
- **Použití produktu** – Vhodná pro šroubové spoje vystavené vysokým teplotám, až do 650°C. Používá se v korozním prostředí, kde je třeba zajistit snadnou demontáž nebo předpětí po dotažení přesným utahovacím momentem. Využití nachází při mazání lícovaných šroubů, šroubů se zapuštěnou hlavou u vstřikovacích lisů, šroubových spojů v chemickém průmyslu a rovněž pérových podložek a v odstředivkách.
- **Vlastnosti** – Použití ve velkém teplotním rozsahu, vysoká zatížitelnost tlakem, usnadňuje demontáž, dlouhá životnost i při vysokých teplotách, neměnný koeficient u šroubů mazaných olejem, i při velkém počtu montáží a demontáží, dobrá ochrana před korozí.
- **Složení** – pevné mazací částice; minerální olej; zahušťovadlo; kov v podobě prášku
- **Teplotní rozsah použití** – od -30°C do +650°C
- **Balení** – 400ml sprej; tuba: 100g; plechovka: 250g, 1kg; soudek: 25kg; sud: 180kg

Molykote® HSC Plus

- **Popis** – Pasta s tuhými mazivy, neobsahuje olovo a nikl.
- **Použití produktu** – Používá se pro mazání třecích ploch, kov/kov, v oblastech s vysokými teplotami, nejčastěji pro šroubové spoje. Vhodná pro aplikace s malými rychlostmi, vysokými teplotami a korozivním prostředím, kde je třeba zajistit trvale nízký koeficient tření. Aplikuje se i jako mazivo na elektricky vodivé součástky. Úspěšně se používá pro mazání šroubů na parních a plynových turbínách nebo turbokompresorech dieselových motorů, dále na přírubových spojích v chemickém průmyslu.
- **Vlastnosti** – Použití ve velkém teplotním rozsahu, umožňuje bezproblémovou demontáž po delší době ve vysokých teplotách, vysoká zatížitelnost tlakem, díky trvalému koeficientu tření, dosahujeme přesných utahovacích momentů u šroubových spojů, dobrá ochrana před korozí, dobrá elektrická vodivost.
- **Složení** – minerální olej; zahušťovadla; pevné mazací částice; kovový prášek (bez obsahu olova)
- **Teplotní rozsah použití** – od -30°C do +1100°C
- **Balení** – 400ml sprej; tuba: 100g; plechovka: 250g, 1kg; kbelík: 5kg

Molykote® P-37

- **Popis** – Vysoce čistá pasta s tuhými mazivy pro šroubová spojení. Neobsahuje olovo, nikl, síru, chlór nebo fluór.
- **Použití produktu** – Vhodná pro mazání šroubů a matic, které jsou vystaveny vysokým teplotám a vyrobeny z ocelí odolávajícím vysokým nebo extrémně vysokým teplotám, např. slitiny s obsahem niklu. Používá se úspěšně u šroubových spojů parních a plynových turbín a v jaderných elektrárnách.
- **Vlastnosti** – Vysoce čistá (méně než 500 mg síry, méně než 200 mg chlóru a fluóru v 1 kg pasty), může být použita až do teploty +1400°C; koeficient tření jako u olejem mazaných šroubů, přesné dotahování u šroubů s předpětím, zamezení tvorby pnutím způsobovaných trhlinek a lámavosti. Umožňuje snadné uvolnění šroubových spojů i po dlouhodobém vystavení vysokým teplotám.
- **Složení** – pevné mazací částice s minimálním obsahem síry; zčásti syntetický olej, zahušťovadlo; zlepšovatel adheze
- **Teplotní rozsah použití** – od -40°C do +1400°C
- **Balení** – plechovka: 500g, 1kg; soudek: 25kg

Molykote® P-74

- **Popis** – Pasta s tuhými mazivy, používající se pro velký okruh kovových spojů nejčastěji šroubových.
- **Použití produktu** – Široká oblast použitelnosti v chemickém, automobilovém, papírenském průmyslu, při výrobě plastů a zpracování dřeva; používá se pro mazání šroubových spojů, kluzných ložisek, kluzných vedení, vodících čepů, lisovaných spojů, šroubů u výfuku, závitů na svíčkách, přírub a přírubových spojů, závěsných dveří, brzdových mechanismů a listových pružin.
- **Vlastnosti** – Neobsahuje kov, dobrá ochrana proti korozi, vysoká zatížitelnost tlakem, koeficient tření jako u olejem mazaných šroubů, vhodná pro šroubové spoje s předpětím, zamezuje tvorbě trhlin a lámavosti, široký teplotní rozsah.
- **Složení** – pevné mazací částice; syntetický olej; zahušťovadlo; zlepšovatel adheze
- **Teplotní rozsah použití** – od -40°C do +200°C jako pasta, do +1500°C suché mazání
- **Balení** – plechovka: 500g, 1kg; soudek: 25kg

Katalog MOLYKOTE – Průmyslová maziva, str. 10, [38]

Molyduval mazací pasty pro šrouby a čepy

2.2.1 Teplotní rozsah do +400°C

Při teplotách do +400°C se pro mazání šroubů doporučují mazací pasty s MoS_2, např.:

MOLYDUVAL Quick Paste
Vysoce výkonná montážní pasta pro čepy a šroubová spojení s velmi vysokým podílem MoS_2, který umožňuje zlepšení podmínek záběhu, jakož i snadnější demontáž, a to i po delších provozních časech. Nejnižší součinitel tření díky vysoce čistému velmi jemnému MoS_2.
- K mazání šroubů a čepů všeho druhu (snadná demontáž).
- K přípravě (předúpravě) šroubů při vysokém plošném zatížení.
- K přípravě (předúpravě) a mazání vysoce zatížených pohybových závitů a šroubů.

Teplotní rozsah -35°C až +450°C.
při menším přístupu vzduchu také až +640°C.

Také jako sprej: MOLYDUVAL Spray Quick

MOLYDUVAL Quick PG
Pasta pro vysoké teploty na syntetické bázi pro šroubová spojení při vyšších teplotách. Důležitá v případech, kdy se nesmí vytvářet absolutně žádné zbytky.
Také při teplotách nad 450°C netvoří Quick PG žádné karbonizační zbytky. Velmi dobrá stálost vůči chemikáliím a rozpouštědlům.
- Pro horká šroubová spojení, např. v elektrárnách, rafineriích, hutích, slévárnách, válcovnách a v chemickém průmyslu.
- Jako mazivo pro konstrukční prvky, které nejsou stálé proti minerálním olejům, např. EPDM plasty.

Základní olej je syntetický olej (PG).

MOLYDUVAL Quick PAO
Pasta pro vysoké teploty na syntetické bázi, podobně jako Paste PG, avšak na bázi jiného velmi dlouhodobě stálého syntetického oleje (PAO). PAO oproti PG nabízí lepší snášenlivost s plasty.
- Pro horká šroubová spojení, např. v elektrárnách, rafineriích, hutích, slévárnách, válcovnách a v chemickém průmyslu.
- Jako mazivo pro konstrukční prvky , které nejsou stálé vůči minerálním olejům, např. plasty nebo pryž.

Základní olej je syntetický olej (PAO).

2.2.2 Teplotní rozsah mezi +400°C a +600°C

Čisté grafitové pasty se vyznačují zvýšenou teplotní stálostí a to i při vlivech vlhkého prostředí. Rozklad grafitu při nejvyšších teplotách probíhá bez zbytků. Až nad 600°C vykazuje grafit vynikající mazací účinek, především také ve vlhkém prostředí.

MOLYDUVAL Grafitpaste GM
Grafitová pasta se zvlášť čistým nejjemnějším grafitem, se schopností absorpce nejvyšších tlaků, odpuzující vodu, oxidační stálostí, chránící proti korozi.
- Pro kluzné dráhy, vedení, klouby ve strojírenském průmyslu při malých kluzných rychlostech.
- Jako mazivo ve slévárnách a u pecí.
- K úpravě nástrojů v oblasti vysokých teplot.

Teplotní rozsah -20°C až +700°C.
Základní olej je minerální olej.

MOLYDUVAL Grafitpaste GH
Vysoce koncentrovaná grafitová pasta se zvlášť vysokým podílem grafitu, velmi pevná, se schopností absorpce nejvyšších tlaků, odpuzující vodu, oxidační stálostí, chránící proti korozi. K použití v případech, kdy tradiční grafitové pasty a dokonce grafitová pasta GM z hlediska oddělovacího účinku při nejvyšších tlacích/teplotách již nepostačují.
Teplotní rozsah -20°C až +700°C.
Základní olej je minerální olej.

MOLYDUVAL GRAFITPASTE GS
Grafitová pasta na bázi syntetického oleje s nejvyšší čistotou. Bez síry, mědi a zinku.
- Jako oddělovací a mazací pasta při protlačování tyčí z lehkých kovů apod.

Teplotní rozsah -40°C až +700°C.
Základní olej je syntetický olej.

MOLYDUVAL Grafitpaste GN
Nová vysoce výkonná pasta s teplotně velmi stálými speciálními pevnými látkami pro nejvyšší teploty. Neobsahuje kovy a nikl, zabraňuje zapečení šroubů, lícování a kluzných ploch. Dobrá stálost vůči vodě a korozi, dobré těsnící vlastnosti, dobré odvádění tepla, nezpryskyřiční a nekarbonizuje. Použitelná také při vyšších teplotách.
- Pro horká šroubová a čepová spojení.
- Pro horké kluzné plochy a ložiska.
- Pro kluzné plochy na brzdách.

Teplotní rozsah -40°C až +1400°C.
Základní olej je syntetický olej.
Barva černá.

Katalog MOLYDUVAL – Speciální maziva, str. 7, [39]

Příloha 2

Tab. 26 Experimentálně zjištěné hodnoty měrného tlaku dle VDI 2230 [30]

Materiálová zkratka, označení podle EN	Číslo materiálu	Pevnost v tahu $R_{m\,min}$ [N/mm²]	Mezní měrný tlak[1) 4)] P_G [N/mm²]
USt 37-2 (S235 JRG1)	1.0036	340	490
St 50-2 (E295)	1.0050	470	710
St 52-3U (S355 JO)	1.0553	510	760
Cq 45	1.1192	700	630[2)]
34 CrMo 4	1.7720	1 000	870[2)]
34 CrNiMo 6	1.6582	1 200	1 080[2)]
38 MnSi-VS 5-BY	1.5231	900	810[2)]
16 MnCr 5	1.7131	1 000	900[2)]
X5 CrNi 18 12	1.4303	500	630
X5 CrNiMo 17 12 2	1.4401	510	460[2)]
X5 NiCrTi 26 15	1.4980	960	860[2)]
NiCr20TiAl	2.4952	1 000	700
GG-25 (GJL-250)	0.6020	250	850[2) 3)]
GGG-40 (GJS-400)	0.7040	400	600[2) 3)]
GGG-50 (GJS-500)	0.7050	500	750[2) 3)]
GGG-60 (GJS-600)	0.7060	600	900[2) 3)]
AlMgSi 1 F31 (AW-6082)	3.2315.62	290	260[2)]
AlMgSi 1 F28	3.2315.61	260	230[2)]
AlMg4.5Mn F27 (AW-5083)	3.3547.08	260	230[2)]
AlZnMgCu 1.5 (AW-7075)	3.4365.71	540	410[2)]
GK-AlSi9Cu3	3.2163.02	180	220[2)]
GD-AlSi9Cu3	3.2163.05	240	290[2)]
GK-AlSi7Mg wa	3.2371.62	250	380[2)]
AZ 91	(3.5812)	310	280[2)]
TiAl6V4	3.7165.10	890	890[2)]

Tab. 27 Měrný tlak pod hlavou šroubu dle VDI 2230 [30]

Měrný tlak pod hlavou šroubu se šestihrannou hlavou

Podle DIN 931/933 (ISO 4014/4017) s normálním závitem

Jmenovitý Ø závitu d	Velikost klíče S_{max} [mm]	Ø kruhového osazení $d_{w\,min}$ [mm]	Průchozí otvor (ISO 273) střední H13 d_h [mm]	Dosedací plocha A_p [mm²]	Průřez šroubu $A_{s\,nom}$ [mm²]	Měrný tlak pod hlavou[1] [N/mm²] Třída pevnosti 8.8	10.9	12.9
M4	7	5,9	4,5	11,4	8,78	385	568	665
M5	8	6,9	5,5	13,6	14,2	528	777	909
M6	10	8,9	6,6	28	20,1	364	532	625
M8	13	11,6	9	42,1	36,6	442	649	761
M10	16 (ISO)	14,63	11	73,1	58	405	594	695
M10	17	15,6	11	96,1	58	308	452	529
M12	18 (ISO)	16,63	13,5	74,1	84,3	580	853	999
M12	19	17,4	13,5	94,6	84,3	454	668	782
M14	21 (ISO)	19,64	15,5	114,3	115	517	759	888
M14	22	20,5	15,5	141,4	115	418	613	718
M16	24	22,5	17,5	157,1	157	515	756	885
M18	27	25,3	20	188,6	192	541	769	901
M20	30	28,2	22	244,4	245	532	761	888
M22	32 (ISO)	30	24	254,5	303	637	908	1 065
M22	34	31,71	24	337,3	303	480	685	803
M24	36	33,6	26	355,8	353	528	750	880
M27	41	38	30	427,3	459	576	821	960
M30	46	42,7	33	576,7	561	520	740	865

[1] Hodnoty měrného tlaku v tabulkách se vztahují k 90 %-nímu využití meze kluzu šroubu $R_{p\,0,2}$ a $\mu_G = 0,12$ (odkaz: VDI 2230:2003).

Příloha 3

an ERIKS company

MAAGTECHNIC

Glattol® **Glattol 4303 LT2**

Tieftemperatur-Spezialfett

Glattol 4302 LT2 ist ein Tieftemperatur-Spezialfett auf der Basis von Mineralöl und einer Calciumseife. Darauf abgestimmte Zusätze und ein besonderes Herstellungsverfahren verleihen dem Fett aussergewöhnliche Eigenschaften.

Eigenschaften

- ausgeprägtes Korrosionsschutzvermögen
- gute Oxidationsstabilität
- hohe mechanische und chemische Stabilität
- äusserst geringer Walkwiderstand in der Kälte
- sehr hohe Wasserbeständigkeit
- geringe Ölabscheidung
- hohe Alterungsbeständigkeit

Einsatzgebiete

- Gleit- und Wälzlager, Gelenke usw. von Maschinen, die tiefen Temperaturen ausgesetzt sind und/oder in feuchter oder nasser Umgebung arbeiten
- schnelllaufende Lager
- Instrumentenfett

Glattol 4303 LT2 soll aus Qualitätsgründen **nicht** mit anderen Schmierfetten vermischt werden!

Normen

- DIN 51502 K 2 G-50

Glattol 4303 LT2 Eigenschaft		**Klasse** Methode	**2**
Art des Aufdickers		--	Ca
Einsatzbereich	°C	--	-50 bis +100
Farbe		Visuell	Gelblich
Fliessdruck bei –40 °C	mbar	DIN 51805	600
Kin. Visk. bei 100°C	mm^2/s	ISO 3104	2.6
Kin. Visk. bei 40°C	mm^2/s	ISO 3104	14
Tropfpunkt	°C	ISO 2176	145
Walkpenetration	$^1/_{10}$ mm	ISO 2137	265-295
Gefahrencode		Swissi	F4 s PN2

Mittelwerte; es gelten die üblichen Toleranzen. Änderungen vorbehalten. 11.07.2014/00

Maagtechnic AG, +41 44 824 95 75, lubricants-ch@maagtechnic.com, www.maagtechnic.com

Prospekt mazva GLATTOL 4303 LT2 firmy MAAGTECHNIC [40]

Příloha 4

Data Sheet

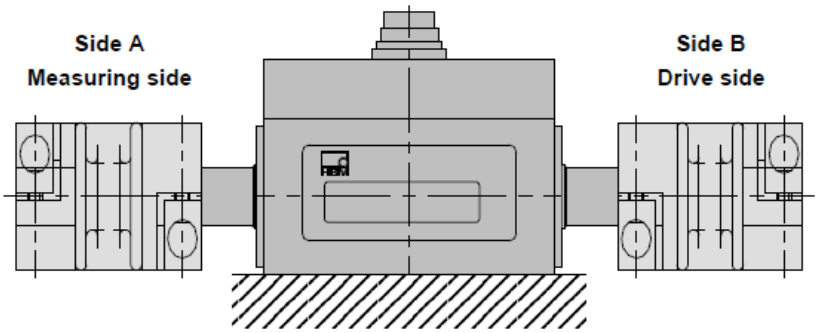
T20WN

Torque transducers

Special features

- Nominal (rated) torques 0.1 N·m, 0.2 N·m, 0.5 N·m, 1 N·m, 2 N·m, 5 N·m, 10 N·m, 20 N·m, 50 N·m, 100 N·m, 200 N·m
- Accuracy class: 0.2
- Contactless transmission of measurement signals
- Measurement on rotating or stationary parts
- Cylindrical shaft ends for non-play friction joints
- Integrated measurement system for rotational speed and angle of rotation
- Torque output signal ±10 V

Installation example with bellows couplings



Two of the couplings provided are needed for this example

B0673–9.0 en

HBM

Prospekt snímače krouticího momentu T20WN firmy HBM [32]

Příloha 5

Data sheet

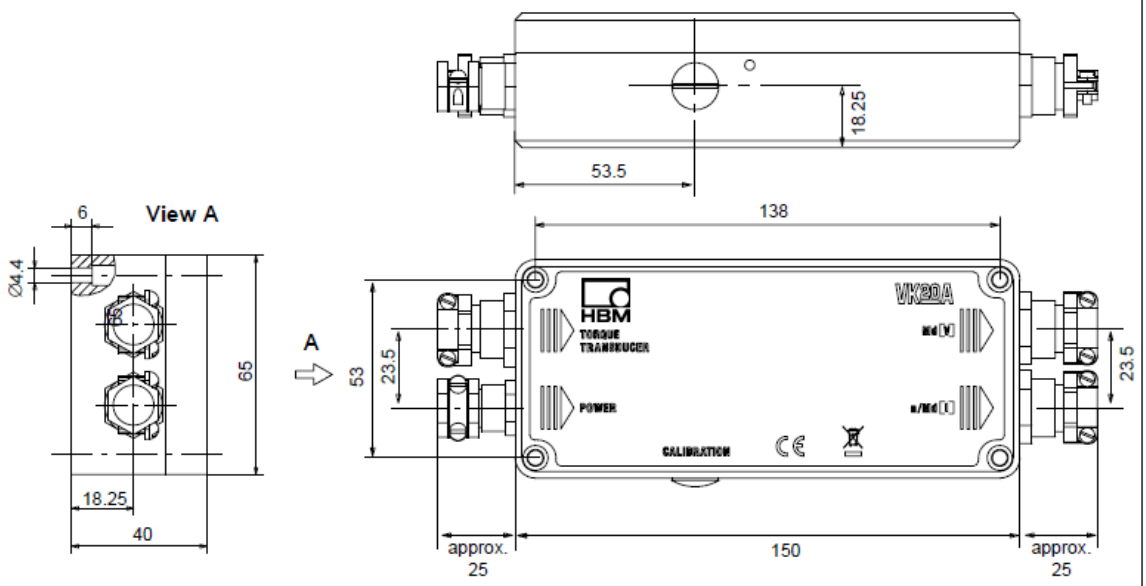
VK20A

Junction box

Special features

- For connecting T20WN and T22 torque transducers
- Integrated control signal triggering with T20WN
- 14 ... 30 V DC supply voltage range
- IP65 degree of protection per EN60529
- EMC-tested per EN61326-1 through HBM shielding design

Dimensions (in mm; 1 mm = 0.03937 inches)



B2337-1.0 en

Prospekt propojovací krabice VK20A firmy HBM [33]

Příloha 6

Tab. 28 Hodnoty koeficientů tření [30]

Třída koeficientu tření	Rozsah pro μ_G and μ_K	Typické příklady pro: Materiál/povrchy	Maziva
A	0,04–0,10	kovové, leskle leštěné zušlechtěné, černěné fosfátováno galvanické povlaky jako Zn, Zn/Fe, Zn/Ni zinko-lamelové povlaky	pevná maziva jako MoS_2, grafit, PTFE, PA, PE, PI v kluzných lacích jako Top-Coats nebo v pastách voskové taveniny, voskové disperze
B	0,08–0,16	kovové, leskle leštěné zušlechtěné, černěné fosfátováno galvanické povlaky jako Zn, Zn/Fe, Zn/Ni zinko-lamelové povlaky slitiny Al a Mg	pevná maziva jako MoS_2, grafit, PTFE, PA, PE, PI v kluzných lacích jako Top-Coats nebo v pastách, voskové taveniny, voskové disperze, tuky, oleje, stav při dodání
		žárově pozinkováno	MoS_2, grafit, voskové disperze
		organické povlaky	s integrovaným mazadlem nebo voskové disperze
		austenitická ocel	integrovaná mazadla nebo vosky; pasty
C	0,14–0,24	austenitická ocel	voskové disperze, pasty
		kovové, leskle leštěné fosfátováno	stav při dodání (mírně naolejováno)
		galvanické povlaky jako Zn, Zn/Fe, Zn/Ni ne-galvanicky nanášený zinek lepidlo	bez
D	0,20–0,35	austenitická ocel	olej
		galvanické povlaky jako Zn, Zn/Fe žárově pozinkováno	bez
E	≥ 0,30	galvanické povlaky jako Zn/Fe, Zn/Ni austenitická ocel slitiny Al, Mg	bez