VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# ŽIVOTNOST KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ PŘI RŮZNÉM ZPŮSOBU VÝROBY A TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ PROFILŮ VALIVÝCH DRAH

THE IMPACT OF DIFFERENT MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND THERMAL PROCESSING OF GROOVE PROFILES ON THE SERVICE LIFE OF BALL SCREWS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL DRÁBEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2013/2014

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Michal Drábek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Životnost kuličkových šroubů při různém způsobu výroby a tepelného zpracování profilů valivých drah**

v anglickém jazyce:

**The Impact of Different Manufacturing Technologies and Thermal Processing of Groove Profiles on the Service Life of Ball Screws**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Základní přehled problematiky řešeného tématu
3. Rozbor použité technologie výroby a tepelného zpracování profilů valivých drah ve firmě Kuličkové šrouby Kuřim, a.s.
4. Návrh rozsahu a metodiky ověřování životnosti vzorků kuličkových šroubů
5. Realizace testů, sběr dat, porovnání dosažených výsledků a jejich rozbor
6. Závěr

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce bude zaměřena na posouzení životnosti kuličkových šroubů při různém způsobu výroby a tepelného zpracování profilů valivých drah. Teoretická část se bude zabývat popisem stanovení životnosti kuličkových šroubů dle mezinárodních standardů, popisem technologie výroby (válcování, rotační okružování, broušení) a následným tepelným zpracováním (indukční a laserové kalení) profilů valivých drah ve firmě Kuličkové šrouby Kuřim, a.s. Další částí práce bude provedení testů životnosti valivých drah a porovnání dosažených výsledků. Práce bude ukončena doporučením pro praktickou aplikaci jednotlivých metod výroby a tepelného zpracování profilů valivých drah.

Seznam odborné literatury:

1. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
4. PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, tisk FINAL TISK Olomoučany, 2001, 1. vyd., 516 s.,ISBN 80-7204-193-2.
5. PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, tisk FINAL TISK Olomoučany, 2001, 1. vyd., 360 s.,ISBN 80-7204-130-4.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 25.11.2013

L.S.

| | |
|---|---|
| prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.<br>Ředitel ústavu | prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.<br>Děkan fakulty |

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o měření životnosti kuličkových šroubů. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou popsány tři základní metody výroby kuličkových šroubů – válcování, rotační okružování a broušení. Následně je popsáno tepelné zpracování kuličkového šroubu, a to indukční a laserové kalení. Praktická část je věnována provedení testů životnosti kuličkových šroubů a jejich vyhodnocení. Testy byly provedeny na dvou dvojicích kuličkových šroubů. První dvojice byla vyrobena odlišnou metodou výroby (okružováním a broušením) a následně indukčně zakalena. Druhá dvojice byla vyrobena broušením a následné tepelné zpracování bylo u každého šroubu odlišné (laserové a indukční kalení). Výsledky testů jsou následně vyhodnoceny dle mezinárodních standardů.

**Klíčová slova**

Kuličkový šroub, životnost, technologie výroby kuličkového šroubu, technologie tepelného zpracování kuličkového šroubu

## ABSTRACT

The aim of this thesis is ball screw service life measurement. Text is divided on two major parts, theoretical one and practical one. Theoretical part describes three basic methods of ball screws manufacturing – rolling, whirling and grinding. Subsequently, methods of heat treatment (inductive and laser hardening) are mentioned. Practical part is devoted to ball screw service life testing and evaluation of results. Tests were carried out on two sets of two ball screws. First set was manufactured by whirling and grinding followed by inductive hardening. Second set was manufactured by grinding followed by inductive hardening in one case and laser hardening in the second one. Test results were evaluated according to international standards.

**Keywords**

Ball Screw, Service Life, Manufacturing Technologies of the Ball Screw, Thermal Processing of the Ball Screw.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRÁBEK, Michal. *Životnost kuličkových šroubů při různém způsobu výroby a tepelného zpracování profilů valivých drah.* Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 60 s., 3 přílohy. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Životnost kuličkových šroubů při různém způsobu výroby a tepelného zpracování profilů valivých drah** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

30. 5. 2014 ---------- Bc. Michal Drábek

Datum

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Josefu Sedlákovi, Ph.D. za cenné připomínky, poskytnuté rady a bezproblémovou komunikaci při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval firmě Kuličkové šrouby Kuřim, a.s. za možnost zpracování dané problematiky. Ing. Milanu Dobešovi z této firmy děkuji za odborné rady a pomoc při zpracování diplomové práce.

# OBSAH

ABSTRAKT ..... 4
PROHLÁŠENÍ ..... 5
PODĚKOVÁNÍ ..... 6
OBSAH ..... 7
ÚVOD ..... 9
1 PŘEDSTAVENÍ FIRMY KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM, a.s. ..... 10
2 MECHANISMY PRO PŘÍMOČARÝ POHYB ..... 11
2.1 Kuličkový šroub a matice ..... 11
2.2 Kluzný pohybový šroub ..... 14
2.3 Pastorek a hřeben ..... 15
2.4 Šnek a šnekový hřeben ..... 16
2.5 Lineární motor ..... 16
3 TECHNOLOGIE VÝROBY KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ ..... 18
3.1 Tváření ..... 19
3.2 Frézování ..... 22
3.3 Broušení ..... 26
4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ ..... 29
4.1 Kalení ..... 29
4.1.1 Kalení martenzitické ..... 32
4.1.2 Kalení bainitické ..... 33
4.2 Povrchové kalení ..... 33
4.2.1 Indukční kalení ..... 34
4.2.2 Kalení laserem ..... 35
5 TESTOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ ..... 39
5.1 Testovací zařízení ..... 39
5.2 Testy první dvojice kuličkových šroubů ..... 41
5.2.1 Vypočtené teoretické hodnoty životnosti ..... 42
5.2.2 Vyhodnocení testů ..... 44
5.3 Testy druhé dvojice kuličkových šroubů ..... 49
5.3.1 Vypočtené teoretické hodnoty životnosti ..... 49
5.3.2 Vyhodnocení testů ..... 51
ZÁVĚR ..... 55

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ ..... 56
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK ..... 59
SEZNAM PŘÍLOH ..... 60

# ÚVOD

Kuličkové šrouby patří mezi hlavní pohybové součásti obráběcích strojů. Využívají se pro převod rotačního pohybu na přímočarý. Stejně jako u ostatních strojních součástí, tak i u kuličkových šroubů je důležitý parametr životnost. Po dobu životnosti musí být kuličkové šrouby schopny plnit vysoké požadavky, které jsou na ně kladeny při polohování stolů obráběcích strojů.

Hlavním cílem této diplomové práce je provést a vyhodnotit testy životnosti kuličkových šroubů. Tato diplomová práce byla zpracována pro společnost Kuličkové šrouby Kuřim, a.s. Do firmy Kuličkové šrouby Kuřim, a.s. bylo koncem roku 2014 pořízeno v rámci projektu OPPI Potenciál laserové pracoviště pro svařování materiálu, navařování kovových prášků a tepelné zpracování kuličkových šroubů. Jelikož dosud nebylo tepelné zpracování kuličkového šroubu laserem nikde publikováno, bylo nutné otestovat, zdali tato technologie tepelného zpracování je dostatečná pro potřeby firmy a vyhovuje interním požadavkům pro životnost kuličkového šroubu a požadavkům mezinárodních norem. Dle mezinárodních norem byly stanoveny teoretické hodnoty životnosti kuličkového šroubu, kterých by mělo být dosaženo při úspěšném testování životnosti. Nejlépe by tyto stanovené hodnoty měly být přesáhnuty. V rámci diplomové práce byly provedeny dva testy životnosti kuličkových šroubů. V prvním testu byla testována životnost kuličkových šroubů s odlišnou technologií výroby. Druhý test opět posuzoval životnost, ale byl aplikován na kuličkové šrouby, u kterých byla odlišná metoda tepelného zpracování, přičemž u prvního testovaného kuličkového šroubu bylo využito konvenčního indukčního tepelného zpracování a u druhého testovaného kuličkového šroubu bylo použito tepelné zpravování laserem.

Tato diplomová práce je rozdělena do několika kapitol. V první kapitole je představena firma Kuličkové šrouby Kuřim, a.s. Druhá kapitola se zabývá mechanismy pro přímočarý pohyb, mezi které kuličkové šrouby patří. Jelikož kuličkový šroub je závitový profil navinutý na válcové součásti, tak v třetí kapitole jsou popsány základní technologie výroby závitu s důrazem na technologii výroby kuličkových šroubů. Ve čtvrté kapitole je popsáno tepelné zpracování kuličkových šroubů. Stěžejní pátá kapitola se zabývá provedením testů životnosti kuličkového šroubu s následným vyhodnocením dat z testů, které jsou shrnuty v závěrečné části práce.

# 1 PŘEDSTAVENÍ FIRMY KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM, a.s.

Vznik společnosti Kuličkové šrouby Kuřim, a.s. (obr. 1) je spojený s výrobou obráběcích strojů v Kuřimi, jejichž základy byly položeny roku 1924 ve strojírně bývalé Československé zbrojovky v Brně. V tomto roce byla ve strojírnách zahájena výroba speciálních obráběcích strojů pro výrobu zbraní. Následně v roce 1929 byla zahájena výroba obráběcích strojů pro vlastní potřebu a pro tuzemský trh. Rozmach výroby strojů byl zaznamenán v roce 1932, kdy začala Zbrojovka pronikat na zahraniční trhy, především do Anglie, Ruska a Itálie. Jelikož byly přesné soustruhy a výkonné frézky v zahraničí velmi žádány, vznikl v roce 1942 nový závod pro jejich výrobu v Kuřimi [5].

V roce 1967 byla v Kuřimi zavedena výroba kuličkových šroubů. Do roku 1996 tato výroba probíhala v rámci firmy TOS Kuřim, následnou privatizací vznikla nová společnost TOS Kuřim – KŠ, s.r.o. Roku 1997 došlo ke změně názvu firmy na Kuličkové šrouby Kuřim, s.r.o. K 1. 1. 2001 došlo ke změně na akciovou společnost. Dne 25. 7. 2005 se stala majoritním vlastníkem firmy česká obchodní společnost ALTA, a.s. K 1. 9. 2011 byla firma KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM, a.s. vyčleněna ze skupiny ALTA, a.s. [5].

Firma Kuličkové šrouby Kuřim, a.s. vyrábí především pohybové šrouby a k nim doplňkový sortiment jako jsou vodicí tyče, tělesa vřeten, radiálně – axiální ložiska, ložisková pouzdra, aj. Je také vybavena laserovým robotickým pracovištěm pro kalení, navařování a svařování materiálu. Firma třikrát získala ocenění Zlatá medaile na MSV Brno za výzkum a vývoj nových pohybových šroubů (rychloběžný kuličkový šroub, teleskopický kuličkový šroub a kuličkový šroub s klecí) [5].

Obr. 1 Firma Kuličkové šrouby Kuřim, a.s. [5].

# 2 MECHANISMY PRO PŘÍMOČARÝ POHYB

U většiny obráběcích strojů je hlavní pohyb rotační, který je vyvozen z pohonu obráběcího stroje. Tyto pohony mohou být elektrické (stejnosměrné, střídavé a krokové motory) anebo hydraulické. Rotační pohyb je nutné transformovat na přímočarý pohyb, který lze rozdělit na hlavní (pohyb nástroje nebo obrobku) a pomocný pohyb (přiblížení nástroje k obrobku před započetím práce, přemístění části stroje při změně pracovního programu, atd.). Pro tuto transformaci z rotačního pohybu na přímočarý slouží různé mechanismy [1,2].

Mechanismy pro přímočarý pohyb:

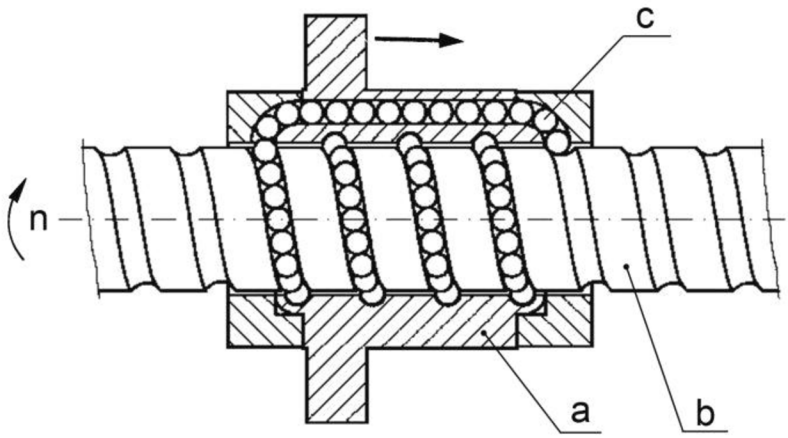
- kuličkový šroub a matice,
- kluzný pohybový šroub,
- pastorek a hřeben,
- šnek a šnekový hřeben,
- lineární motor.

## 2.1 Kuličkový šroub a matice

Kuličkové šrouby jsou konstrukční prvky, které se vyznačují vysokou účinností, přesností a tuhostí. Aby bylo dosaženo těchto vlastností, musí být kuličkový šroub uložen s vysokou přesností a tuhostí. Tolerance rovnoběžnosti uložení osy kuličkového šroubu a vodicích ploch je max. 0,02 mm/1000 mm. Také kolmost uložení matice je max. 0,02 mm/1000 mm. Síla, která působí na maticovou jednotku, musí být vyvozena pouze v axiálním směru. Proto u dlouhých a tenkých kuličkových šroubů nesmí docházet k průhybu jejich hmotností. Díky své vysoké účinnosti, která je dána valivým odporem kuliček, nachází kuličkový šroub využití v mnoha oblastech strojírenství:

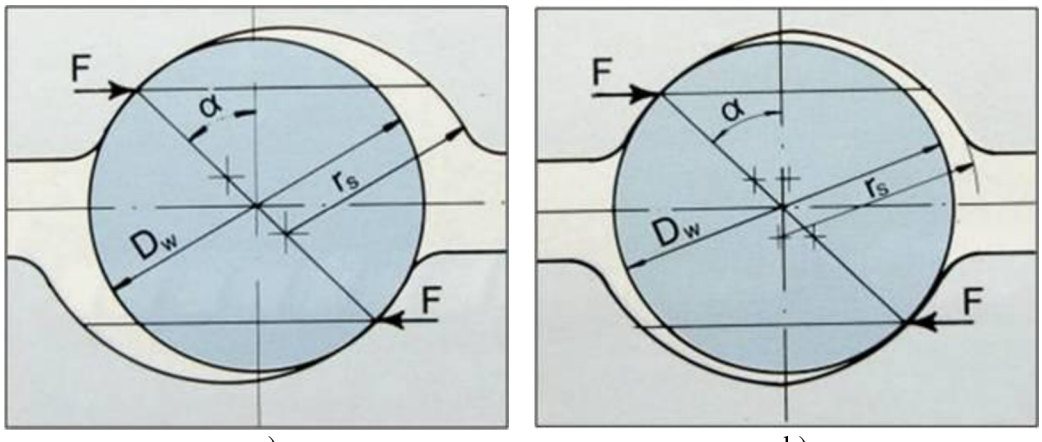
- tvářecí a obráběcí stroje,
- zdvihací zařízení,
- vstřikovací lisy,
- manipulační a automatizační technika,
- zdravotnický průmysl,
- automobilní průmysl, aj. [5].

Mezi kuličkovým šroubem, kuličkami a maticí vzniká valivé tření, které je vyvozeno odvalováním kuliček v závitovém profilu. Valivý odpor kuliček je výrazně nižší než odpor, který vzniká při tření konvenčního kluzného šroubu. Je tedy dosaženo hodnot mechanické účinnosti přes 90 % při nízkém vývinu tepla. Kuličky (obr. 2c) jsou uloženy ve valivých drahách, kde dochází při otáčení šroubu (obr. 2b) k jejich odvalování. Kuličky při odvalování mění svou polohu vůči matici (obr. 2a), až dosáhnou konce funkční dráhy v tělese matice, kde jsou pomocí deflektoru usměrněny do převáděcího kanálku v matici. Kuličky, které se pohybují ve valivé dráze, tlačí na kuličky v převáděcím kanálku a poté jsou deflektorem opět vráceny do závitu [5].




Obr. 2 Princip kuličkového šroubu [3].

Pro odvalování kuliček se využívají dvě možnosti provedení profilu valivé dráhy – gotický a kruhový (obr. 3). Nejvíce rozšířený je gotický profil. Jeho výroba je složitější než u kruhového profilu, ale má vyšší mechanickou účinnost a přesnost odměřování. U gotického profilu lze volit různé předepnutí matice, lze tedy dosáhnout i minimální vůle. Profil má v patě závitu vytvořenou drážku, ve které je shromažďováno mazivo, jenž slouží k nižšímu tření a tím i k delší životnosti šroubu. Kruhový profil je výrobně jednodušší, převod však vykazuje velké axiální vůle. Veškeré výpočty kuličkových šroubů se počítají pro úhel styku $\alpha$ mezi kuličkami a šroubem s maticí o hodnotě 45°. Při tomto úhlu styku dochází k největší mechanické účinnosti kuličkového šroubu [2].

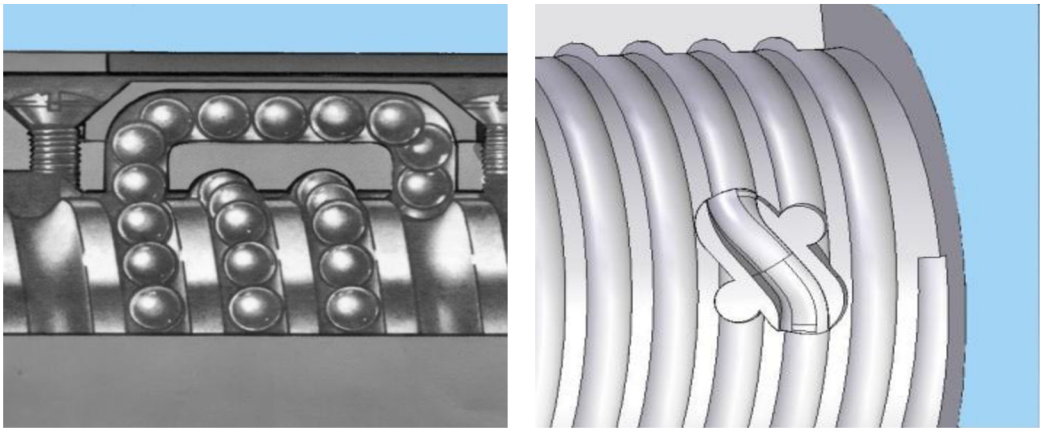



a) b)

Obr. 3 Profily valivé dráhy – a) kruhový, b) gotický [5].

Převod kuliček v kuličkovém šroubu je realizován pomocí několika způsobů. Nejčastější je externí a interní převod kuliček. Při použití externího převodu (obr. 4a) je kulička zavedena do závitové dráhy z převáděcího kanálku v matici. Na konci závitové dráhy v matici je umístěn deflektor, který kuličku plynule převede z pracovního prostoru zpět do převáděcího kanálku. Jedná se tedy o uzavřený cyklus. Převod je realizován přes několik stoupání závitu kuličkového šroubu. Externí převod je vhodný do provozů, kde se dosahuje

vysokého namáhání. V případě interního převodu (obr. 4b) je v matici umístěno převáděcí lůžko, které kuličku převádí pouze v rámci jednoho stoupání závitu kuličkového šroubu. Kuličky jsou neustále v kontaktu s povrchem hřídele a pro jeden převáděcí okruh slouží jedno převáděcí lůžko. Pro zvýšení tuhosti se využívá převáděcí pero, kde je umístěno několik převáděcích drážek v jednom tělese [5].



a) b)

Obr. 4 Převod kuliček – a) externí, b) interní [5].

Tuhost převodu lze ovlivnit předepnutím matice. Předepnutí matice je vytvoření pružné deformace v kuličkách a závitových drážkách šroubu a matice. Účelem předepnutí je eliminace axiální vůle mezi šroubem a maticí a zvýšení tuhosti soustavy. Při použití dvojité matice lze předepnutí zajistit dvěma způsoby. První je vložení distančního kroužku mezi matice a tím dosažení tlakového napětí. Lze využít i distanční kroužek, který vyvolává tlakové napětí v opačném směru, ale toto použití je vzácné u dvojic matic v pouzdrech. Tyto způsoby se využívají, je-li zapotřebí dosáhnout vysokých hodnot předepnutí (10 % dynamické únosnosti). Dalším způsobem je použití pružiny. Předepnutí lze realizovat i u jedné matice a lze je rozdělit na dva způsoby. První je nabroušení diference ve stoupání v nefunkční části závitu matice. Tohoto provedení se využívá pro kratší délky matic. Druhý způsob je použití kuliček, které jsou větší o hodnotu vyvolávající předepnutí. Užívá se pro krátké matice s nízkou mírou předepnutí a tuhosti (5 % dynamické únosnosti). V příloze 1 jsou schematické nákresy způsobů předepnutí matic a jejich vhodné použití [2].

Předepnutím matice se zvýší tuhost, ale projeví se i negativní jevy, které jsou s předepnutím spojené:

- soustava vyžaduje vyšší točivý moment (větší síla otočit šroubem),
- zvýšení tvorby tepla → větší teplotní roztažnost → vyšší nároky na přesnost polohování,
- zkrácení životnosti kuličkového šroubu [6].

Výhody kuličkových šroubů:

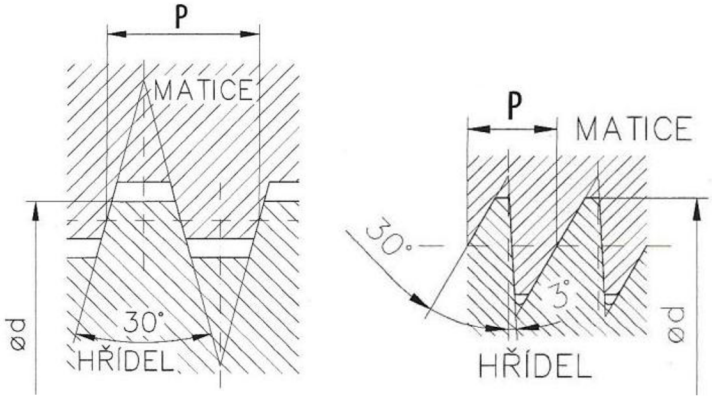
- výhodná cena,
- vysoká tuhost, nastavitelná hodnotou předepnutí,
- možnost přenosu velkých axiálních sil,
- možnost úplného odstranění vůle pro konkrétní zatížení,
- potlačení vzniku trhavých pohybů.

Nevýhody kuličkových šroubů:

- omezení rychlosti posuvu a délky zdvihu,
- tepelná roztažnost sestavy,
- nutnost mazání.

## 2.2 Kluzný pohybový šroub

Jestliže je rychlost přímočarého pohybu nízká, je vhodné jako pohybový mechanismus použít kluzný šroub. Výhodou kluzného šroubu je jeho samosvornost a nevýhody jsou velké opotřebení a malá účinnost (30 až 40 %), která je způsobena vysokým třením mezi maticí a šroubem. Šrouby musí být zatěžovány pouze v axiálním směru. Ve výrobě se nejčastěji používá lichoběžníkový závit. Lichoběžníkový závit se rozděluje na rovnoramenný – trapézový (obr. 5a) a nerovnoramenný – pilový (obr. 5b). Trapézový závit je určený pro samosvorný převod rotačního pohybu na přímočarý a jeho vrcholový úhel je 30°. Pilový závit má vrcholový úhel 30°+3° a využití najde tam, kde je požadována zvýšená zatížitelnost pouze v jednom směru [1].




Obr. 5 Lichoběžníkový závit – a) trapézový, b) pilový [5].

Vymezení vůle v kluzném pohybovém šroubu lze zajistit např. hydraulickým způsobem, kdy tlak oleje působí buď na obě části matice, které se odtlačují a vymezují vůli, nebo osově působí na ozubené kolo, které pohání obě části matice a vyvolaným osovým tlakem jsou matice přitlačovány na protilehlé boky závitů šroubu [1].

Firma Kuličkové šrouby Kuřim (dále jen KSK) vyrábí kluzné pohybové šrouby dle ČSN 01 4050 ve třech třídách přesnosti (tab. 1):

1) jemná – broušený profil závitu (brusky na závity, vyvrtávací souřadnicové stroje),
2) střední – dělící frézky, soustruhy, vodorovné zařízení,
3) hrubá – obráběcí stroje bez zvláštních požadavků na přesnost [5].

Tab. 1 Třídy přesnosti kluzných pohybových šroubů [5].

| | Třída přesnosti | | |
|---|---|---|---|
| Dovolená úchylka stoupání v délce 300 mm závitové části (mm). | 1 | 2 | 3 |
| | ± 0,012 | ± 0,052 | ± 0,081 |

## 2.3 Pastorek a hřeben

Posuvové šrouby nejsou vzhledem k vysokým otáčkám a nižší tuhosti při velké zdvihové délce vhodné pro pracovní stoly, kde je zapotřebí velkého zdvihu (vyvrtávačky, hoblovky, aj.). U těchto strojů najde uplatnění posuv přes pastorek a ozubený hřeben (obr. 6). Obecně lze říci, že tam, kde nestačí výrobní možnosti posuvového šroubu, tam se doporučuje využít pastorek a hřeben. Pastorek je poháněn servomotorem přes převodovku, díky které není potřeba vysokých otáček motoru (vyšší točivý moment a větší síla). Jelikož je tento systém nesamosvorný, je tedy nutné použít brzdy na svislé osy [2].

Obr. 6 Pastorek a ozubený hřeben [7].

Mezi pastorkem a ozubeným hřebenem vzniká vůle, je tedy nutné tuto vůli vymezit. Vymezení vůle u pohonu s jedním motorem lze zajistit pomocí tlačné pružiny. Princip spočívá v tom, že posuvná hřídel je osazena dvojicí pastorků s opačným sklonem zubů a je trvale tlačena do záběru. Místo pružiny lze využít i hydrauliku. Pro posuvy větších stolů je vhodné aplikovat systém duplexního pastorku a hřebenu. V tomto případě jsou hřebeny přesazeny o polovinu své rozteče a sklon zubů je v opačném směru. Pro pohon posuvu dvěma motory se využívá elektronické předepnutí (Master – Slave). Při nulové zátěži vyvíjí oba motory momenty stejných velikostí, ale opačného znaménka. Celkový moment je tedy roven nule. Při rozjezdu stolu se velikost momentu Master motoru začne zvyšovat. Moment závislého motoru Slave se začne také zvyšovat (klesá předpětí), dokud nedosáhne

nulové hodnoty a následně oba motory působí ve stejném smyslu. Při rychloposuvu, kdy není potřeba vytvoření předpětí, působí tedy oba motory ve stejném smyslu. Při pracovním posuvu (obrábění) je už nutné vymezit vůli pomocí předpětí [2].

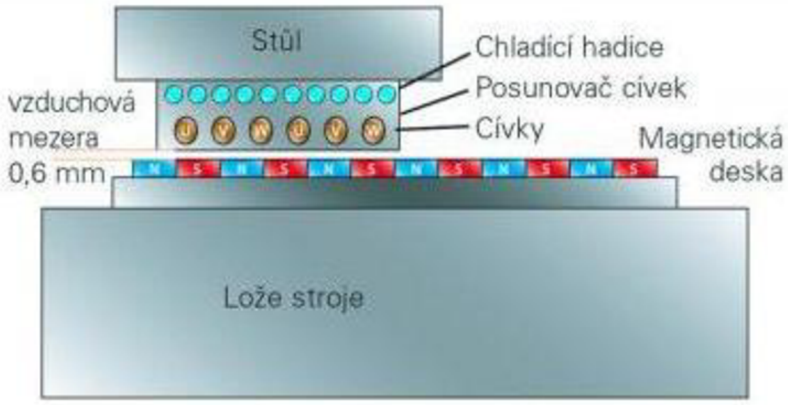
## 2.4 Šnek a šnekový hřeben

Pohon šnekem lze využívat ve dvou variantách. První varianta je umístění šnekového hřídele v loži obráběcího stroje. Šnekový hřídel se nachází po celé zdvihové délce stroje. Ke stolu stroje je připevněn šnekový hřeben a pohyb stolu probíhá přes otáčení šnekového hřídele přes něj. Tato varianta není příliš využívána. Druhá varianta pohonu je, že šnekový hřeben je umístěn po celé délce stolu a šnek je vyroben pouze na části hřídele. Mazání probíhá tak, že se šnek otáčí v olejové lázni [1].

Dnes se nejvíce používá princip hydrostatického šneku. Jeho výhody jsou minimální tření a vysoká tuhost. Nevýhodou je vysoký převod, tudíž malá posuvová rychlost. Princip hydrostatického šneku spočívá v tom, že na šnekové tyči jsou malé olejové kapsy, do nichž je přiváděn olej o vysokém tlaku a to jen do sekce kapes, které jsou v záběru se šnekem. Přebytečný olej z kapsy stéká do sběrného žlabu pod šnekem a je opět využit. Pohon šneku je skrz ozubený pastorek na hnací hřídeli, který je napřímo spojen s pohonným motorem [2].

## 2.5 Lineární motor

Lineární motory jsou elektromotory, které jsou konstrukčně uzpůsobeny tak, že nemají žádný mechanický převod. Princip lineárního motoru je stejný jako u obyčejného servomotoru, jen statorová část je rozvinutá do roviny. Stator je označen jako primární část a rotor jako sekundární část. Primární část je stejně jako u servomotoru tvořena feromagnetickým svazkem tvořeným z plechů a trojfázového vinutí, které je uložené v drážkách. Sekundární část je tvořená z permanentních magnetů (střídavě je vložen severní a jižní pól), jenž jsou připevněny na ocelové podložce a zalité pryskyřicí. Uspořádání lineárního pohonu lze vidět na obr. 7. Přivedením proudu na primární část vznikne magnetické pole a dojde k pohybu primární části. Velikostí proudu lze ovládat rychlost pohybu [9, 10].




Obr. 7 Uspořádání lineárního pohonu [8].

Lineární motory jsou využívány tam, kde není zapotřebí velké síly, ale vysokých pohybových rychlostí (vysokorychlostní obrábění, svařování, laserové obrábění, atd.). Je-li zapotřebí větší posuvová síla, tak se motory zdvojují. Mezi jejich přednosti patří teoreticky nekonečná délka (magnetická dráha je libovolně stavitelná), vysoká přesnost polohy (přesnost polohy není ovlivněna tepelnou roztažností jako u kuličkových šroubů) a výborné dynamické možnosti. Nevýhodou lineárních motorů je působení magnetického pole na řídicí elektroniku a třísky. Proto je nutné zajistit důkladné odstínění řídicí elektroniky a kvalitní odvod třísek [9, 10].

Výhody lineárních motorů:

- výborné dynamické vlastnosti (až 10 m/s a 5G),
- neomezená pracovní délka,
- přesnost polohování (rozlišení polohy až 0,001 mm, opakovatelnost polohy až 0,003 mm),
- nevzniká tření – není nutné mazání, zanedbatelné opotřebení funkčních částí,
- bez mechanických vůlí.

Nevýhody lineárních motorů:

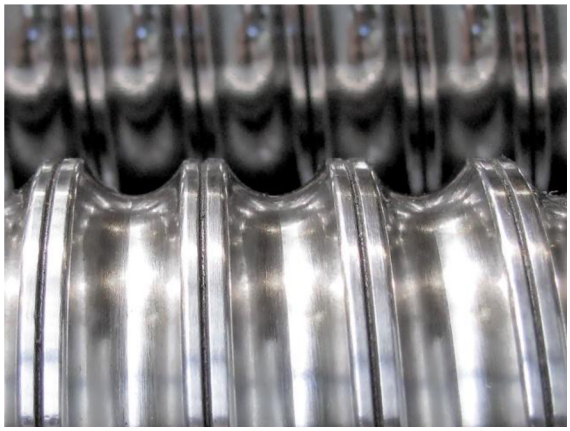
- vznik magnetického pole (nutné odstínění magnetického pole od řídicí elektroniky a kvalitní odvod třísek),
- menší posuvová síla,
- nízké zatížení (vhodné pro HSC obrábění, svařování, laserové obrábění, atd.),
- cena,
- nejsou vhodné pro vertikální osy.

# 3 TECHNOLOGIE VÝROBY KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ

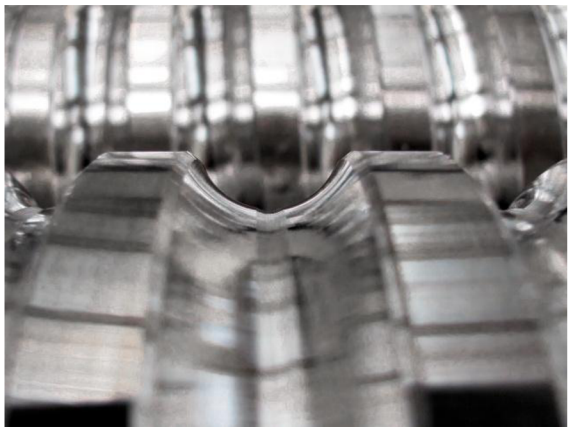
Profil valivé dráhy u kuličkového šroubu (dále jen KŠ) se obvykle vyrábí válcováním, broušením nebo okružováním. Každou technologií je dosaženo jiných výsledků, zejména co se týká kvality povrchu a ekonomické náročnosti výroby. Proto záleží na konečném užití KŠ a dle tohoto aspektu se následně volí technologie výroby. KŠ je vlastně závitový profil navinut na válcové části, proto budou v této kapitole popsány technologie výroby závitů se zaměřením na způsoby výroby KŠ. V tab. 2 jsou uvedeny parametry výroby KŠ pro tyto tři základní způsoby výroby. Na obr. 8 jsou zobrazeny rozdíly ve tvaru profilu závitu.

Tab. 2 Technologie výroby KŠ [5].

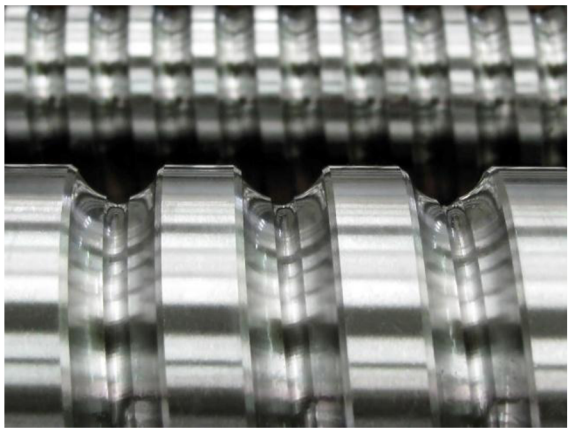
| Technologie výroby | Průměr šroubu [mm] | Délka šroubu [mm] | Maximální průměr kuličky [mm] | Drsnost povrchu Ra [μm] | Třída přesnosti IT, běžná |
|---|---|---|---|---|---|
| Válcování | 6 – 80 | 6000 | 7,938 | 0,8 | 7 |
| Okružování | 12 – 160 | 12000 | 12,7 | 0,8 | 5 |
| Broušení | 6 – 200 | 12000 | 25,4 | 0,4 | 1 |



a)



b)



c)

Obr. 8 Profily závitu KŠ – a) válcovaný profil, b) okružovaný profil, c) broušený profil [5].

KŠ společnosti KSK jsou nabízeny v několika třídách přesnosti (viz. tab. 3). Úchylky stoupání závitu odpovídají normám DIN ISO 3408. Úchylky okružovaných a válcovaných KŠ tříd T5 a T7 jsou posuzovány dle normy DIN ISO 3408–3 pro transportní KŠ [5].

Tab. 3 Třídy přesnosti závitu [5].

| Úchylka stoupání na délce závitu 300 mm [mm] | Broušený závit | | | Okružovaný závit | | | Válcovaný závit | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | IT1 | IT3 | IT5 | IT5 | T5 | T7 | T5 | T7 |
| | 0,006 | 0,012 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,052 | 0,023 | 0,052 |

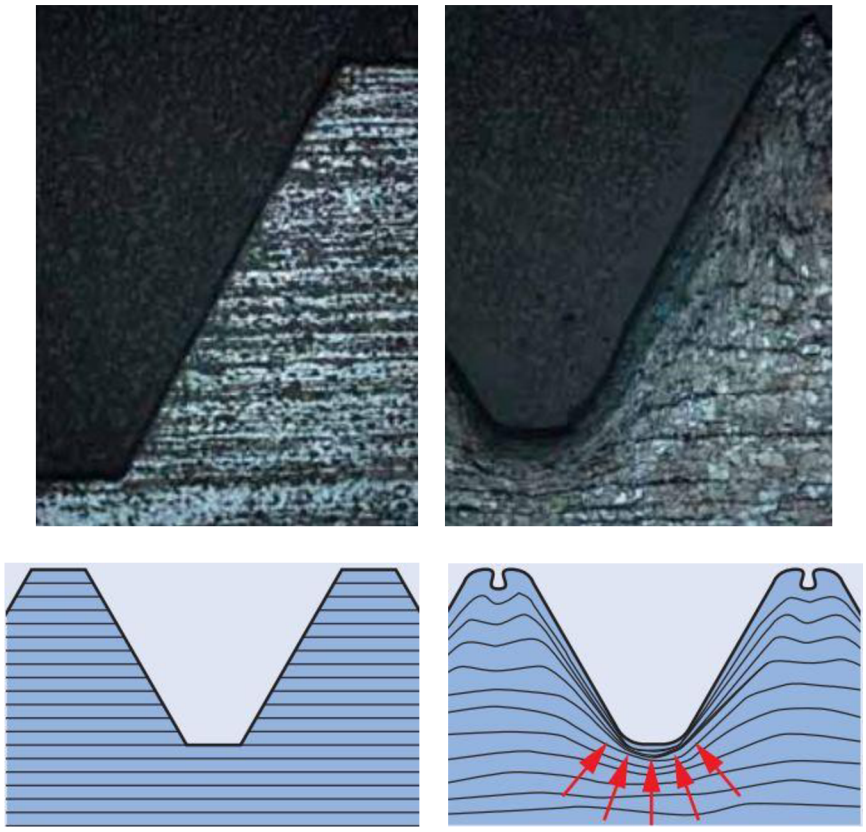
## 3.1 Tváření

Vysoce produktivní výroba závitu KŠ je metodou válcováním, při které nedochází k úběru materiálu ve formě třísky, ale pouze k plastické deformaci. Vlivem plastické deformace dochází ke zpevňování materiálu a na rozdíl od výroby závitu obráběním nedochází k přerušení vláken materiálu. Tvářené závity spojovacích šroubů jsou tedy schopny přenášet větší silové zatížení, ale jejich nevýhoda je skutečnost, že výrobou dojde ke zhoršení tvarové přesnosti, především v nefunkční části hřbetu profilu závitu. Porovnání tvářeného a řezaného závitu je v tab. 4 a na obr. 9 [5, 25].

Základ válcování závitů spočívá ve vytlačování závitu na hřídeli pomocí kotoučových čelistí, které mají tvar profilu vyráběného závitu. Tyto čelisti mají opačný tvar profilu, než je výsledný profil závitu. Výroba probíhá za studena a za působení vysokého tlaku. Čelisti vnikají do válcového polotovaru a materiál je radiálně vytlačován směrem od kořene závitu až po hřeben závitu. Vnikáním válcovacích čelistí do materiálu dochází ke zvětšení výchozího průměru polotovaru, hodnota průměru musí být tedy menší, než je jmenovitý vnější průměr válcovaného závitu. Výsledná přesnost závitu je ovlivněna zejména podmínkami řízeného válcování a kvalitou hutního polotovaru. V KŠ také vlivem válcování a tepelným zpracováním vzniká značné vnitřní pnutí, které se projevuje geometrickou nepřesností spojenou s deformací osy hřídele a zvýšenou úrovní hluku a vibrací při odvalování kuliček, zejména při vysokých rychlostech [5, 25, 27].

Tab. 4 Porovnání řezaného a tvářeného závitu [26].

| Řezaný závit | Tvářený závit |
|---|---|
| **Pevnost**<br>Nižší, jelikož vlákna materiálu jsou přerušena. | **Pevnost**<br>Vyšší, vlákna nejsou tvářením přerušena a deformací dochází k jejich zpevnění. |
| **Výrobní čas**<br>3 až 40 m/min<br>Hluboké závity se musí řezat několika kroky.<br>Vysoký výrobní čas, nižší přípravný čas. | **Výrobní čas**<br>30 až 100 m/min<br>Závit se tváří v jediném kroku.<br>Krátký výrobní čas, vysoký přípravný čas. |
| **Náklady na nástroje**<br>Velmi nízké. | **Náklady na nástroje**<br>Velmi vysoké, ale jsou kompenzovány životností nástroje. |
| **Příprava polotovaru**<br>Závit je vyřezán do polotovaru, aniž by došlo ke změně jeho velikosti. | **Příprava polotovaru**<br>Tvářením dochází ke zvětšení polotovaru, proto je nutné volit polotovar o menším průměru než je jmenovitý vnější průměr závitu. |



Obr. 9 Řezaný a tvářený závit [24].

Materiál, který vykazuje velmi dobré vlastnosti pro válcované šrouby, jsou oceli, jejíž mez pevnosti se pohybuje okolo 800 MPa a tažnost je nejméně 7 %. Pro výrobu lichoběžníkových závitů jsou vhodné oceli, které mají tažnost alespoň 12 %. Pokud se tažnost u oceli pohybuje okolo 10 % je možné bez problémů válcovat i oceli o mezi pevnosti okolo 1000 MPa. Mezi nevhodné materiály pro válcování závitů patří vysocelegované oceli s vysokou pevností a nízkou tažností. Protože válcování probíhá za vysoké rychlosti a velkého tlaku mezi nástrojem a součástí, je nutné použít dostatečné chlazení a mazání. Důležité je dbát na čistotu chladiva, protože jakákoliv nečistota by mohla porušit tvářecí nástroj [26].

Výhody válcovaných závitů:

- zvýšení pevnostních vlastností,
- snížená vrubová citlivost,
- nepřerušená vlákna materiálu,
- úspora materiálu,
- rychlá a ekonomicky výhodná výroba.

Pro výrobu vnějších závitů válcováním se používají tyto nástroje:

- válcovací kotouče,
- válcovací hlavy.

Válcovací kotouče se dělí na dva základní druhy – radiální (zapichovací) a axiální (průběžné). Radiálním způsobem se válcují krátké závity při jedné otáčce bez axiálního posuvu. Axiální způsob je využíván při válcování dlouhých závitů při postupném axiálním posuvu. Válcovací kotouče pracují vždy v páru a jejich provedení s rozměry určuje řada faktorů – způsob válcování, válcovací stroj, typ, délka a rozměr válcovaného závitu. Příklad využití válcovacích kotoučů je zobrazen na obr. 10.

Obr. 10 Válcovací kotouče [29].

Válcovací hlavy jsou vysoce produktivní nástroje určené pro výrobu vnějších závitů válcováním axiálním způsobem. Teoreticky umožňují válcovat nekonečně dlouhý závit. Hlavy obsahují tři válcovací kotouče, které jsou uloženy na excentrických čepech. Otevírání válcovacích kotoučů zajišťuje pružina. Jsou konstruovány jako stojící, mechanicky natahovací, se samočinným otevřením hlavy při ukončení válcování. Válcovací hlavy jsou vyráběny ve dvou provedeních. První provedení je pevné s pevně nastavitelným sklonem závitových kotoučů. Touto pevnou hlavou lze válcovat pouze špičaté závity – metrický, whitwhortův anebo palcový. Druhé provedení je univerzální. Toto univerzální provedení umožňuje měnit sklon závitových kotoučů v rozsahu +5 až –5° dle úhlu stoupání šroubovice závitu a lze jím válcovat špičaté závity i závity trapézové a oblé. Hlavy lze upínat na obráběcí stroj pomocí válcové stopky do nástrojové hlavy stroje, pomocí držáku do nožové hlavy nebo speciálním držákem [28].

Firma KSK kuličkové šrouby neválcuje, pouze nakoupí vyválcovaný polotovar, který je následně zakalen a poté leštěn.

## 3.2 Frézování

Frézování je obráběcí metoda, při které dochází k odběru materiálu břity otáčejícího se nástroje. Při frézování dochází k přerušovanému řezu, protože každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky. Mezi výhody frézování závitů patří především velká univerzálnost této metody. Jedním nástrojem lze vyrobit různé rozměry závitů, jednochodé a vícechodé závity, pravotočivé i levotočivé. Při frézování není příliš namáhána pohonná soustava stroje, protože i pro závitování velkých rozměrů postačí nízký krouticí moment. Frézované závity mají velmi dobrý povrch profilu závitu. Mezi nevýhody patří zejména to, že je nezbytný CNC obráběcí stroj a programování závitování je složitější. V případě hromadné výroby vychází frézování závitů často méně hospodárně než soustružení nebo tváření závitů [25].

Závitové frézy jsou nejčastěji typu:

- kotoučové závitové frézy,
- hřebenové válcové závitové frézy,
- stopkové frézy s VBD,
- okružovací frézovací hlavy.

Závitové kotoučové frézy patří mezi jednoprofilové nástroje, které slouží především pro frézování dlouhých závitů (např. pohybové šrouby s lichoběžníkovým závitem). Jsou buď symetrické, nebo nesymetrické. Vyrábějí se s rovnými zuby a nejsou podtáčené. Fréza má profil závitové mezery a při frézování je osa frézy nakloněna vůči ose šroubu o úhel stoupání závitu. Během jedné otáčky obrobku se obrobek nebo fréza posune o délku stoupání závitu. Frézování dlouhých závitů probíhá na speciálních frézovacích strojích, kratší závity lze frézovat i na univerzálních konzolových frézkách s dělícím přístrojem nebo na CNC frézkách. Závitové kotoučové frézy se používají pouze pro hrubování povrchu profilu šroubu a nejčastěji jsou vyrobeny z rychlořezné oceli [30].

Hřebenové válcové závitové frézy jsou vhodné pro sériovou výrobu krátkých závitů. Lze je rozdělit dle systému upínání – stopkové (obr. 11a) a nástrčné (obr. 11b). Nástrčné frézy jsou vyráběny většinou z rychlořezných ocelí a stopkové jsou monolitní, z povlakovaných nebo nepovlakovaných slinutých karbidů. Jejich profil se skládá ze soustavy drážek shodných s profilem závitu. Drážky jsou na těle frézy uloženy vedle sebe bez stoupání. Další drážky vytvářejí zubové mezery, které jsou určené k obvodu třísek z místa řezu, určují geometrii břitu a jsou buď rovnoběžné s osou frézy, nebo jsou ve šroubovici se sklonem 15 až 50°. Zubové mezery jsou vytvořeny tak, aby bylo možné na čele udělat několik přeostření po jejich otupení. Hřebenové frézy jsou vyráběny s podbroušeným profilem. Úhel podbroušení je nutné volit tak, aby při podbroušení nedošlo k poškození následujícího zubu. Při výrobě závitu vykonává hlavní pohyb nástroj. Obrobek se otáčí kolem své osy a současně posouvá ve směru osy tak, aby při jedné otáčce došlo k posunu o jednu rozteč závitu. Závit je vyříznut na 1,25 až 1,5 otáčky obrobku [25, 30].

a) b)

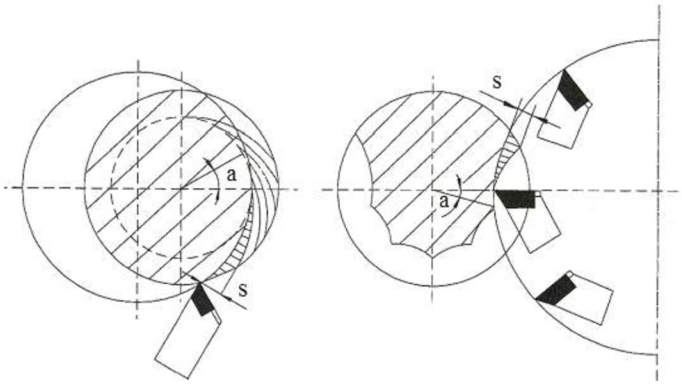
Obr. 11 Hřebenové válcové závitové frézy – a) stopkové, b) nástrčné [31].

Stopkové frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) (obr. 12) jsou moderní závitové frézy, které umožňují produktivním způsobem frézovat vnější i vnitřní závity. VBD jsou z povlakovaného nebo nepovlakovaného slinutého karbidu. Při řezání závitu fréza provádí rotační planetový pohyb (rotuje kolem své osy a současně kolem osy závitu) a zároveň se relativně posouvá o jedno stoupání závitu vzhledem k ose obrobku. Při řezání delšího závitu se tento krok operace opakuje s osovým posunutím o odpovídající délku závitu (záleží na délce břitové destičky). Závitovou frézou s VBD lze vyrábět závity různých průměrů a délek, omezující činitel je pouze stoupání závitu. Je také nutné použít CNC obráběcí stroj, který umožňuje kruhovou interpolaci [25].

Obr. 12 Stopková fréza s VBD [31].

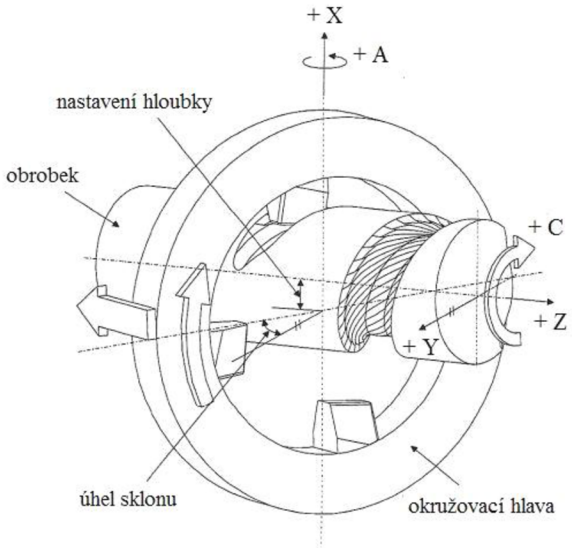
Dalším způsobem výroby závitů je rotační okružování. Tato metoda je aplikována především při obrábění pohybových šroubů. Podle použitého typu nástroje a přerušovaného řezu je tato metoda klasifikována jako speciální typ frézování. Rozdíl je v tom, že při obrábění vnějších závitů soustružením nebo konvenčním frézováním jsou nože umístěny na vnější straně nástroje, při okružování jsou nože umístěny na vnitřní straně nástroje. Lze tedy okružování označit jako frézování s frézami s vnitřním ozubením. Při srovnání tvorby třísky u okružování a frézování (obr. 13), jejichž pohyby jsou podobné, lze vidět, že vznikající třísky mají rozdílnou délku. U okružování jsou parametry řezného procesu a průběhy řezné síly u stejného úhlu posuvu ($a$) výhodnější, takže je přípustné obrábět s vyšší řeznou a posuvovou rychlostí než u frézování. Při okružování je utvářená tříska delší, ale s menší tloušťkou, než při frézování. U stejného vnějšího průměru obrobku a za stejných řezných podmínek mají třísky u okružování a frézování stejnou plochu. Přitom je tříska dosažená z okružování delší a má menší maximální tloušťku ($s$), takže na obrobek působí podstatně menší řezné síly a menší elastické deformace. Pokud je

maximální tloušťka třísky stejná, dosáhne se okružováním kratší doby obrábění, jelikož v porovnání s frézováním se při řezu odstraní více materiálu. U konstantního úhlu posuvu dochází při okružování k podstatně menším úchylkám od ideálního tvaru povrchu než při frézování, případně je možný u okružování větší úhel posuvu, aniž by došlo k výraznému zhoršení kvality povrchu [32].




Obr. 13 Tvorba třísky – okružování a frézování [5].

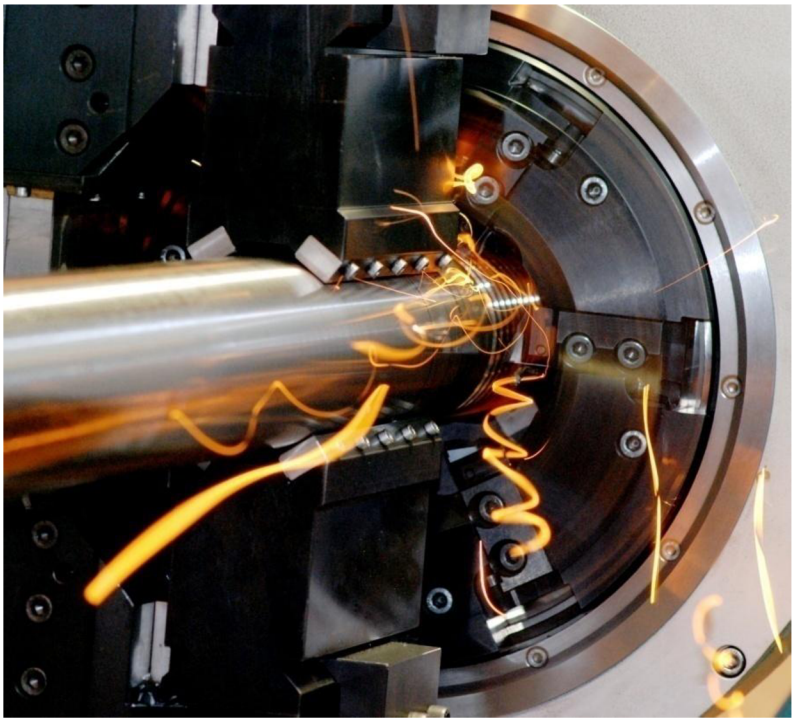
Okružovací hlava je vybavena několika vložkami. Tyto vložky musí umožňovat úpravy úhlů nožů a také snést vysokorychlostní soustředné otáčení kolem obrobku. Princip okružovaní (obr. 14) spočívá v tom, že okružovací hlava, která je skloněna k ose obrobku o úhel stoupání šroubovice závitu se excentricky otáčí vysokou rychlostí kolem osy obráběného šroubu, který se pomalu otáčí kolem své osy. Excentricitu okružovací hlavy určuje hloubka řezu. Podle toho, zda je požadován pravý nebo levý závit, rotuje okružovací hlava doprava nebo doleva. V každém případě se okružovací hlava otáčí ve stejném smyslu jako obrobek, jen se mění směr posuvu. Řezné podmínky jsou podobné souslednému frézování. Maximální tloušťka třísky je odebírána při vstupu do záběru. Pokud by otáčky obrobku a okružovací hlavy byly opačné, byla by při vstupu do záběru odebírána nejprve minimální tloušťka třísky, následně by docházelo k vysokému tření, které by vedlo ke zvýšení teploty a degradaci povrchu [33, 34].




Obr. 14 Princip rotačního okružování [5].

Významnou výhodou výroby KŠ pomocí okružování je to, že není nutné použít chladicí kapalinu, čímž se šetří náklady na údržbu chladicího systému a ekologickou likvidaci chladiva. V prostorách okružovací hlavy je umístěna tryska vysokotlakého vzduchu pro odstranění třísek z místa řezu. Během okružování dochází k nárůstu teploty o cca 20 až 25 °C nad okolní teplotu. Vlivem krátké doby kontaktu mezi nástrojem a obrobkem je většina tepla, které vzniklo působením řezných sil a třením odvedeno třískou. Vzhledem k tomu, že okružování se provádí od koníka ke sklíčidlu, jakékoliv rozměrové změny vlivem nárůstu teploty probíhají pouze za místem řezu. Další výhodou této metody je dosažení vynikající kvality povrchu. Dosažená drsnot povrchu Ra 0,8 μm není nic neobvyklého. Následné drahé broušení, kdy docházelo k úběru materiálu v hodnotách několika setin mm, již tedy není v některých případech vůbec nutné. Díky tomu je výroba rychlejší a ekonomicky efektivnější [33].

Na obr. 15 je zobrazena výroba KŠ rotačním okružováním.



Obr. 15 Rotační okružování [33].

Výhody rotačního okružování:

- zvýšení produktivity,
- snížení nákladů,
- životnost nástroje,
- vysoká kvalita povrchu,
- možnost obrábět hluboké závity.

Pro okružování KŠ firma KSK vlastní okružovačku Leistritz PW 160.1.4000 (obr. 16) od firmy Leistritz. Jedná se o německou firmu se sídlem v Norimberku. Okružovačky jsou speciální stroje pro obrábění vnějších závitů, z konstrukčního hlediska jsou více podobné

soustruhům než frézkám, protože pracovní lože je v horizontální poloze. Vřeteník je osazen okružovací hlavou s upnutými noži. Napravo od pracovního vřeteníku je umístěn koník, který spolu s posuvnými lunetami zajišťuje podepření dlouhých obrobků. Na levé straně je umístěno hnací vřeteno, které zajišťuje rotaci obrobku [5].

Obr. 16 Okružovačka Leistritz PW 160.1.4000 [5].

### 3.3 Broušení

Broušení patří mezi abrazivní metody obrábění, které jsou charakterizovány použitím nástroje s nedefinovanou geometrií břitu. Abrazivních metod se využívá při obrábění součástí, u kterých jsou vyžadovány vysoké požadavky na přesnost rozměrů, tvarů a jakost povrchu. Broušení lze definovat jako obrábění mnohabřitým nástrojem, který je tvořen zrny brusiva spojenými pojivem. Broušení je charakteristicky podobné ostatním obráběcím procesům a zvláště je blízké frézování. Při broušení však dochází ke kvantitativním a kvalitativním odlišnostem, které souvisí s vlastnostmi brousicího kotouče a řeznými podmínkami. Od frézování se broušení liší především různorodostí geometrického tvaru brusných zrn a jejich nepravidelným umístěním na ploše brousicího kotouče. Mezi hlavní znaky broušení patří:

- různé geometrické formy zrn a nepravidelnosti jejich rozmístění mají za následek nepravidelný úběr třísky. Tato charakteristika se projevuje při vyjiskřování, kdy brousicí kotouč při opakovaném posuvu obrobku odebírá malé množství materiálu i přesto, že hodnota pracovního záběru ostří je stále stejná.
- Úhel čela zrn se mění a často je záporný. Touto vlastností je ovlivněna oblast primární plastické deformace a tření.
- Při broušení jsou zrna schopna přenášet pouze malé řezné síly a dochází k jejich uvolňování z brousicího nástroje – samoostření.

- Třísky mají malý průřez ($10^{-3}$ až $10^{-5}$ $mm^2$). Podobně jako u frézování se jedná o přerušovaný řez s proměnným průřezem třísky. Důsledkem velkých plastických deformací dochází k velkému ohřevu třísek a ty se pak mohou roztavit a vytvořit kapky kovu.
- S malým průřezem třísky souvisí velké měrné řezné síly. Řádově se jedná až o několik desítek tisíc MPa.
- Vysoké řezné rychlosti (50 až 150 $m \cdot s^{-1}$). Z vysoké řezné rychlosti vyplývá krátká doba záběru mezi obrobkem a zrny brusného nástroje.
- Nutné značné chlazení. Při broušení vzniká velké množství tepla, které má za následek vznik tahových napětí [35, 36].

Broušení lze provádět různými metodami. Dělí se dle tvaru obráběného povrchu, dle aktivní části brousicího kotouče, atd.

Podle tvaru obráběného povrchu:
- rovinné broušení,
- broušení do kulata,
- tvarovací broušení,
- kopírovací broušení,
- broušení tvarovými brousicími kotouči.

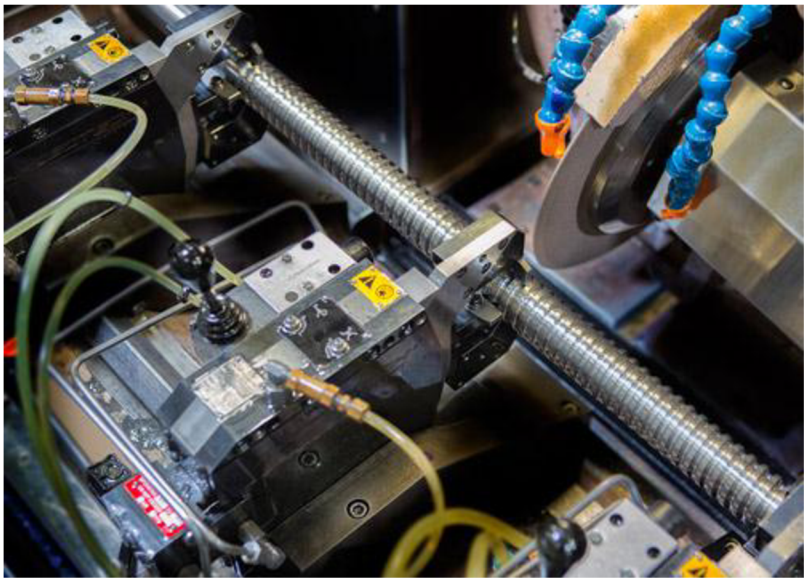
Podle aktivní části brousicího nástroje:
- obvodové broušení,
- čelní broušení.

Podle vzájemné polohy brousicího kotouče a obrobku:
- vnější broušení,
- vnitřní broušení.

Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousicímu nástroji:
- axiální broušení,
- tangenciální broušení,
- radiální broušení,
- obvodové zapichovací broušení,
- čelní zapichovací broušení [36].

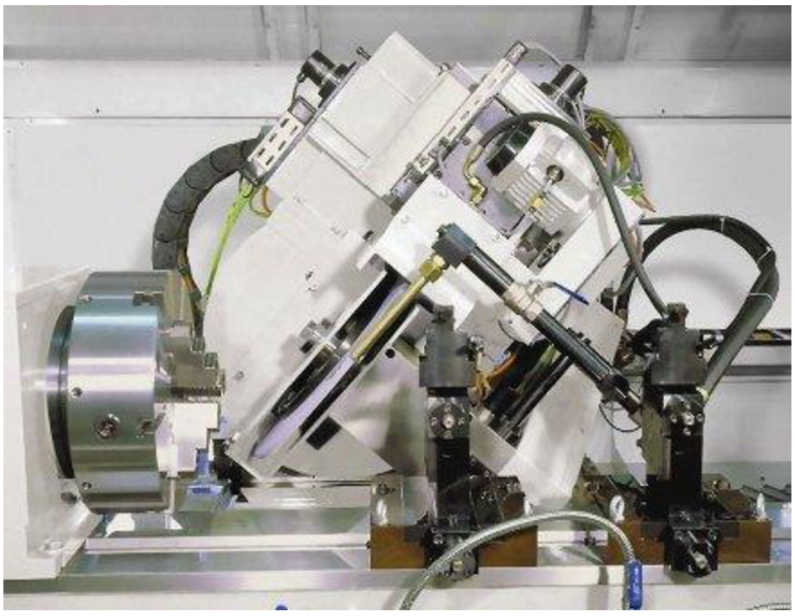
Broušení KŠ (obr. 17) probíhá obvykle do předem vyhrubovaného polotovaru. Hrubování se provádí nejčastěji technologií okružování. Po hrubování je hřídel KŠ povrchově zakalena a to na tvrdost 60 ± 2 HRC. Pro kalení se využívá indukční povrchové kalení anebo kalení laserem. Šrouby, které mají malý rozměr stoupání a malou hloubku závitu se nehrubují, ale pouze zakalí a následně brousí. Výsledná přesnost broušeného povrchu závisí především na přesnosti stroje a kvalitě použitých brusných nástrojů. Nejčastěji se broušením vyrábí KŠ ve třídách přesnosti IT1 a IT3. Výhodou broušených KŠ je velmi dobré rozložení tvaru zakalené vrstvy kolem profilu závitu, vysoká přesnost závitu a vysoká životnost. Nevýhodou je ekonomicky náročná výroba. Z důvodu odebírání třísek

velmi malých průřezů patří broušení mezi časově náročné operace, pro které je nezbytné použít velké množství chladiva, jenž je nutné následně ekologicky recyklovat [5].



Obr. 17 Broušení KŠ [41].

Broušení KŠ ve firmě KSK probíhá především na bruskách od firmy Doimak. Jedná se o španělskou firmu, která se specializuje na výrobu přesných závitových CNC brusek. Na rozdíl od klasické brusky má závitová bruska naklápěcí vřeteník (obr. 18), který je schopen na základě stoupání závitu měnit úhel nastavení brusného kotouče. Pro broušení hřídelů KŠ byla pořízena bruska Doimak RER–5000 SP. Tato bruska má unikátní funkci napojování broušených částí vícechodých závitů. Pro broušení matic je využívaná CNC bruska Doimak RIR+RE 500. Umožňuje broušení vnitřních i vnějších ploch a profilů různých typů matic a to do jmenovitého průměru 160 mm při stoupání závitu 50 mm a velikosti kuliček až do průměru 25,4 mm [5].



Obr. 18 Naklápěcí vřeteník závitové brusky [40].

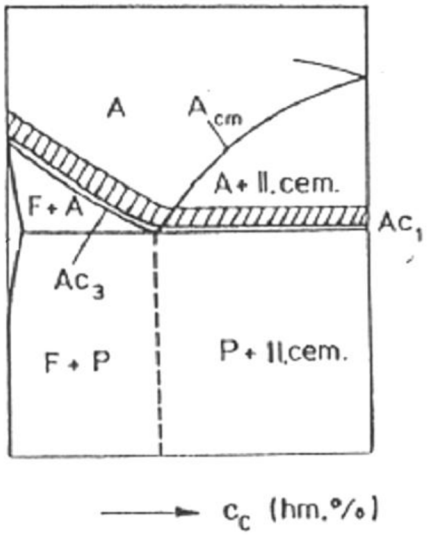
# 4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ

Hlavním účelem tepelného zpracování je dosažení potřebných mechanických vlastností materiálu. Princip veškerého tepelného zpracování je téměř identický. Součást je zahřátá na požadovanou teplotu. Na této teplotě setrvá určitou časovou prodlevu a následně je opět ochlazena. Rychlost ohřevu, doba setrvání na teplotě a rychlost ochlazení se liší u jednotlivých způsobů tepelného zpracování. Z hlediska teploty ohřevu se tepelné zpracování dělí: s překrystalizací, bez překrystalizace. U tepelného zpracování bez překrystalizace je výsledná struktura ferit a perlit. Při tepelném zpracování s překrystalizací je dosaženo austenitické struktury [11].

Základní proces všech metod tepelného zpracování s překrystalizací je austenitizace, tj. ohřev nad kritickou teplotu a následné prudké ochlazení, čímž dojde k přeměně feriticko – cementitické struktury na strukturu austenitickou. Jedná se o difuzní přeměnu, která probíhá tvorbou zárodků a jejich růstem. Klesne-li teplota oceli pod kritické teploty $A_1$ a $A_3$ dojde k přeměně austenitu na výslednou strukturu. Jelikož u KŠ je vyžadován tvrdý a odolný povrch a zároveň houževnaté jádro, zařazuje se do výroby jako tepelné zpracování kalení [11].

## 4.1 Kalení

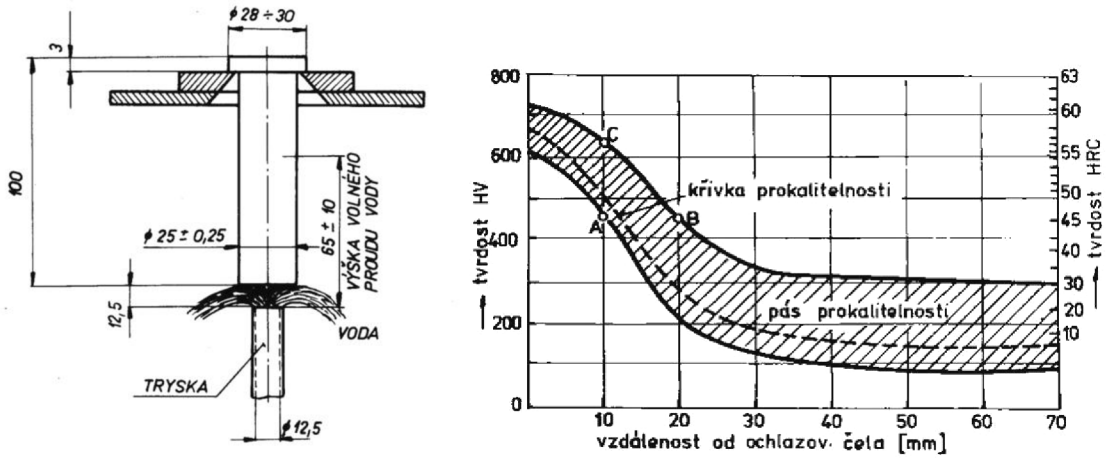
Kalení znamená zvýšení tvrdosti oceli, tj. dosáhnutí tvrdé martenzitické nebo bainitické struktury. Součást je zahřátá na teplotu vyšší o 30 až 50 °C než je teplota $A_{c3}$ u podeutektoidních ocelí, popř. teplota $A_{c1}$ u ocelí nadeutektoidních. Po časové výdrži na této teplotě dojde k ochlazení kritickou rychlostí, při které se potlačí vznik feritu a perlitu a vznikne nestabilní martenzit. Při teplotách pod 500 °C se nestabilní martenzit přemění na martenzit nebo bainit. U nadeutektoidních ocelí se neprovádí ohřev nad teploty $A_{cm}$, protože při ochlazování z této teploty by vzniklo velké množství zbytkového austenitu, který způsobuje strukturu o nižší tvrdosti. Rozsah kalících teplot je zobrazen na obr. 19 [11, 13].




Obr. 19 Rozsah kalicích teplot [11].

Schopnost oceli získat martenzitickou strukturu se nazývá kalitelnost. Tvrdost oceli po kalení je závislá především na obsahu uhlíku. Kalitelné jsou oceli s obsahem alespoň 0,3 % uhlíku. U oceli s menším obsahem uhlíku se vytvoří pouze malé množství martenzitu, jenž na výslednou tvrdost nemá významný vliv. Z tohoto důvodu jsou oceli s obsahem uhlíku nižším než 0,2 % označovány za nekalitelné. Největší tvrdost martenzitu, které je možné kalením dosáhnout je zhruba 66 HRC [11].

Dalším pojmem je prokalitelnost. Prokalitelnost je schopnost oceli získat po zakalení tvrdost odpovídající její zakalitelnosti (nebo smluvní hodnotě z ní odvozené) v určité hloubce pod povrchem kaleného předmětu. Za prokalitelnou se obvykle považuje vrstva, která dosáhne tvrdosti odpovídající struktuře s 50 % martenzitu. Prokalitelnost je závislá na tvaru ARA diagramu (diagram anizotermického rozpadu austenitu). Čím jsou křivky $P_S$ (perlit start) a $B_S$ (bainit start) více vpravo, tím větší hloubky zakalené vrstvy je dosaženo při stejné rychlosti ochlazování. Toho lze dosáhnout tím, že rychlost ochlazování na povrchu předmětu je dána prostředím, ve kterém je kalen (schopnost prostředí odvádět teplo). Rychlost ochlazování uvnitř průřezu předmětu je dána pouze tepelnou vodivostí kaleného materiálu a rozdílem teplot mezi povrchem a jádrem předmětu. Legující prvky u legovaných ocelí mají velký vliv na tvar ARA diagramu. Všechny prvky, které jsou rozpustné v austenitu, zpomalují jeho rozpad a posunují křivky $P_S$ a $B_S$ k delším časům. Tímto dojde ke snížení kritické rychlosti ochlazování. Na prokalitelnost má podstatný vliv také velikost austenitického zrna. Platí rovnice, čím jemnější zrno, tím vyšší kritická rychlost, a naopak. Prokalitelnost materiálu se určuje zkouškou prokalitelnosti oceli (ČSN 42 0447 Jominyho zkouška), viz obr. 20a. Jominyho zkouška funguje na principu, kdy se zkoušený materiál opracuje na válec o stanovených rozměrech, následně se ohřeje na austenitizační teplotu, na které je ponechám po dobu 30 minut. Po ohřevu se vzorek přenese do kalícího přípravku, kde se ochladí proudem vody na čele až do vychladnutí. Po ochlazení se na válcové části vybrousí po celé délce dvě protilehlé plochy, každá do hloubky 0,4 až 0,5 mm, na kterých se změří tvrdost HRC ve vzdálenostech 1,5, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 mm a následně po 5 mm od čela válce. Výsledky tvrdosti se zanesou do pásu prokalitelnosti (obr. 20b) a jejich spojením lze získat křivku prokalitelnosti. Zkoušku je nutné několikrát opakovat, kvůli různorodosti tavby materiálu a zjištěné maximální a minimální hodnoty následně udávají pás prokalitelnosti [4, 11, 12, 13].




a) b)

Obr. 20 Zkouška prokalitelnosti oceli – a) schéma zkoušky, b) vyhodnocení [12].

Kalicí prostředí určuje rychlost ochlazování materiálu. Optimální kalicí prostředí je takové, které umožní rychlost ochlazování jen o málo větší než je rychlost kritická. Nadměrné ochlazování vede ke zvětšení vnitřních napětí. Ideální ochlazovací prostředí by mělo mít vysokou ochlazovací účinnost v oblasti perlitické přeměny (550 až 650 °C) a naopak malou v oblasti martenzitické přeměny (250 až 350 °C). Ochlazovací účinnost závisí zejména na tepelné vodivosti, měrném a výparném teple a na viskozitě. Jako ochlazovací prostředí se používá voda, olej, vzduch a solné lázně [11].

Ochlazování ve vodě je nejběžnější, protože je levné a nenáročné. Jelikož při ochlazování vodou vzniká parní polštář, musí se narušit pohybem kaleného předmětu anebo prostředí. Ochlazování vodou není plynulé. V prvním stádiu, kdy vzniká parní polštář, je ochlazování pomalé. Po ochlazení zhruba na teplotu 400 °C dojde k odstranění parního polštáře a nastane prudké ochlazení vlivem varu vody. Ve třetím stádiu rychlost ochlazování klesá. Pro zvýšení účinnosti se do vody přidávají soli a také přísady na bázi vodě rozpustných polymerů. Přísady polymerů zpomalí rychlý a nerovnoměrný ochlazovací účinek vody, čímž se odstraní defekty typu měkká místa, deformace a trhliny. Účinné je také využití vodní sprchy [11, 13].

Ve srovnání s vodou mají oleje 3x až 4x menší rychlost ochlazování v perlitické oblasti a až 10x menší v martenzitické oblasti. Jejich ochlazovací účinek se nemění s teplotou, a proto se do oleje kalí především legované oceli. Jejich výhodou jsou malá vnitřní napětí a nevýhody spočívají v nebezpečí vznícení a v náročné ekologické likvidaci. Nejvíce se využívají minerální a syntetické oleje, které se zahřívají přibližně na teplotu 50 °C. Syntetické oleje mají oproti minerálním olejům delší životnost [11].

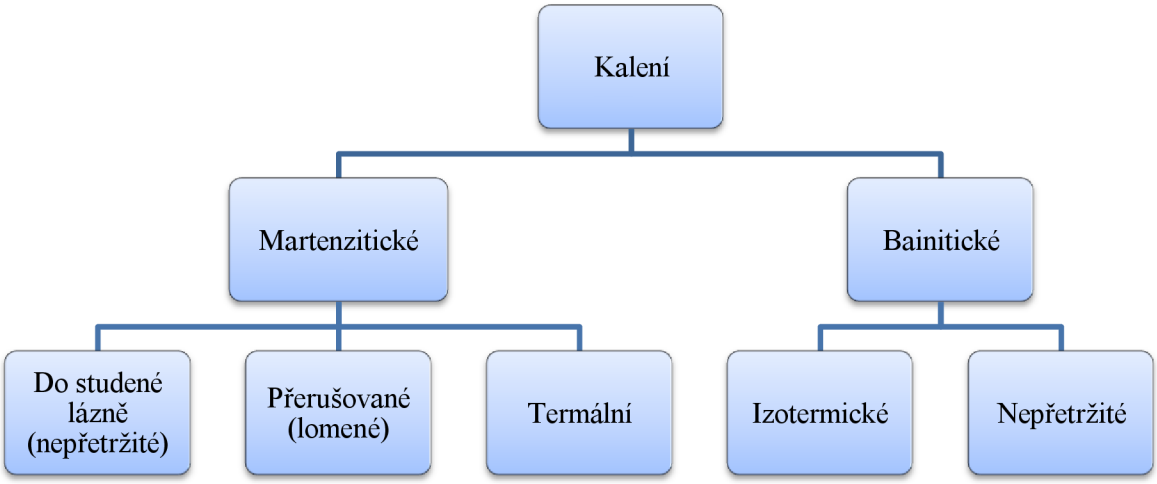
Nejmírnější kalící prostředí je vzduch. Ochlazování má plynulý průběh a jeho účinek lze zvýšit prouděním a vodní mlhou. Vzduchem se kalí vysocelegované materiály, jako jsou např. rychlořezné oceli.

V tab. 5 je zobrazena rychlost ochlazování oceli v různém kalicím prostředí, ze které lze vyčíst, že k nejprudšímu ochlazení dochází při kalení do solných roztoků. Naopak k nejpomalejšímu ochlazování dochází při kalení na vzduchu. V rozsahu teplot 650 až 550 °C, kdy probíhá perlitická přeměna je velký rozdíl mezi kalením do vody o teplotě 18 °C anebo o teplotě 50 °C. Při poklesu teploty do oblasti martenzitické přeměny (350 až 250 °C) se rychlost ochlazování již vyrovná.

Tab. 5 Rychlost ochlazování oceli v různém kalicím prostředí [14].

| Kalicí prostředí | Rychlost ochlazování [°C/s] v rozsahu teplot | |
|---|---|---|
| | 650 až 550 °C | 350 až 250 °C |
| Voda 18 °C | 600 | 270 |
| Voda 50 °C | 400 | 270 |
| 10% NaCl 18 °C | 1100 | 300 |
| 10% NaOH 18 °C | 1200 | 300 |
| Minerální olej | 125 | 25 |
| Vzduch | 5 | 1 |

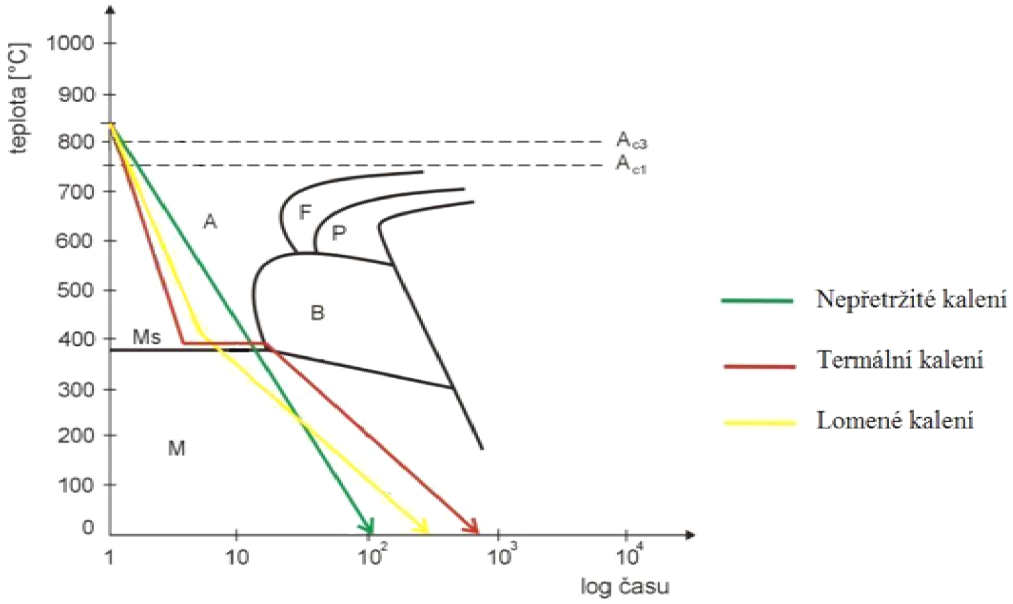
Kalení lze rozdělit na kalení martenzitické a kalení bainitické (obr. 21).




Obr. 21 Rozdělení kalení [11].

### 4.1.1 Kalení martenzitické

Při martenzitickém kalení (obr. 22) vzniká výsledná struktura martenzit. Martenzit je velmi tvrdý, ale také křehký. Jeho křehkost se dá zmenšit využitím různých kalicích procesů.




Obr. 22 Martenzitické kalení [17].

Kalení do studené lázně (nepřetržité) je jednoduché a finančně nenáročné. Obvyklé kalicí prostředí je voda. Jelikož je pokles teplot přes křivky $M_S$ a $M_F$ prudký, dochází k vysokému vnitřnímu pnutí, které může vést až k praskání kalených součástí [4, 11, 13].

Přerušované (lomené) kalení – kalená součást je rychle ochlazována až do teploty $M_S$, kde se přerušením kalení zabrání perlitické přeměně. Následně je součást umístěna do mírnějšího ochlazovacího prostředí. Tímto postupem je dosaženo snížení pnutí. Přerušované kalení se využívá u tvarově a rozměrově složitých výrobků [4, 11, 13].

Termální kalení – ochlazování probíhá v prostředí, jehož teplota leží těsně nad křivkou $M_S$. Při výdrži na této teplotě dojde k vyrovnání teplot mezi povrchem a jádrem kaleného výrobku a tím i k potlačení pnutí. Výdrž na této teplotě však nesmí přesáhnout dobu, která je nutná pro vznik bainitu. Ochlazení následně probíhá nejčastěji na vzduchu, kde dojde k martenzitické přeměně. Termální kalení je vhodné pro výrobky z legovaných ocelí a menší tenkostěnné a tvarově složité výrobky z nízkolegovaných nebo uhlíkových ocelí [4, 11, 13].

Po martenzitickém kalení následuje popuštění, které odstraní křehkost martenzitu.

### 4.1.2 Kalení bainitické

Bainitickým kalením je dosaženo výsledné struktury bainitu, který má vynikající vlastnosti. Jeho tvrdost je téměř stejná jako u martenzitu, ale bainit je na rozdíl od martenzitu houževnatý. Proto není nutné po bainitickém kalení ocel dále popouštět za účelem snížením křehkosti. Při izotermickém kalení se předmět zahřátý na kalící teplotu přemístí rychle do termální lázně (solné nebo kovové), přičemž teplota lázně se pohybuje okolo 300 až 400 °C, což je oblast bainitické přeměny. Kalený předmět v lázni zůstane až do ukončení bainitické přeměny a následně je umístěn na vzduch, kde dojde k úplnému dochlazení. Z důvodu menší rychlosti ochlazování je izotermické kalení vhodné zejména pro výrobky menších průřezů z nízkolegovaných ocelí. Menší intenzita ochlazování způsobuje také minimální teplotní a strukturní pnutí, čímž je nebezpečí prasknutí kaleného předmětu minimální. Další způsob izotermického kalení je ten, že lázeň je ohřátá těsně pod teplotu $M_S$ a výsledná struktura je vytvořena ze směsi martenzitu, bainitu a zbytkového austenitu. Po tomto druhu izotermického kalení následuje popouštění pro odstranění křehkosti martenzitu [4, 11, 13].

Nepřetržité bainitické kalení je téměř totožné jako nepřetržité martenzitické kalení, jen s tím rozdílem, že ochlazování probíhá s menší intenzitou. Výsledná struktura může být pouze bainitická nebo bainiticko martenzitická. Tento způsob kalení je vhodný pro ocel, která má vlivem legujících prvků zřetelně oddělenou bainitickou a perlitickou část v ARA diagramu [4, 11, 13].

## 4.2 Povrchové kalení

Hlavním požadavkem povrchového kalení je dosažení vysoké tvrdosti povrchu a houževnatého jádra. Vysoké tvrdosti povrchu je dosaženo rychlým ohřevem a následným ochlazením. Na povrchu vznikne martenzitická struktura a jádro součásti, u kterého nedošlo k překrystalizaci, zůstává feriticko – perlitické. Jelikož má být ohřát na kalicí teplotu pouze povrch součásti, musí být ohřev intenzivní a krátký a teprve tehdy je dosaženo potřebného teplotního rozdílu mezi povrchem a jádrem součásti. Při obvyklém povrchovém kalení je rychlost ohřevu povrchu až několik set °C/s. Tloušťka zakalené vrstvy je pak nepřímo úměrná této rychlosti. Povrchové kalení je vyžadováno u součástí,

které mají mít vysokou odolnost proti opotřebení, zvýšenou odolnost vůči dynamickému namáhání a zvýšenou mez kluzu [11, 15].

### 4.2.1 Indukční kalení

Střídavý proud střední nebo vysoké frekvence, který prochází induktorem, indukuje ve vloženém, elektricky vodivém předmětu magnetické pole a vznikají vířivé proudy. Intenzita magnetického pole i vířivých proudů je největší na povrchu předmětu, vzniká zde tedy i největší Joulovo teplo, které ohřívá povrch součásti. Tloušťka ohřáté vrstvy je nepřímo úměrná frekvenci proudu a závisí také na rychlosti a době ohřevu. Vysokofrekvenční stroje (350 kHz) dosahují hloubku prokalení 0,8 až 2 mm, na středofrekvenčních strojích (4 až 10 kHz) lze dosáhnout hloubky 2 až 8 mm [11, 16].

Indukční kalení se provádí buď jednorázovým, nebo postupným způsobem. Při jednorázovém kalení je celý povrch předmětu ohřát na kalicí teplotu a následně ochlazen vodní sprchou nebo ponořen do lázně. Při postupném způsobu je těsně za induktorem umístěna vodní sprcha. Na kalicí teplotu se tedy ohřívá pouze ta část povrchu, která je ihned ochlazena sprchou [11].

Firma KSK používá pro kalení KŠ středofrekvenční indukční kalící zařízení od firmy AEG Elotherm. Kalení hřídele KŠ je zobrazeno na obr. 23 a tab. 6 znázorňuje nastavení parametrů pro indukční kalení KŠ K63x20.

Obr. 23 Kalení hřídele KŠ [5].

Tab. 6 Parametry indukčního kalení KŠ K63x20 [5].

| Nastavované parametry pro středofrekvenční indukční kalení hřídele KŠ K63x20 | | | |
|---|---|---|---|
| Materiál | ČSN 14 260 | | |
| Průměr hřídele [mm] | 63 (po okružování) | | |
| Tvrdost kalené vrstvy [HRC] | 60±2 | | |
| Min. hloubka prokalení [mm] | 5 | | |
| Operace | Předehřev | Kalení | Popouštění |
| Výkon [kW] | 85±3 | 115±3 | 30±3 |
| Posuv [mm·s$^{-1}$] | – | 5,5±0,1 | 20,0±0,1 |
| Otáčky hřídele [min$^{-1}$] | 112±2 | | |
| Čas ohřevu v klidu [s] | 6,0±0,3 | | |
| Čas prudkého ochlazení [s] | 60,0±0,3 | | |
| Čas zpoždění sprchy [s] | 60,0±0,3 | | |
| Trafo – převod [-] | 15 : 2 | | |
| Množství kalícího média [dm$^3$·min$^{-1}$] | 30±2,5 | | |
| Kalící médium | OSMANIL E2 5% | | |

### 4.2.2 Kalení laserem

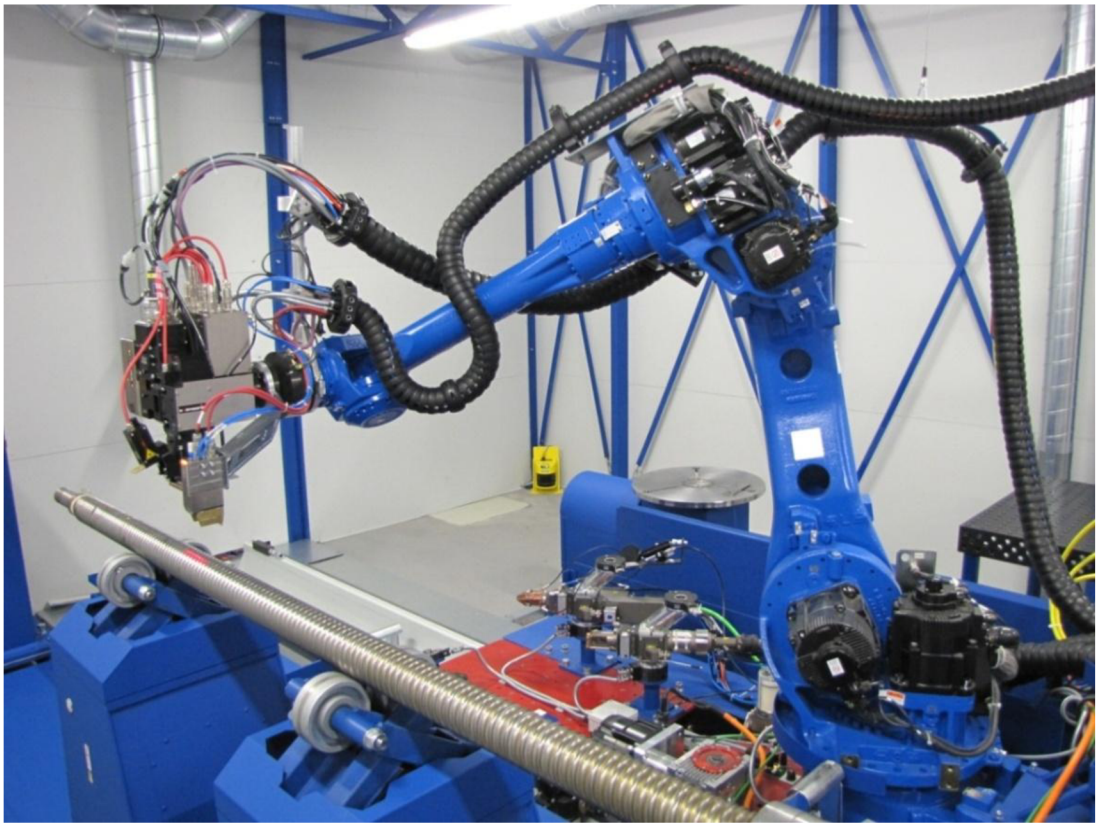
Kalení laserem je v průmyslu používáno již téměř 10 let a nyní, s vývojem vhodných laserových systémů se stává stále častěji využívané. Jedná se o moderní způsob povrchového zpracování materiálu. Dopadající laserový paprsek zahřívá povrch materiálu na požadovanou kalící teplotu. Intenzita laserového paprsku je od $10^3$ do $10^4$ W/cm$^2$, časy působení od 0,8 do 10 sekund a rychlost ohřevu se pohybuje v řádu 1000 °C/s. Když je dosažena požadovaná teplota, začne se laserový paprsek pohybovat po povrchu a dochází k plynulému ohřevu ve směru posuvu. Při zvýšené teplotě dochází ke změně polohy atomů uhlíku (austenitizace). Laserový paprsek se pohybuje dál po povrchu materiálu a v zahřáté oblasti dochází k rychlému zchladnutí vlivem tepelné vodivosti a tepelné kapacitě okolního tepelně neovlivněného materiálu. Jelikož se mřížka kovu nemůže vrátit do své původní podoby, vzniká martenzit. Tento jev se nazývá samokalitelnost. Při kalení laserem se tedy vůbec nepoužívá žádné kalicí prostředí, které by pomáhalo prudce snižovat teplotu povrchu. Jelikož nedochází k ochlazování vlivem kalícího prostředí, tak na povrchu vzniká tenká oxidační vrstva. Z hlediska použití nemá tato vrstva téměř žádný význam a lze ji snadno odstranit. Jejímu vytvoření lze zamezit při kalení v ochranné atmosféře. Kalením laserovým paprskem lze dosáhnout hloubky prokalené vrstvy od 0,1 až 1,5 mm, u některých materiálů (vysocelegované oceli) lze dosáhnout i hodnot 2,5 mm a více. Při kalení do větší hloubky musí být větší objem okolního materiálu, aby došlo k rychlému ochlazení a zóna kalení se dostatečně ochladila. Tloušťka stěny by měla být alespoň 10x větší než je tloušťka kalené vrstvy. Vysoká rychlost ohřevu a ochlazení vede ke vzniku jemnozrnné struktury s drobnými karbidy, krátkými martenzitickými jehlicemi a malou velikostí zrn. Tudíž lze laserem kalit součásti, které jsou indukčním kalením těžce kalitelné [18, 19, 20].

Vizí budoucnosti je obrábět součásti s minimem dodatečného opracování po tepelném zpracování. Výhodou kalení laserem je to, že teplo je dodáváno přímo do potřebného místa, a tím nedochází k téměř žádným deformacím součásti. Je tedy možné volit malý

technologický přídavek na broušení a v některých případech již není ani broušení nutné [19].

Pro laserové kalení se používají $CO_2$ lasery, Nd:YAG a dnes také vysoce výkonné diodové lasery, jejichž účinnost dosahuje až 35 %. Diodové lasery mají paprsek ve tvaru obdélníku nebo čtverce a jsou díky této vlastnosti vhodné na kalení. Při použití $CO_2$, Nd:YAG a ostatních pevnolátkových laserů je nutné použít speciální optiku, kde jsou na výstupní čočce vybroušeny plošky, které laserový paprsek rozostřují na čtvercovou popř. obdélníkovou plochu. Tato speciální optika je ale velmi finančně nákladná. Jiný způsob je využití kmitání paprsku. Celý kalicí proces je hlídán a sledován kamerou, která je vybavena pyrometrem pro sledování teploty. Pyrometr v případě potřeby sníží nebo zvýší výkon laseru tak, aby bylo dosaženo rovnoměrné teploty a tudíž i tvrdosti povrchu. Laser je umístěn na robotickém rameni, díky čemuž je dosaženo rovnoměrného pohybu paprsku i ve 3D [19, 21].

Firma KSK využívá laser TruDisk 6006 od firmy Trumpf. Jedná se o pevnolátkový diskový laser a jeho parametry jsou uvedeny v tab. 7. Aktivním prostředím pevnolátkových laserů je dielektrikum (pevná, opticky propustná látka). Mimo kalení je laser ve firmě používán i pro navařování kovových prášků a svařování. Laser je umístěn na šestiosém robotu Motoman s pracovním rozsahem 2000 x 7000 mm. Laserové pracoviště (obr. 24) je také vybaveno jednoosým polohovadlem (nosnost 1000 kg, upínací průměr 200 mm, protočný průměr 800 mm, max. délka upnuté součásti 6000 mm) a dvouosým polohovadlem (nosnost 250 kg, průměr 1200 mm) [5].

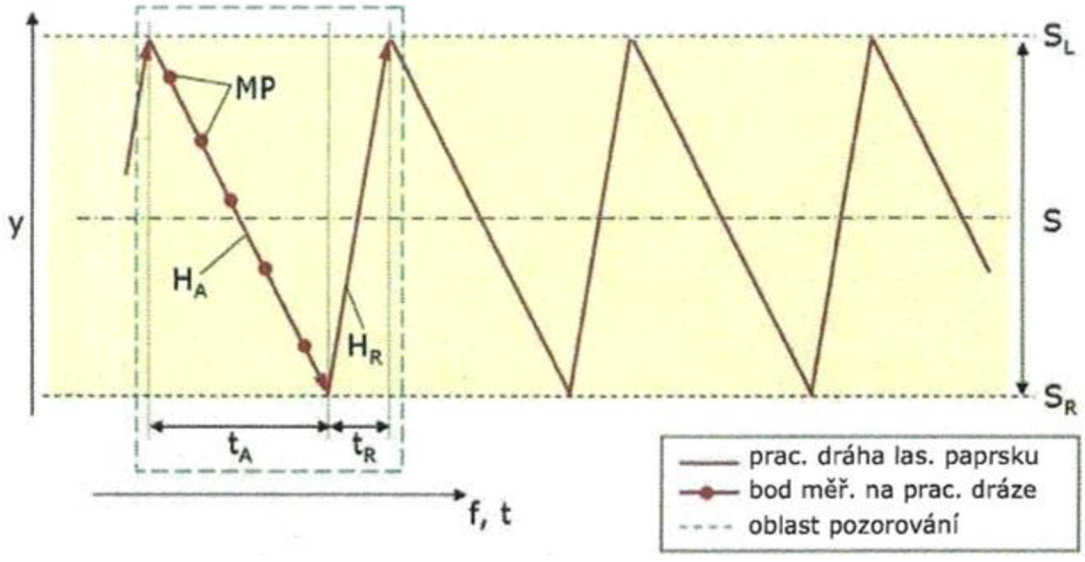


Obr. 24 Laserové pracoviště firmy KSK [5].

Tab. 7 Parametry laseru Trumpf TruDisk 6006 [23].

| Parametr | Jednotka | Hodnota |
|---|---|---|
| Max. výkon | [W] | 6000 |
| Vlnová délka | [nm] | 1030 |
| Průměr optického vlákna | [μm] | 600 |
| Kvalita paprsku | [mm·mrad] | 25 |
| Konstantnost výkonu vztažená na výkon laseru | [%] | ± 1 |
| Teplotní rozsah chladící kapal. | [°C] | 5 – 20 |
| Rozměry laseru | [mm] | 1600 x 1550 x 950 |

Pro kalení je laser vybaven modulárním systémem laserového opracování RLH – A od firmy Scansonic. Tento systém umožňuje kalení náročných a variabilních dílů. Je možné vytvářet kalící stopy na řezných hranách, drážkách, vodících drahách a kluzných plochách i tvarových plochách s plynulými geometrickými přechody. Funkce RLH – A spočívá v tom, že laserový paprsek je promítán na opracovávaný díl prostřednictvím zrcadla oscilujícího v předem definovaném rozsahu. Tím se na povrchu dílu vytvoří zakalená stopa předem určené délky a šířky. Aby bylo v této stopě dosaženo definované tvrdosti, je během procesu nutné dodržet konstantní teplotu. Proto je teplota povrchu dílu snímána pomocí integrovaného kamerového pyrometru. Měření probíhá pohybem zrcadla. Tento pohyb je také označován jako skenovací pohyb. Obr. 25 ukazuje příklad skenovacího procesu RLH – A v časově prodlouženém tvaru. Při zvolené frekvenci 60 Hz potřebuje pracovní zdvih 13 ms ($t_A$) a zpětný zdvih 3 ms ($t_R$). Po tuto dobu proběhne jeden sken (oblast pozorování). Laserový paprsek se pohybuje při rovnoměrném posuvu po dílu přímočaře (červená čára) ve směru osy y. Při konstantním výkonu laseru je množství energie, které v daném bodě přechází do dílu, určováno okamžitou rychlostí jako výsledek posuvu a skenovacího pohybu v tomto místě. Během skenovacího pohybu je v jednom pracovním zdvihu ($H_A$) snímána teplota povrchu. Děje se tak v několika měřících bodech (MP) ve skenovací oblasti stopy opracování ($S_R$ až $S_L$). Tyto hodnoty se vyhodnocují a slouží pro přizpůsobení rychlostního profilu a výkonu laseru pro následující pracovní zdvih. Ve zpětném zdvihu probíhá jen návrat do základní polohy [5].




Obr. 25 Princip skenovacího procesu RLH – A [5].

Při laserovém kalení dochází k ohřevu KŠ. Vlivem teplotní roztažnosti materiálu tak dochází k jeho prodloužení, a proto je skenovací zařízení nastaveno tak, aby skenovalo hranu přechodu závitu šroubu. Tímto opatřením se zabrání tomu, aby docházelo ke kalení mimo požadovanou plochu.

Výhody laserového kalení:

- lokální kalení,
- rychlost a kvalita,
- malé tepelné zatížení,
- nízké deformace dílců,
- možnost kalení tvarově složitých dílců,
- nízká oxidace povrchu [22].

# 5 TESTOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ

Nedílnou součástí návrhu a konstrukce veškerých strojních součástí je i testování jejich životnosti, popř. trvanlivosti. Termíny životnost a trvanlivost lze dobře vysvětlit na příkladu řezného nástroje. V tomto případě lze trvanlivost vyjádřit jako dobu, po kterou je nástroj schopen plnit svou funkci bez opotřebení, které by vedlo ke zhoršení jeho vlastností (především kvalita obráběného povrchu). Životnost je definována jako součet trvanlivostí nástroje, tj. celková doba funkčnosti nástroje od uvedení do činnosti až po vyřazení [42].

Výrobci KŠ nejsou v označování termínu životnost/trvanlivost jednotní a proto bude v této diplomové práci využíván pouze termín životnost, který používá firma KSK i přesto, že šrouby nejsou po skončení životnosti znovu opravovány a proto by se teoreticky mělo jednat o termín trvanlivost, jako v případě řezného nástroje.

Pro testování životnosti byly vybrány dvě dvojice KŠ. Jsou jimi KŠ s firemním označením K63x20 – 3+3/AP+P (KŠ průměru 63 mm s pravým stoupáním 20 mm, 3 pracovní závity, dvojice předepnutým matic typu AP+P). Jedná se o standardní polohovací KŠ, které jsou často využívané v průmyslu pro své univerzální vlastnosti, technické parametry a možnost široké škály provedení. V tab. 8 jsou znázorněny parametry tohoto KŠ a v příloze 2 se nacházejí popisy a zobrazení těchto parametrů [5].

Tab. 8 Parametry KŠ K63x20 – 3+3/AP+A [5].

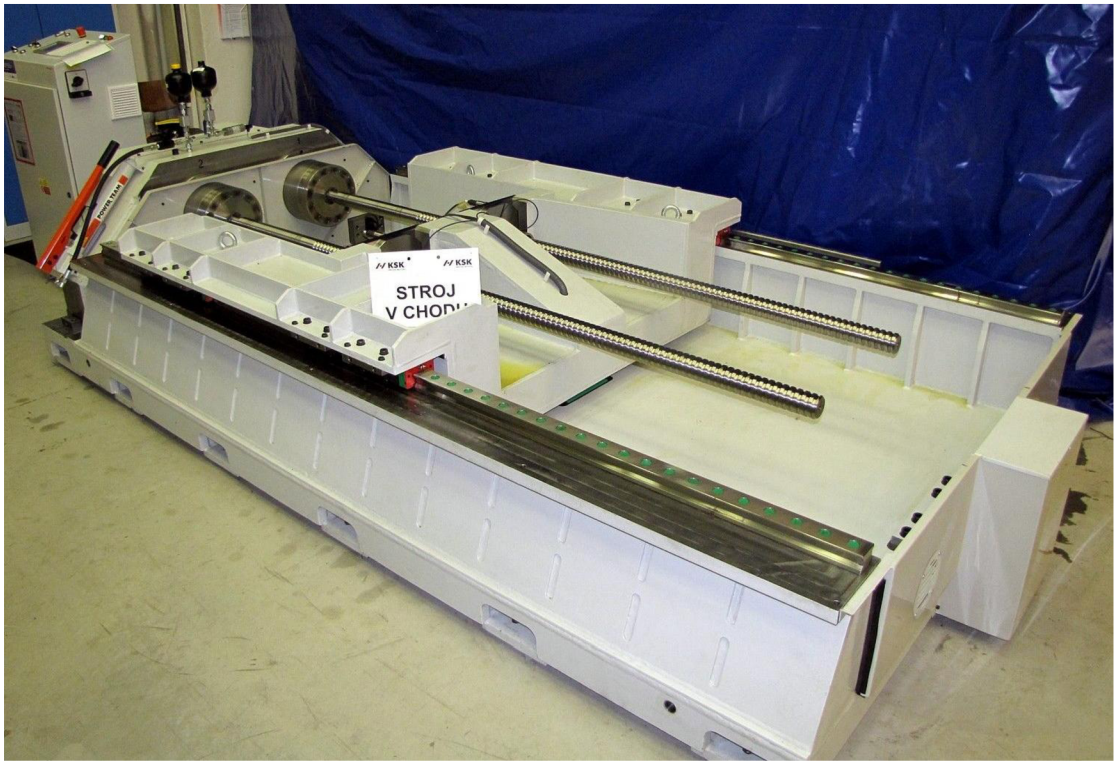
| | | | |
|---|---|---|---|
| i [-] | 3 | $L_6 \pm 2$ [mm] | 240 |
| $D_W$ [mm] | 10,319 | $C_o$ [N] | 230 680 |
| $D_1$ [mm] | 95 | $C_a$ [N] | 86 560 |
| $D_2$ [mm] | 135 | k [N/μm$^{3/2}$] | 212 |
| $D_3$ [mm] | 115 | R [N/μm] | 1 540 |
| $L_3$ [mm] | 20 | typ převodu [-] | I |
| d [mm] | 10,5 | | |

## 5.1 Testovací zařízení

Pro testování životnosti KŠ bylo do firmy KSK pořízeno testovací zařízení KŠ (obr. 26). Testovací zařízení bylo navrhnuto a vyrobeno na Ústavu výrobních strojů Fakulty strojní na ČVUT a je určeno pro testování dvojice KŠ od průměru 32 mm do maximálního průměru 160 mm. Parametry zařízení jsou v tab. 9. Zařízení se skládá ze samonosného rámu, na kterém jsou umístěny podélné saně, které zajišťují lineární pohyb pro testovanou dvojici KŠ. Připojení širokého množství průměrů matic KŠ je zabezpečeno pomocí vyměnitelné příruby. Podélné saně umožňují maximální zdvih 1500 mm. V přední tuhé konzole jsou uložena radiálně axiální ložiska, která jsou dimenzována na maximální zatížení a dlouhou životnost testovacího zařízení. Axiálního zatížení je vyvozeno pomocí hydraulického předepínacího mechanismu, který je umístěn na přední konzole. Předepínací mechanismus umožňuje vyvodit axiální zatížení v rozsahu od 30 kN do 500 kN. Součástí předepínacího mechanismu je tlakový snímač, pomocí kterého je umožněno axiální zatížení snímat a následně regulovat. V přední konzole jsou uloženy rotační hřídele, které slouží k přenosu krouticího momentu a k zachycení axiální síly od předepnutých KŠ. Synchronizace otáčení hřídelů je zajištěna vzájemným propojením pomocí ozubeného

řemene. Konce rotačních hřídelů jsou pomocí svěrného pouzdra a systému přírub spojeny s testovanými KŠ. Součástí stroje je i ovládací panel s rozvaděčem. Testování řídí PLC počítač, který také ukládá měřená data přes síť LAN. Testovací zařízení umožňuje měřit tyto hodnoty:

- vibrace matice 1 [mm/s],
- vibrace matice 2 [mm/s],
- teplota pracovního prostoru pod krytem zařízení [°C],
- teplota matice 1 [°C],
- teplota matice 2 [°C],
- teplota v elektrickém rozvaděči [°C],
- tlak v hydraulickém okruhu [bar],
- zatěžující axiální síla přepočtená z tlaku [kN],
- velikost momentu motoru (absolutní hodnota) [Nm] [5].




Obr. 26 Testovací zařízení na životnost KŠ [5].

Tab. 9 Parametry testovacího zařízení [5].

| Parametr | Jednotka | Hodnota |
|---|---|---|
| Příkon hlavního pohonu | [kW] | 15 |
| Pracovní zdvih | [mm] | 500 – 1500 |
| Maximální otáčky | [$min^{-1}$] | 300 |
| Axiální síla | [kN] | 30 – 500 |
| Průměr testovaných šroubů | [mm] | 32 – 160 |
| Max. teplota v pracovním prostoru | [°C] | 80 |
| Doba trvání testu bez zásahu obsluhy | [hod.] | 200 |
| Četnost ukládání naměřených dat v intervalu | [min.] | 10 |

## 5.2 Testy první dvojice kuličkových šroubů

První dvojice KŠ byla vyrobena odlišnou technologií výroby. U prvního šroubu z této dvojice byl profil závitu vyroben okružováním do již zakaleného polotovaru a následně přebroušen. Hloubka zakalení je obyčejně kolem 8 % z $D_0$. Druhý šroub byl nejprve vyhrubován okružováním do měkkého materiálu, pak zakalen a následně broušen. Tepelné zpracování bylo u obou KŠ stejné, a to indukční kalení. Protože kalení u druhého šroubu proběhlo až po vyhrubování základního profilu, tak je zakalená martenzitická vrstva rovnoměrněji rozložená kolem profilu závitu, než v případě prvního šroubu, kde byl zakalen polotovar ještě před hrubováním. Proto je určitý předpoklad, že životnost druhého šroubu bude vyšší než u prvního šroubu.

První KŠ byl vyroben z oceli 42CrMo4 dle normy ČSN EN 10083–1 (dle ČSN normy ocel 15 142). Jedná se o ocel s vyšší prokalitelností, která se používá pro velmi namáhané strojní součásti, jako jsou hřídele a spojovací součásti. Ocel není náchylná k popouštěcí křehkosti. Kalení probíhá v méně razantním kalicím prostředí, jelikož je náchylná ke vzniku trhlin. V kaleném stavu je odolná proti opotřebení. V tab. 10 je znázorněno chemické složení a v tab. 11 jsou znázorněny mechanické a fyzikální vlastnosti [37].

Tab. 10 Chemické složení oceli 42CrMo4 [37].

| Chem. složení | C | Mn | Si | Cr | Cu | Mo | P | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [%] | 0,38 – 0,45 | 0,6 – 0,9 | max. 0,4 | 0,9 – 1,2 | max. 0,3 | 0,15 – 0,3 | max. 0,025 | max. 0,035 |

Tab. 11 Mechanické a fyzikální vlastnosti 42CrMo4 [37].

| Mechanické a fyzikální vlastnosti | Označení a jednotka | Hodnota |
|---|---|---|
| Mez pevnosti | $R_m$ [MPa] | 1000 – 1200 |
| Mez kluzu | $R_{p0,2}$ [MPa] | 750 |
| Tažnost | A [%] | 11 |
| Kontrakce | Z [%] | 45 |
| Tvrdost podle Brinella | HB [–] | 241 |

Druhý KŠ byl vyroben z oceli 54SiCr6 dle normy ČSN EN 10089 (dle ČSN normy ocel 14 260). Tato Si–Cr ocel je vhodná zvláště na namáhané pružiny pro automobilové a železniční vozy, na rovinné součásti odolávající opotřebení a obložení aktivních částí zemědělské a stavební techniky. Své uplatnění nachází také jako nožířská ocel. Po tepelné úpravě má vysokou tvrdost, pevnost a otěruvzdornost, proto je již řadu let využívána firmou KSK pro výrobu KŠ. Tvařitelnost a svařitelnost je obtížná. V tab. 12 je znázorněno chemické složení a v tab. 13 jsou znázorněny mechanické a fyzikální vlastnosti [37].

Tab. 12 Chemické složení oceli 54SiCr6 [37].

| Chem. složení | C | Mn | Si | Cr | Ni | Cu | P | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [%] | 0,5 – 0,6 | 0,5 – 0,8 | 1,3 – 1,6 | 0,5 – 0,7 | max. 0,5 | max. 0,3 | max. 0,035 | max. 0,035 |

Tab. 13 Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli 54SiCr6 [37].

| Mechanické a fyzikální vlastnosti | Označení a jednotka | Hodnota |
|---|---|---|
| Mez pevnosti | $R_m$ [MPa] | 1350 – 1600 |
| Mez kluzu | $R_{p0,2}$ [MPa] | 1160 |
| Tažnost | A [%] | 6 |
| Kontrakce | Z [%] | 25 |
| Tvrdost podle Brinella | HB [–] | 217 |

V příloze 3 je výkres sestavy KŠ K63x20 – 3+3/AP+A a výkresy hřídelí použitých v tomto KŠ.

### 5.2.1 Vypočtené teoretické hodnoty životnosti

Pro potřeby návrhů, výroby a testování KŠ se používá norma DIN ISO 3408. Tato norma určuje názvosloví KŠ, pevnostní výpočty, výpočty životnosti, atd. Je rozdělena celkem na 5 částí:

- část 1: názvosloví a značení,
- část 2: jmenovité průměry a stoupání,
- část 3: podmínky výstupní přejímky a testů,
- část 4: statická axiální tuhost,
- část 5: statické a dynamické axiální zatížení, životnost.

Tato diplomová práce vychází z 5. části (DIN ISO 3408–5), která popisuje statické a dynamické zatížení, životnost při proměnných a konstantních otáčkách a korekci životnosti s ohledem na požadovanou spolehlivost.

Testovaná dvojice KŠ byla zatížena vnější axiální silou 50 kN a otáčky byly nastaveny na hodnotu 200 $min^{-1}$. Při testování nebude vyvozená axiální síla stále přesně 50 kN, ale bude se pohybovat v malém rozmezí. I otáčky nebudou během testu stále 200 $min^{-1}$, protože při pohybu matice v krajních polohách KŠ bude docházet k jejich snížení, až po úplné zastavení matice a rozjetí matice na opačnou stranu KŠ. Pro zjednodušení výpočtů a vyhodnocení testů se tyto hodnoty budou považovat za konstantní. Pro konstantní otáčky KŠ platí následující vztahy dle normy DIN ISO 3408-5 [39].

Nejprve je nutné stanovit sílu předepnutí matice KŠ dle vztahu (1). Hodnota tohoto předepnutí se nastavuje při montáži KŠ.

$$F_v = 0{,}1 \cdot C_a \tag{1}$$

kde: $F_v$ [N] – zatížení od předepnutí,
$C_a$ [N] – dynamická únosnost.

$$F_v = 0{,}1 \cdot C_a = 0{,}1 \cdot 86\,560 = 8\,656\ N$$

Následně je nutné zkontrolovat, zdali platí podmínka dle vztahu (2). V případě, že podmínka platí, je vnější axiální zatížení rovno vnitřnímu zatížení.

$$F_{1,2} \geq 2{,}83 \cdot F_v \quad \Longrightarrow \quad F_{a(1),(2)} = F_{1,2} \tag{2}$$

kde: $F_{1,2}$ [N] – vnější axiální zatížení,
$F_{a(1),(2)}$ [N] – vnitřní zatížení.

$$50\,000 \geq 2{,}83 \cdot 8\,656$$
$$50\,000\ N \geq 24\,496{,}48\ N \quad \Longrightarrow \quad F_{a(1),(2)} = 50\,000\ N$$

Tato podmínka je tedy splněna a vnitřní zatížení matice KŠ je vhodné pro testování vybrané dvojice KŠ a je rovno vnějšímu axiálnímu zatížení, které je vyvozeno pomocí hydraulického předepínacího mechanismu na testovacím zařízení.

Pokud je známa hodnota vnitřního napětí, lze dále stanovit hodnotu středního napětí dle vztahu (3).

$$F_{ma\,(1),(2)} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^{n} {F_{a(1),(2)}}^3 \cdot \frac{q_j}{100}} \tag{3}$$

kde: $F_{ma(1),(2)}$ [N] – střední vnitřní zatížení,
$q_j$ [%] – poměrná doba působení zatížení.

$$F_{ma\,(1),(2)} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^{n} {F_{a(1),(2)}}^3 \cdot \frac{q_j}{100}} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^{1} 50\,000^3 \cdot \frac{100}{100}} = 50\,000\ N$$

Z výpočtu je patrné, že hodnota středního vnitřního napětí je rovna vnější axiální síle. Je-li známa hodnota středního vnitřního napětí, lze dále stanovit životnost KŠ v otáčkách dle vztahu (4).

$$L_{1,2} = \left(\frac{C_a \cdot f_m}{F_{ma\,(1),(2)}}\right)^3 \cdot 10^6 \tag{4}$$

kde: $L_{1,2}$ [$min^{-1}$] – životnost v otáčkách,
$f_m$ [–] – koeficient vlivu jakosti a stavu materiálu (v KSK je standardně $f_m = 1{,}25$).

$$L_{1,2} = \left(\frac{C_a \cdot f_m}{F_{ma\,(1),(2)}}\right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{86\,560 \cdot 1{,}25}{50\,000}\right)^3 \cdot 10^6 = 10\,133\,786\ min^{-1}$$

Je-li známa životnost v otáčkách, lze dále stanovit životnost v hodinách dle vztahu (5). Otáčky testovaných KŠ jsou 200 $min^{-1}$.

$$L_h = \frac{L_{1,2}}{n_m \cdot 60} \tag{5}$$

kde: $L_h$ [hod.] – životnost v hodinách,

$n_m$ [$min^{-1}$] – otáčky.

$$L_h = \frac{L_{1,2}}{n_m \cdot 60} = \frac{10\,133\,786}{200 \cdot 60} = 844{,}5\ hod.$$

Stanovená teoretická životnost KŠ v hodinách dosahuje hodnoty 844,5 hodin. Tuto životnost garantuje výrobce s 90% spolehlivostí. Podle tab. 14 a vztahu (6) lze stanovit životnost v hodinách pro jinou hodnotu spolehlivosti.

$$L_{ha} = L_h \cdot f_{a1} \tag{6}$$

kde: $L_{ha}$ [hod.] – trvanlivost s ohledem na požadovanou spolehlivost,

$f_{a1}$ [–] – faktor spolehlivosti.

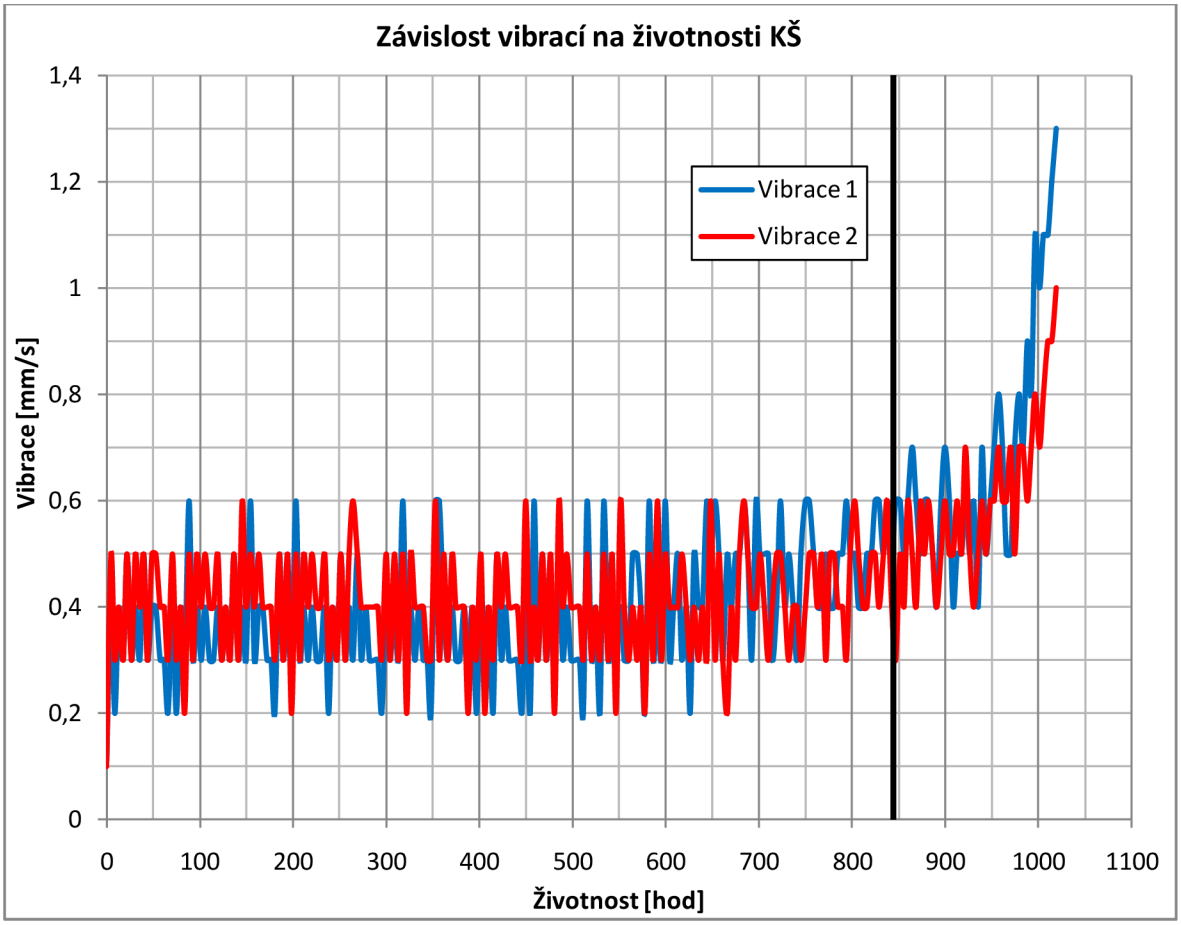
Tab. 14 Životnost KŠ pro různý faktor spolehlivosti [5].

| Spolehlivost [%] | $f_{a1}$ [–] | Životnost [hod.] |
|---|---|---|
| 90 | 1,00 | 844,5 |
| 95 | 0,62 | 523,6 |
| 96 | 0,53 | 447,6 |
| 97 | 0,44 | 371,6 |
| 98 | 0,33 | 278,7 |
| 99 | 0,21 | 177,3 |

Z tab. 14 vyplývá, že se snižujícím se faktorem spolehlivosti a zvyšující se spolehlivostí se snižuje výrobcem garantovaná hodnota životnosti KŠ. Je zřejmé, že s 99% spolehlivostí je garantována životnost 177,3 hodin a s 90% spolehlivostí je garantována životnost 844,5 hodin. Tyto hodnoty však platí pouze pro námi zvolené KŠ a testovací podmínky (axiální síla 50 kN a otáčky 200 $min^{-1}$). Ve výrobě u zákazníka nejsou tyto podmínky stejné a konstantní, a proto jsou tyto stanovené hodnoty pouze orientační.

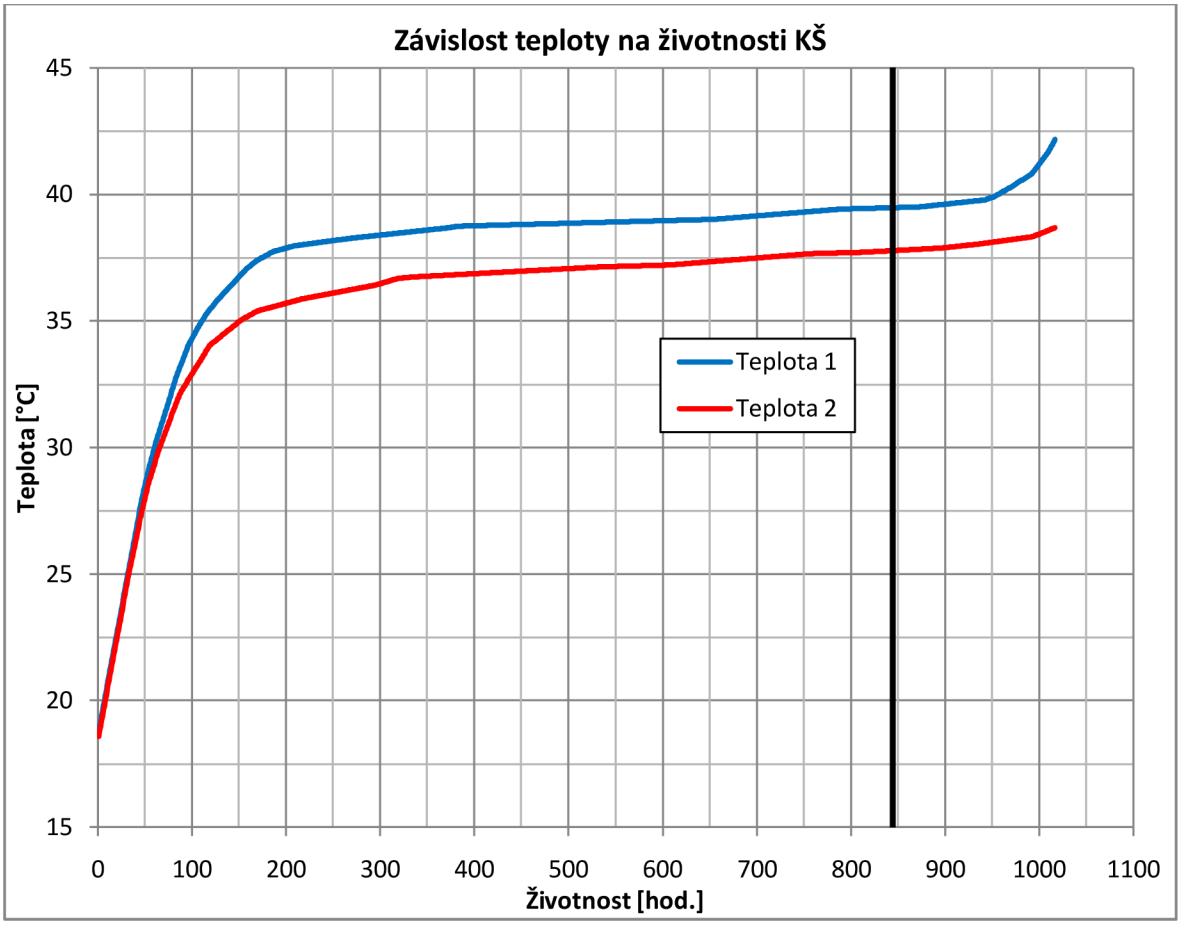
### 5.2.2 Vyhodnocení testů

Testy životnosti KŠ probíhaly v prostorách firmy KSK na testovacím zařízení. Četnost ukládání dat byla nastavena na 10 minut. Měřena byla veškerá důležitá data a největší pozornost byla věnována měření vibrací, jelikož konec životnosti KŠ má za důsledek zvýšení vibrací. Na testovacím zařízení bylo nastaveno vypnutí testu v případě, když oba KŠ začnou vykazovat hodnotu vibrací 1 mm/s.



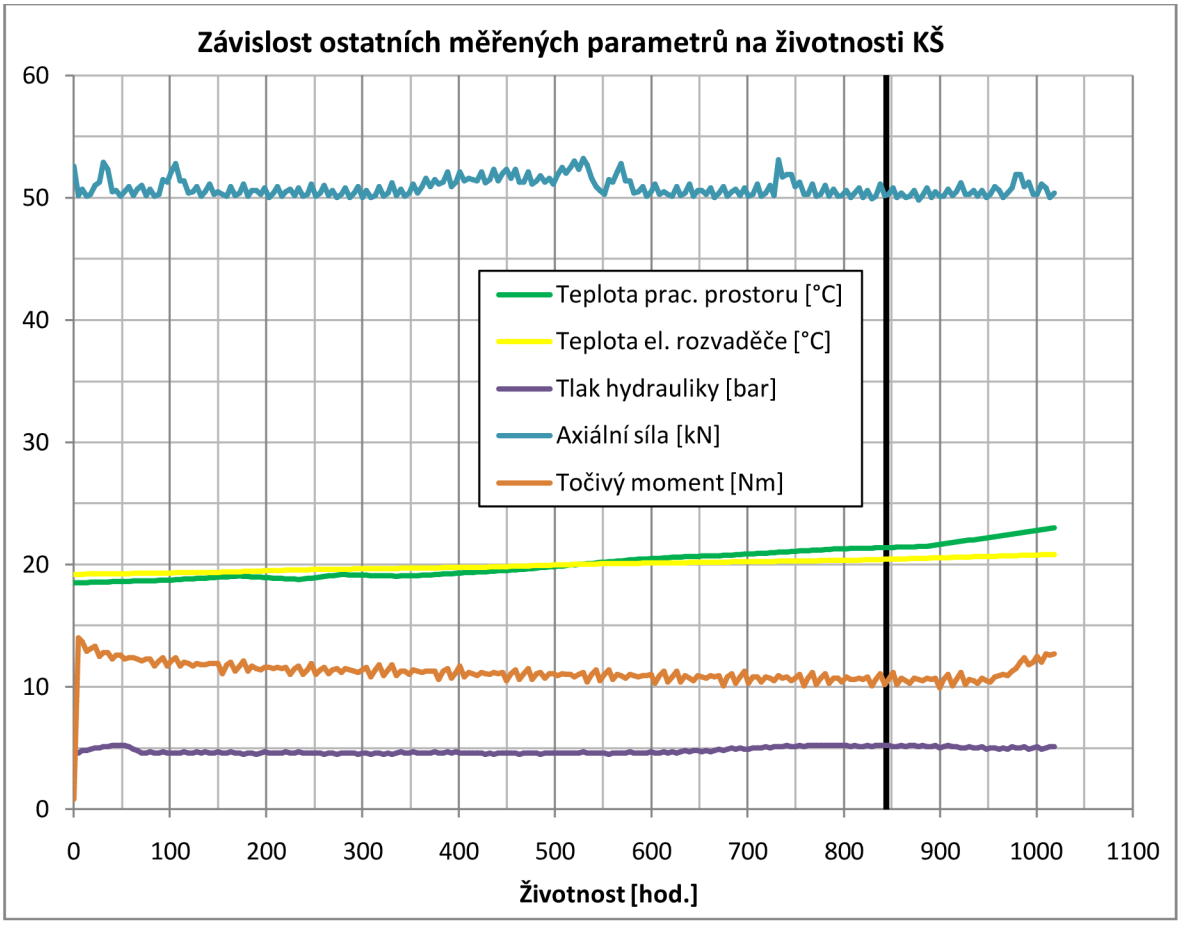

Obr. 27 Závislost vibrací na životnosti první dvojice KŠ.

Na obr. 27 je zobrazen průběh vibrací během testu životnosti. Vibrace byly měřeny na maticích prvního i druhého KŠ. První KŠ byl vyroben okružováním do tvrdého zakaleného polotovaru a následně přebroušen. Druhý KŠ byl vyroben okružováním do měkkého polotovaru, následně zakalen a přebroušen. Z průběhu vibrací lze vidět, že oba KŠ dosáhly vyšší hodnoty životnosti, než bylo vypočítáno. Vypočtená hodnota životnosti KŠ je 844,5 hodin. Testy byly zastaveny při 1019 hodinách, kdy oba KŠ dosáhly hodnot vibrací 1 mm/s. Z vyhodnocení testu lze vidět, že vibrace obou KŠ jsou podobné. Do 660 hodin byly hodnoty obou KŠ v rozmezí 0,2 až 0,6 mm/s. První KŠ ale těchto krajních hodnot dosahoval častěji než druhý. Od 660 hodin testu už vibrace neklesaly pod hodnotu 0,3 mm/s. Od hodnoty 740 hodin vibrace prvního KŠ neklesaly pod hodnotu 0,4 mm/s. Horní hodnoty vibrací ale pořád u obou KŠ nepřekročily 0,6 mm/s. Při vypočtené hodnotě teoretického konce životnosti byly vibrace obou KŠ stále v rozmezí 0,3 až 0,6 mm/s. Při 865 hodinách dosáhl první KŠ poprvé hodnoty 0,7 mm/s. Této hodnoty vibrací dosáhl druhý KŠ až při 920 hodinách trvání testu. Od hodnoty 980 hodin začaly vibrace prvního KŠ téměř exponenciálně růst. První hodnoty 1 mm/s bylo dosaženo v čase 996 hodin trvání testu. Při 1000 hodinách trvání testu byly vibrace druhého KŠ v rozmezí 0,7 až 0,8 mm/s. Hodnoty vibrací 1 mm/s dosáhl druhý KŠ v čase 1019 hodin, kdy byl také test zastaven.




Obr. 28 Závislost teploty na životnosti první dvojice KŠ.

Na obr. 28 je zobrazen průběh teploty během testu životnosti. Podobně jako vibrace, tak i teplota byla měřena v maticích obou KŠ. Při spuštění testu dosahovala teplota u obou KŠ stejné hodnoty, jako byla teplota v místnosti a to 18,6 °C. Z počátku testů byl patrný stejný růst teploty u obou KŠ a to až do hodnoty 27 °C v době trvání testu 45 hodin. Po 45 hodinách testování je zřejmé, že vzestup teploty prvního KŠ je výraznější než vzestup teploty u druhého KŠ. Rozdíl mezi teplotami je následně v průběhu testu okolo 2 °C. Při vypočteném konci životnosti dosahuje teplota prvního KŠ hodnoty 39,4 °C a teplota druhého KŠ je 37,8 °C. Růst teploty prvního KŠ je rovnoměrný přibližně až do 910 hodin. Poté začíná teplota růst výrazněji. V této době už také docházelo k vyšším hodnotám vibrací. Teplota druhého KŠ začíná výrazněji růst na konci testu, přibližně kolem 980 hodin. V čase 1019 hodin byl test zastaven kvůli vysokým vibracím. Při zastavení testu byla teplota prvního KŠ 42,1 °C a druhého KŠ 38,6 °C.

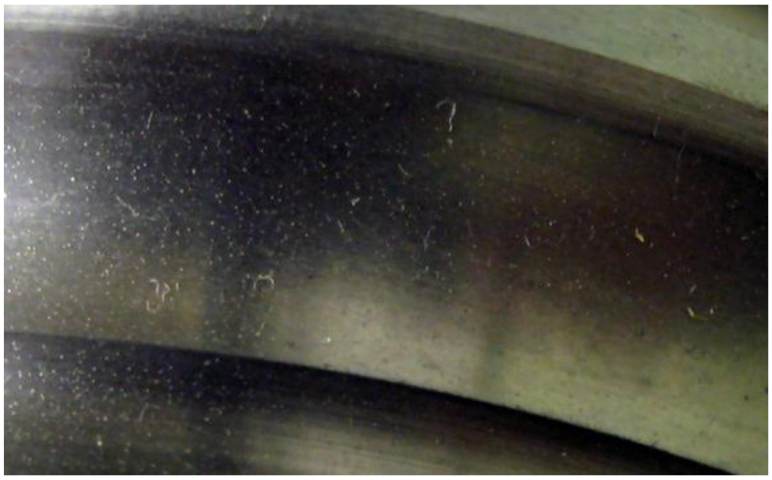



Obr. 29 Závislost ostatních měřených parametrů na životnosti první dvojice KŠ.

V obr. 29 jsou zobrazeny průběhy ostatních měřených parametrů při testu životnosti. Lze vidět, že teplota pracovního prostoru i teplota v elektrickém rozvaděči jsou na začátku testu téměř totožné. Při ukončení testu dosahovala teplota v pracovním prostoru hodnoty 23 °C a teplota v rozvaděči dosahovala hodnoty 20,8 °C. Axiální síla, která je vyvozena pomocí hydraulického předepínacího mechanismu, byla nastavena na hodnotu zatížení 50 kN. Z průběhu této axiální síly vyplývá, že hodnota nebyla po celou dobu testu přesně 50 kN, ale kolísala v rozmezí 50 až 53 kN. Tlak hydrauliky se po celou dobu testu pohyboval v hodnotách okolo 5 barů. Při spuštění testu a rozjetí motoru došlo k nárůstu točivého momentu, který následně začal klesat, až se jeho velikost ustálila na hodnotě kolem 11 Nm. Při vysokých hodnotách vibrací na konci testu stouply i hodnoty točivého momentu. Momenty nulové velikosti při změně směru pohybu matice v krajních polohách KŠ byly z vyhodnocených dat odfiltrovány. Z uvedených údajů je patrné, že je zařízení schopno udržovat zvolené a nastavené podmínky po celou dobu testu téměř konstantní.

Z průběhu naměřených hodnot sledovaných parametrů shodně zatížených KŠ zhotovených rozdílnou technologií je zřejmé dosažení stanovené životnosti u obou variant. Drobný rozdíl je patrný po překročení doby zatěžování o cca 20 % nad stanovenou životnost, kdy KŠ zhotovený technologií okružováním do zakaleného materiálu začíná vykazovat zhoršení chodu projevující se výraznějším nárůstem vibrací a teploty. Tento stav je zřejmě způsoben zhoršujícími se podmínkami odvalování kuliček v profilu valivé dráhy. Po rozboru jednotlivých komponent obou KŠ po ukončení testu, nebyly nalezeny na povrchu

profilu závitu hřídelí (obr. 30) žádné povrchové vady, dokládající poškození funkční povrchové vrstvy profilu závitu. Mírné deformace byly zjištěny pouze na kuličkách (obr. 31) a to ve vyšší míře právě u prvního KŠ, který byl zhotovený technologií okružováním do zakaleného polotovaru. Stav kuliček je dle zkušeností KSK obvykle ovlivněn geometrickými nepřesnostmi komponent a ne technologií výroby a použitého tepelného zpracování. Pro dosažení stavu jednoznačného poškození dráhy profilu závitu hřídele by bylo nutné v testu pokračovat i přes vysoké hodnoty vibrací a možnost poškození testovacího zařízení.



Obr. 30 Povrch profilu závitu hřídele.

a) b)

Obr. 31 Kuličky testovaných KŠ – a) první KŠ, b) druhý KŠ.

Z výše uvedeného vyplývá, že použitá technologie zhotovení závitu nemá vliv na dosažení stanovené životnosti testovaných KŠ a obě technologie jsou tedy použitelné pro všechny aplikace KŠ.

## 5.3 Testy druhé dvojice kuličkových šroubů

Druhá dvojice KŠ byla vyrobena stejnou technologií výroby. Polotovar byl nejprve vyhrubován okružováním, následně zakalen a broušen. Odlišný byl způsob kalení. První KŠ z této dvojice byl kalen laserem a druhý byl kalen indukčně. Jedná se o stejný typ i rozměr KŠ, jako v případě první testované dvojice. Podle výsledků první testované dvojice bylo rozhodnuto, že tato dvojice se zatíží axiální silou 80 kN. Otáčky byly nastaveny, jako v prvním případě na hodnotu 200 $min^{-1}$. Kalení KŠ laserem nebylo doposud nikde publikováno, proto nebylo možné odhadnout, jak budou výsledky vypadat. Při kalení laserem není zakalená vrstva tak hluboká, jako v případě indukčního kalení. V případě laserového kalení je hloubka zakalené vrstvy okolo 1 mm. U indukčního kalení je hloubka zakalené vrstvy 3 až 6 mm. Při laserovém kalení je také výrazná hranice mezi tvrdým martenzitickým povrchem a měkkým feriticko – perlitickým podkladem kalené vrstvy. U indukčního kalení tato hranice není tak výrazná. Proto je předpoklad, že životnost laserově kaleného KŠ nebude tak vysoká, jako v případě indukčně kaleného KŠ. Cílem tohoto testu je zjistit, zda laserové kalení KŠ vyhovuje interním požadavkům KSK a normě DIN ISO 3408.

Materiál obou testovaných KŠ je ocel 54SiCr6 dle normy ČSN EN 10089 (dle ČSN normy ocel 14 260). Její chemické složení s mechanickými a fyzikálními vlastnostmi jsou zobrazeny v tab. 12 a tab. 13.

### 5.3.1 Vypočtené teoretické hodnoty životnosti

Vztahy pro výpočet životnosti jsou totožné jako v případě první dvojice.

Nejprve je nutné stanovit sílu předepnutí matice KŠ dle vztahu (1). Hodnota tohoto předepnutí se nastavuje při montáži KŠ.

$$F_v = 0{,}1 \cdot C_a = 0{,}1 \cdot 86\,560 = 8\,656\ N$$

Následně je nutné zkontrolovat, zdali platí podmínka dle vztahu (2). V případě, že podmínka platí, je vnější axiální zatížení rovno vnitřnímu zatížení.

$$80\,000 \geq 2{,}83 \cdot 8\,656$$
$$80\,000\ N \geq 24\,496{,}48\ N \implies F_{a(1),(2)} = 80\,000\ N$$

Tato podmínka je tedy splněna a vnitřní zatížení matice KŠ je vhodné pro testování vybrané dvojice KŠ a je rovno vnějšímu axiálnímu zatížení, které je vyvozeno pomocí hydraulického předepínacího mechanismu na testovacím zařízení.

Pokud je známa hodnota vnitřního napětí, lze dále stanovit hodnotu středního napětí dle vztahu (3).

$$F_{ma\,(1),(2)} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^{n} {F_{a\,(1),(2)}}^3 \cdot \frac{q_j}{100}} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^{1} 80\,000^3 \cdot \frac{100}{100}} = 80\,000\ N$$

Z výpočtu je patrné, že hodnota středního vnitřního napětí je rovna vnější axiální síle. Je-li známa hodnota středního vnitřního napětí, lze dále stanovit životnost KŠ v otáčkách dle vztahu (4).

$$L_{1,2} = \left(\frac{C_a \cdot f_m}{F_{ma\,(1),(2)}}\right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{86\,560 \cdot 1{,}25}{80\,000}\right)^3 \cdot 10^6 = 2\,474\,069\,min^{-1}$$

Je-li známa životnost v otáčkách, lze dále stanovit životnost v hodinách dle vztahu (5). Otáčky testovaných KŠ jsou 200 min$^{-1}$.

$$L_h = \frac{L_{1,2}}{n_m \cdot 60} = \frac{2\,474\,069}{200 \cdot 60} = 206{,}2\,hod.$$

Stanovená teoretická životnost KŠ v hodinách dosahuje hodnoty 206,2 hodin. Dosažení této životnosti je výrobcem garantováno s 90% spolehlivostí. Podle tab. 15 a vztahu (6) lze stanovit životnost v hodinách pro jinou hodnotu spolehlivosti.

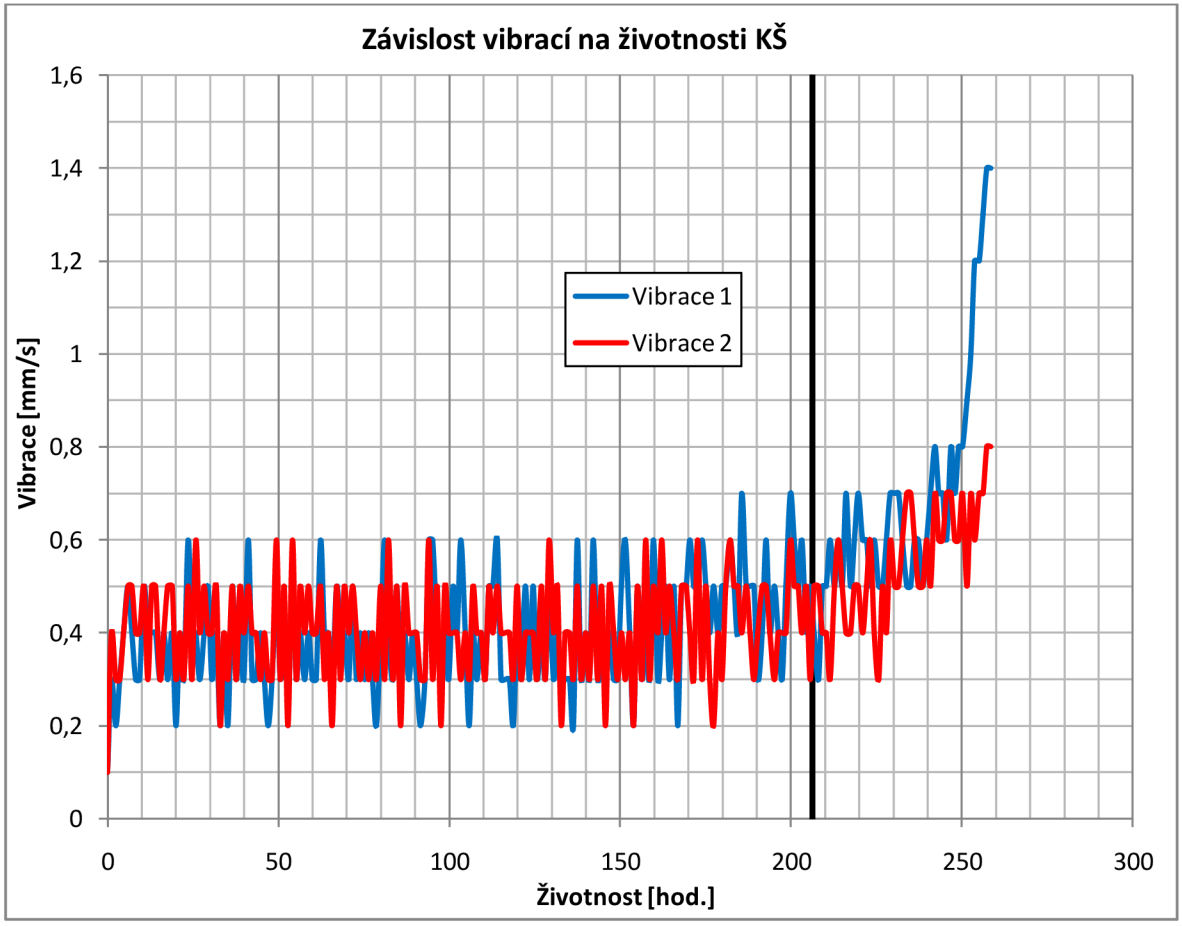
Tab. 15 Životnost KŠ pro různý faktor spolehlivosti [5].

| Spolehlivost [%] | $f_{a1}$ | Životnost [hod.] |
|---|---|---|
| 90 | 1,00 | 206,2 |
| 95 | 0,62 | 127,8 |
| 96 | 0,53 | 109,3 |
| 97 | 0,44 | 90,7 |
| 98 | 0,33 | 68,0 |
| 99 | 0,21 | 43,3 |

Z tab. 15 je zřejmé, že s 99% spolehlivostí je garantována životnost 43,3 hodin a s 90% spolehlivostí je garantována životnost 206,2 hodin. Stejně jako v případě první dvojice KŠ platí, že tyto hodnoty jsou správné pouze pro námi zvolené KŠ a testovací podmínky (vyvozená axiální síla 80 kN a otáčky 200 min$^{-1}$).

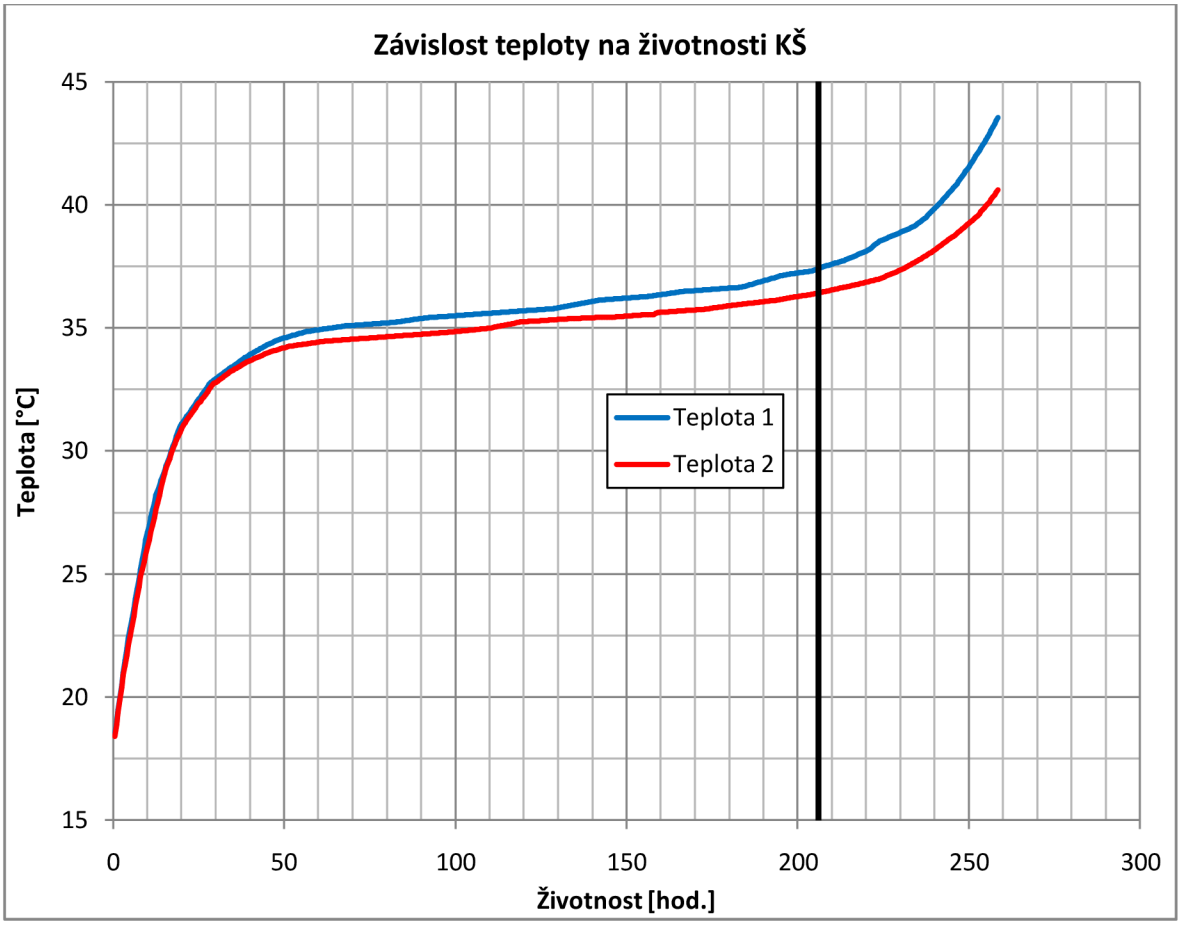
### 5.3.2 Vyhodnocení testů

Stejně jako v případě první testované dvojice, tak testy životnosti druhé dvojice probíhaly v prostorách firmy KSK na testovacím zařízení. Četnost ukládání dat byla nastavena opět na 10 minut.



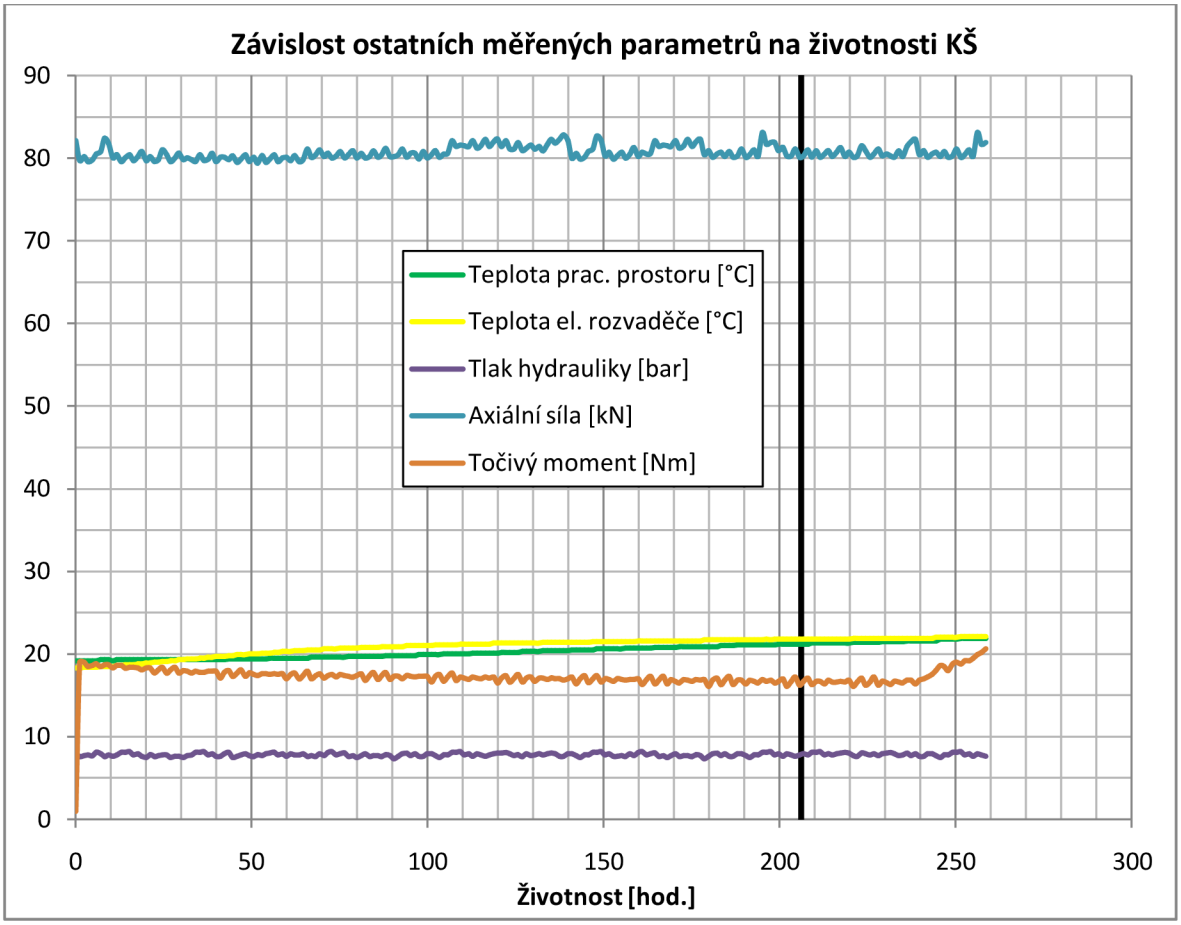

Obr. 32 Závislost vibrací na životnosti druhé dvojice KŠ.

Na obr. 32 je zobrazen průběh vibrací během testu životnosti. Po začátku testu až do 20 hodin se vibrace obou KŠ pohybovaly v rozmezí 0,3 až 0,5 mm/s. Od 20 hodin se vibrace pohybovaly v rozmezí 0,2 až 0,6 mm/s. Z průběhu vibrací je zřejmé, že vibrace laserově kaleného KŠ těchto krajních hodnot v rozmezí 0,2 až 0,6 mm/s dosahují častěji než u druhého indukčně kaleného KŠ. V čase 186 hodin dosáhl poprvé laserově kalený KŠ hodnoty 0,7 mm/s. Při dosažení vypočítané teoretické životnosti se vibrace obou KŠ pohybovaly v rozmezí 0,3 až 0,5 mm/s. Po čase 206,2 hodin se vibrace prvního KŠ pohybovaly v rozmezí 0,5 až 0,7 mm/s a vibrace druhého KŠ byly 0,3 až 0,6 mm/s. Po uplynutí 230 hodin testu se zvýšily vibrace druhého KŠ do intervalu 0,5 až 0,7 mm/s. V 250 hodinách testu se prudce zvýšily vibrace prvního KŠ. V čase 258 hodin již bylo zřejmé, že vibrace laserem kaleného KŠ se rapidně zhoršují. Proto v tomto čase došlo k zastavení testu, aby se zabránilo případnému poškození testovacího zařízení. Při ukončení testu vibrace prvního KŠ dosahovaly hodnot 1,4 mm/s a vibrace druhého KŠ byly 0,8 mm/s.




Obr. 33 Závislost teploty na životnosti druhé dvojice KŠ.

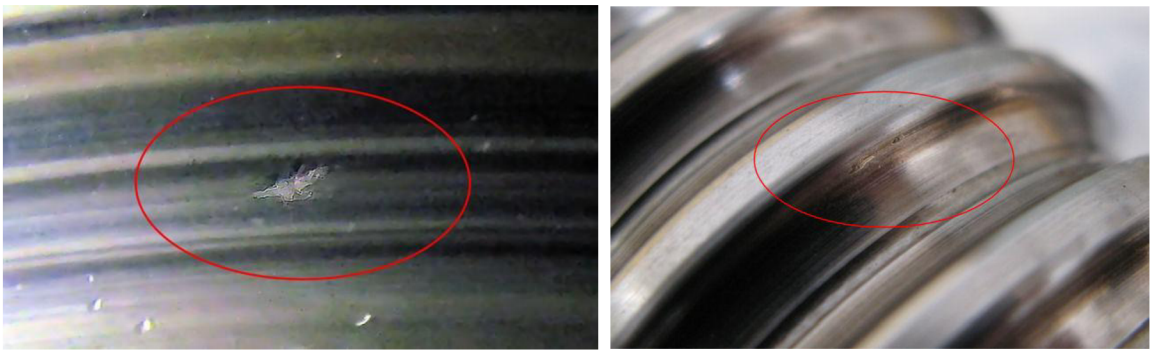
Na obr. 33 je zobrazen průběh teplot matic při testování druhé dvojice KŠ. Počáteční teploty jsou stejné jako teplota v místnosti a to 18,4 °C. Do 25 hodin trvání testu jsou nárůsty teplot přibližně stejné. Po 25 hodině testu už lze vidět rozdíly mezi teplotami obou KŠ. Zhruba od 50 hodin testování je rozdíl mezi teplotami přibližně 0,5 °C. Až na drobné výkyvy obou teplot je tento rozdíl téměř stejný až do 180 hodiny testování. Od 185 hodin trvání testu je patrné mírné zvýšení nárůstu teploty u prvního KŠ. V čase stanoveného teoretického ukončení životnosti byla teplota prvního KŠ 37,5 °C a teplota druhého KŠ byla 36,5 °C. Po překročení stanovené životnosti dochází stále k nárůstu teplot u obou KŠ. Nárůst teploty u prvního KŠ je ale výraznější. V čase 258 byl test zastaven kvůli vysokým hodnotám vibrací u prvního KŠ. Teplota v čase zastavení u prvního KŠ byla 43,5 °C a u druhého KŠ 40,6 °C. Rozdíl mezi konečnými teplotami je tedy přibližně 3 °C.




Obr. 34 Závislost ostatních měřených parametrů na životnosti druhé dvojice KŠ.

Obr. 34 zobrazuje průběhy ostatních měřených parametrů během testu životnosti. Průběh teploty pracovního prostoru a teploty v rozvaděči je téměř totožný jako v případě první testované dvojice KŠ. Obě teploty se pohybovaly téměř ve stejném rozmezí, i jejich nárůst byl podobný. Při ukončení testu v čase 258 hodin byla teplota pracovního prostoru 21,9 °C a teplota v elektrickém rozvaděči byla 22,1 °C. Axiální síla vyvozená hydraulickým předepínacím mechanismem byla nastavena na hodnotu 80 kN. V průběhu testu nebyla tato nastavená hodnota konstantní a pohybovala se v rozmezí 80 až 83 kN. Tlak hydrauliky se po celou dobu testu pohyboval okolo hodnoty 8 barů. Z průběhu točivého momentu lze vypozorovat, že při spuštění testu došlo k nárůstu hodnot, které se následně ustálily na hodnotách okolo 17 Nm. V čase 240 hodin došlo vlivem zvýšeným vibrací k trvalému růstu hodnot točivého momentu motoru.

Z průběhu naměřených hodnot sledovaných parametrů shodně zatížených KŠ zhotovených stejnou technologií, ale s rozdílným tepelným zpracováním profilu závitu je zřejmé dosažení stanovené životnosti u obou variant. Výrazný rozdíl je patrný po překročení doby zatěžování o cca 21 % nad stanovenou životnost, kdy KŠ s profilem závitu zakaleným laserem začíná vykazovat zhoršení chodu projevující se výrazným nárůstem vibrací a teploty. Po rozboru jednotlivých komponent obou KŠ po ukončení testu, byly nalezeny na laserem zakaleném povrchu profilu závitu hřídele povrchové vady (obr. 35), dokládající poškození funkční povrchové vrstvy profilu závitu. U KŠ zhotoveného s využitím indukčního kalení byly zjištěny pouze mírné deformace na kuličkách (obr. 36).



Obr. 35 Povrchové vady laserem zakaleného hřídele KŠ.

Obr. 36 Kulička indukčně kaleného KŠ.

Z výše uvedeného vyplývá, že použitá technologie tepelného zpracování laserem, která zakalí povrch profilu do relativně malé hloubky, má vliv na vznik únavových vad. Ke vzniku vad došlo až po překročení stanovené životnosti testovaného KŠ o cca 21 %. Technologie je tedy rovněž vhodná pro aplikaci ve výrobě KŠ s doporučením na ty aplikace, kde indukční kalení není z hlediska speciální konstrukce hřídele realizovatelné, nebo by vneslo nežádoucí tvarové deformace.

Ve společnosti KSK bylo laserové pracoviště pořízeno v rámci projektu OPPI Potenciál začátkem roku 2014 a proto se jedná o jednu z prvních aplikací této technologie pro tepelné zpracování KŠ s předpokladem jejího dalšího vývoje.

Další otázkou v porovnání technologií tepelného zpracování povrchů hřídelí KŠ je finanční efektivnost, jejíž zkoumání se tato diplomová práce nevěnuje.

# ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo posoudit životnost kuličkových šroubů při různé technologii výroby a tepelného zpracování profilů valivých drah. Testování kuličkových šroubů probíhalo v prostorách firmy Kuličkové šrouby Kuřim, a.s. Pro testování bylo pořízeno testovací zařízení, které umožňuje současné testování dvojice kuličkových šroubů. Dvojice testovaných kuličkových šroubů je zatěžována stejnými testovacími podmínkami, ale mohou se lišit v technologii výroby a tepelného zpracování. Testovací zařízení umožňuje snímat důležité parametry, jako jsou vibrace a teploty kuličkových šroubů, které jsou zaznamenány a následně vyhodnoceny. V této diplomové práci byly provedeny testy a vyhodnocení dvou dvojic kuličkových šroubů. První dvojice byla vyrobena odlišnou technologií výroby se stejným následným tepelným zpracováním. Druhá dvojice byla vyrobena stejnou technologií výroby s odlišným následným tepelným zpracováním.

U první dvojice byl jeden kuličkový šroub vyroben okružováním do zakaleného polotovaru s následným broušením. Druhý kuličkový šroub byl okružován do měkkého polotovaru a následně proběhlo broušení. Tepelné zpracování bylo u obou stejné, a to indukční kalení. Z důvodu lépe rozložené kalené vrstvy v případě druhého kuličkového šroubu byl předpoklad, že životnost tohoto kuličkového šroubu bude vyšší než v případě prvního kuličkového šroubu. Podle normy DIN ISO 3408-5 byla stanovena teoretická životnost na 844,5 hodin. V průběhu testu byly patrné vyšší vibrace u prvního kuličkového šroubu. Testovací zařízení bylo nastaveno na zastavení testu v případě, že vibrace obou kuličkových šroubů dosáhnou hodnoty 1 mm/s. Této hodnoty bylo u obou kuličkových šroubů dosaženo v čase 1019 hodin. Oba kuličkové šrouby tedy přesáhly stanovenou životnost a to o cca 20 %. Po ukončení testu došlo k rozebrání kuličkového šroubu. Na povrchu závitu profilu hřídele kuličkového šroubu nebyly zjištěny žádné povrchové vady. Bylo zjištěno pouze mírné opotřebení kuliček obou kuličkových šroubů. Z tohoto zjištění tedy vyplývá, že obě technologie výroby kuličkových šroubů nemají vliv na stanovenou životnost.

V případě druhé dvojice byly oba kuličkové šrouby vyrobeny stejnou technologií, a to okružováním měkkého polotovaru s následným broušením. Rozdíl byl v použité technologii tepelného zpracování. První kuličkový šroub byl kalen laserem a druhý indukčně. Při využití laserového kalení není dosaženo tak hluboké zakalené vrstvy jako v případě indukčního kalení. Byl tedy předpoklad, že životnost laserem kaleného kuličkového šroubu bude nižší než při kalení konvenční indukční metodou. Podle normy DIN ISO 3408-5 byla stanovena teoretická životnost 206,2 hodin. Test byl zastaven v čase 258 hodin, kdy byly vibrace laserem kuličkového šroubu 1,4 mm/s a bylo zřejmé, že se budou i nadále zvyšovat. Stanovená životnost byla překročena cca o 21 %. Po ukončení testu opět došlo k rozebrání kuličkového šroubu. Ve valivé dráze, která byla zakalena laserem, byly zjištěny povrchové vady vlivem tenké zakalené vrstvy. I přes tuto skutečnost kuličkový šroub dosáhl stanovené životnosti. Jelikož se jednalo o jeden z prvních laserem kalených kuličkových šroubů, je předpoklad, že se tato technologie bude nadále vyvíjet a bude dosaženo vyšších časů životnosti.

# SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. Brno: VUT, 1991, 214 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0361-6.
2. MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2, přeprac., rozš. Praha: MM publishing, 2010, 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.
3. STRAPINA, Tomáš. *Deskripce kuličkových šroubů.* Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.
4. Základy tepelného zpracování kovů. HAMERNÍK, Jan. *Jan Hamerník* [online]. 2004 [vid. 2014-02-26]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
5. *Kuličkové šrouby Kuřim* [online]. © 1996 - 2014 [vid. 2014-01-31]. Firemní materiály a podklady. Dostupné z: http://www.ks-kurim.cz/
6. Ball Screw Tutorial. NSK. *Ball Bearings and Roller Bearings l NSK Americas | NSK* [online]. 2012-05-13 [vid. 2014-02-01]. Dostupné z: http://www.nskamericas.com/cps/rde/xbcr/na_en/Ball_Screw_Tutorial.pdf
7. Hřebeny a pastorky - Průmyslová a domovní automatizace - REM-Technik s.r.o. *Průmyslová a domovní automatizace - REM-Technik s.r.o.:* [online]. 2013 [vid. 2014-02-01]. Dostupné z: http://www.rem-technik.cz/foto/1000-700/58-734-hrebeny-a-pastorky.png
8. Lineární pohon znamená přesnost a spolehlivost. ZEMAN, Zdeněk. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008-07-09 [vid. 2014-02-02]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/linearni-pohon-znamena-presnost-a-spolehlivost.html
9. Lineární pohony na vzestupu. KAVÁN, Martin. HIWIN. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006-11-22 [vid. 2014-02-02]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/linearni-pohony-na-vzestupu.html
10. Polohovací systémy - lineární osy. HIWIN. *Hiwin s.r.o. - Lineární technika, vedení, motory, pohony, kuličkové šrouby* [online]. 2013-09-30 [vid. 2014-02-03]. Dostupné z: www.hiwin.cz/media/files/05_Polohovaci_systemy_Linearni_osy.pdf
11. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
12. JULIŠ, Martin. *Prezentace do předmětu HMT Strojírenské materiály a tepelné zpracování*. 2012/2013. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
13. KALENÍ A POPOUŠTĚNÍ. DRIML, Bohuslav. *Elitalycea.wz.cz* [online]. [2013] [vid. 2014-02-05]. Dostupné z: http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf
14. Tepelné zpracování oceli - teorie 2. *VŠCHT - ÚSTAV KOVOVÝCH MATERIÁLŮ A KOROZNÍHO INŽENÝRSTVÍ.* [online]. 2009 [vid. 2014-03-08]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_oceli/teorie2.htm

15. Tepelné zpracování slitin Fe-C. MOLLIKOVÁ, Eva. *Nauka o materiálu - distanční výuka* [online]. 2010 [vid. 2014-03-08]. Dostupné z: ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/nomd/tep%20zprac%20slitin%20Fe-C.doc
16. Dotazy. MARTENZIT. *MARTENZIT s.r.o - indukční ohřevy, zakázková indukční kalírna* [online]. 2011 [vid. 2014-03-08]. Dostupné z: http://www.martenzit.cz/Dotazy.php
17. BÍLKOVÁ, Lenka. *Nízkoteplotní a kryogenní zpracování cementačních součástí*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Miloslav Kouřil, CSs.
18. Laserové kalení. TRUMPF. *TRUMPF Česká Republika* [online]. 2011 [vid. 2014-03-09]. Dostupné z: http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu/laserove-kaleni.html
19. Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů. SCHUBERT, Steffan. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2014-03-09]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html
20. Laserové kalení proces s velkým potenciálem. BULLING, Dieter. *Tribológia* [online]. 2012 [vid. 2014-03-09]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22012/laserove-kaleni-proces-s-velkym-potencialem.html
21. Zvyšování životnosti povrchu laserovým kalením. NĚMEČEK, Stanislav. *Tribológia* [online]. 2011 [vid. 2014-03-09]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22011/zvysovani-zivotnosti-povrchu-laserovym-kalenim.html
22. Laserové kalení. MATEX PM. *Matex PM* [online]. 2011 [vid. 2014-03-08]. Dostupné z: http://www.matexpm.com/cz/laserove-kaleni
23. TruDisk - TRUMPF United Kingdom. TRUMPF. *TRUMPF United Kingdom* [online]. 2013-08-12 [vid. 2014-03-15]. Dostupné z: http://www.uk.trumpf.com/en/products/laser-technology/products/solid-state-lasers/disk-lasers/trudisk.html
24. EMUGE - FRANKEN * EMUGE-techinfo. EMUGE-FRANKEN. *EMUGE-FRANKEN* [online]. 2012-01-31 [vid. 2014-03-27]. Dostupné z: www.emuge.sk/sub/emuge.sk/images/subory/technicke_informacie/zs10038_czgb_technick_prruka.pdf
25. HUMÁR, Anton. Technologie I - Technologie obrábění, 2. část. *Odbor technologie obrábění* [online]. 2004-10-20 [vid. 2014-03-27]. Dostupné z: ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf
26. WAGNER – thread rolling attachments. *WAGNER®-Werkzeugsysteme Müller GmbH*[online]. 2009-03-11 [vid. 2014-04-10]. Dostupné z: www.wagner-werkzeug.de/fileadmin/pdf/Prospekt-SRW-ENG.pdf
27. Thread and Form Rolling. REED MACHINERY, Inc. *Reed Machinery, Inc.* [online]. 2007-11-29 [vid. 2014-04-15]. Dostupné z: www.reed-machinery.com/pdf/thread-and-form-rolling-tech-data-master.pdf

28. Závitové válcovací hlavy. NAREX MTE. *NAREX MTE - výrobce přesných nástrojů* [online]. 2009-02-04 [vid. 2014-04-15]. Dostupné z: www.narexmte.cz/prospekty/In_Zhv.pdf
29. Rollwalztechnik-Gewindewalzmaschine. *Rollwalztechnik Abele + Höltich GmbH* [online]. 2014-04-20 [vid. 2014-04-20]. Dostupné z: http://www.rollwalztechnik.de/uploads/pics/Rollwalztechnik-Gewindewalzmaschine-100X.jpg
30. ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 193 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2336-6.
31. *Grumant s.r.o. - prodej řezných nástrojů* [online]. 2013 [vid. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.grumant.cz/
32. Thread Whirling - What it is, and How Does it Work? *Genswiss - Tooling and Accessories for Swiss-Type CNC Machines* [online]. 2012 [vid. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.genswiss.com/whirldata.htm
33. *Leistritz* [online]. 2008 [vid. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.leistritzcorp.com/index.cfm
34. Whirled Piece. ROBERTS, John. *CUTTING TOOL ENGINEERING Plus* [online]. 2005-03-23 [vid. 2014-04-28]. Dostupné z: ctemag.com/pdf/2005/0504-Whirling.pdf
35. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
36. HUMÁR, Anton. Technologie I - Technologie obrábění, 3. část. *Odbor technologie obrábění* [online]. 2004-10-20 [vid. 2014-04-30]. Dostupné z: ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
37. BOHDAN BOLZANO. *Bolzano* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-01]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/
38. Ball Screw Repair, Refurbishment& Reverse Engineering Services. *Thread-Craft* [online]. © 2013 [vid. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.threadcraft.com/images/ball_screw_repair_large.jpg
39. DIN ISO 3408-5. *Kugelgewindetriebe - Statische und dynamische axiale Tragzahlund Lebensdauer*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
40. Doimak RER-SP. DOIMAK. *Doimak - Innovative Grinding Technology* [online]. 2008-07-22 [vid. 2014-05-07]. Dostupné z: www.doimak.es/Folletos/fichas/rer-sp.pdf
41. Ball Screw Repair, Refurbishment & Reverse Engineering Services. *Thread-Craft* [online]. © 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://www.threadcraft.com/images/ball_screw_repair_large.jpg
42. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

# SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka/Symbol | Jednotka | Popis |
|---|---|---|
| A | [%] | tažnost |
| ARA | [-] | anizotermický rozpad austenitu |
| $C_a$ | [N] | základní dynamická únosnost |
| $C_o$ | [N] | základní statická únosnost |
| CNC | [-] | Computer Numeric Control – číslicové řízení pomocí počítače |
| ČVUT | [-] | České vysoké učení technické |
| $D_w$ | [mm] | průměr kuliček kuličkového šroubu |
| $D_0$ | [mm] | jmenovitý průměr kuličkového šroubu |
| $F_{a(1),(2)}$ | [N] | vnitřní zatížení |
| $F_v$ | [N] | zatížení od předepnutí |
| Fma(1),(2) | [N] | střední vnitřní zatížení |
| $F_{1,2}$ | [N] | vnější axiální zatížení |
| HB | [-] | Brinell Hardness – tvrdost dle Brinella |
| HRC | [-] | Rockwell Scale Hardness – tvrdost dle Rockwella |
| HSC | [-] | High Speed Cuting – vysokorychlostní obrábění |
| KSK | [-] | Kuličkové šrouby Kuřim, a.s. |
| KŠ | [-] | kuličkový šroub |
| $L_h$ | [hod.] | životnost v hodinách |
| $L_{ha}$ | [hod.] | trvanlivost s ohledem na požadovanou spolehlivost |
| $L_{1,2}$ | [$min^{-1}$] | životnost v otáčkách |
| LAN | [-] | Local Area Network – lokální síť |
| PLC | [-] | Programmable Logic Controller – programovatelný log. automat |
| R | [N/μm] | axiální tuhost |
| Ra | [μm] | průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu |
| $R_m$ | [MPa] | mez pevnosti |
| $R_{p0,2}$ | [MPa] | mez kluzu |
| VBD | [-] | vyměnitelná břitová destička |
| Z | [%] | kontrakce |
| $f_{a1}$ | [-] | faktor spolehlivosti |
| $f_m$ | [-] | koeficient vlivu jakosti a stavu materiálu |
| i | [-] | počet nosných závitů kuličkového šroubu |
| k | [$N/\mu m^{3/2}$] | součinitel tuhosti |
| $n_m$ | [$min^{-1}$] | otáčky |
| $q_j$ | [%] | poměrná doba působení zatížení |
| α | [°] | úhel styku mezi kuličkami a šroubem |

# SEZNAM PŘÍLOH

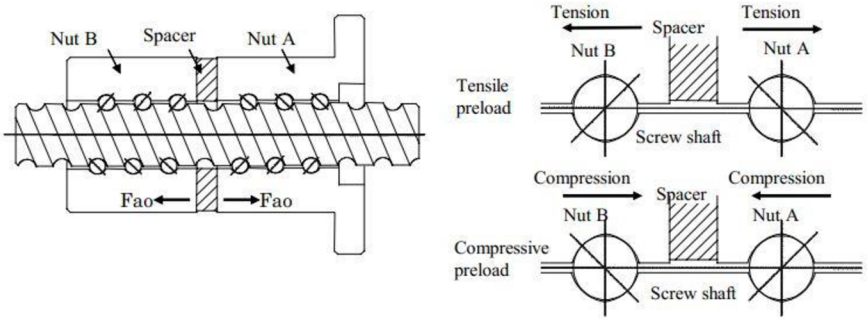
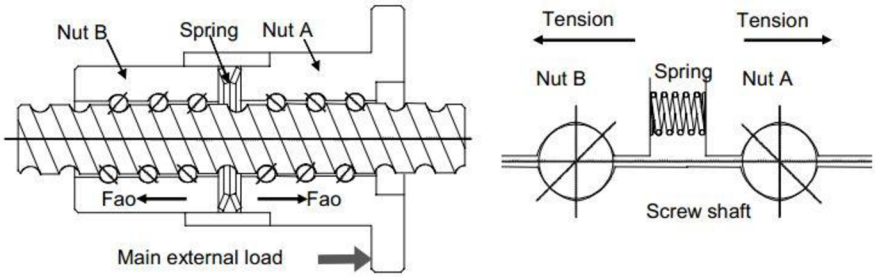
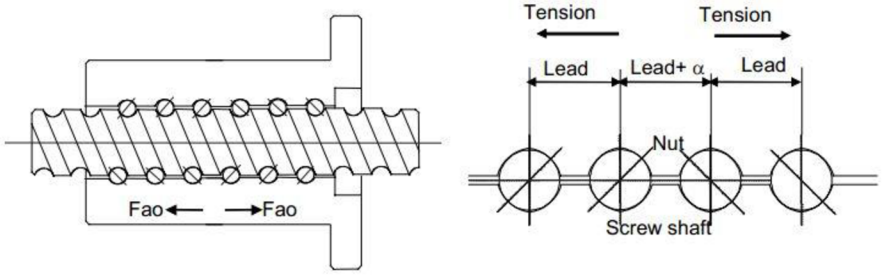
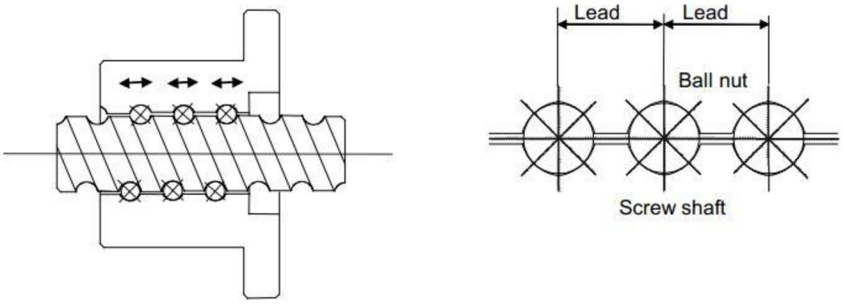
Příloha 1 Vymezení vůle mezi maticí a šroubem

Příloha 2 Popis a zobrazení parametrů kuličkového šroubu

Příloha 3 Výkresy kuličkového šroub K63x20 – 3+3/AP+A

# PŘÍLOHA 1

Vymezení vůle mezi maticí a šroubem [2].

| Způsob předepnutí | Poznámka |
|---|---|
|  | Předepnutí mezi maticemi je nastaveno pomocí vloženého distančního kroužku. Vhodné pro delší matice s výbornou tuhostí. |
|  | Předepnutí mezi maticemi je nastaveno pomocí pružiny. Vhodné pro delší matice a menší tuhost. |
|  | Předepnutí je provedeno pomocí nabroušení rozdílného stoupání. Vhodné pro střední matice. |
|  | Předepnutí je dosaženo výběrem vhodné velikosti kuliček. Vhodné pro krátké šrouby a matice s menší tuhostí. |

# PŘÍLOHA 2 (1/2)

Popis a zobrazení parametrů kuličkového šroubu [5].



## 3.1. Popis a význam použitých symbolů

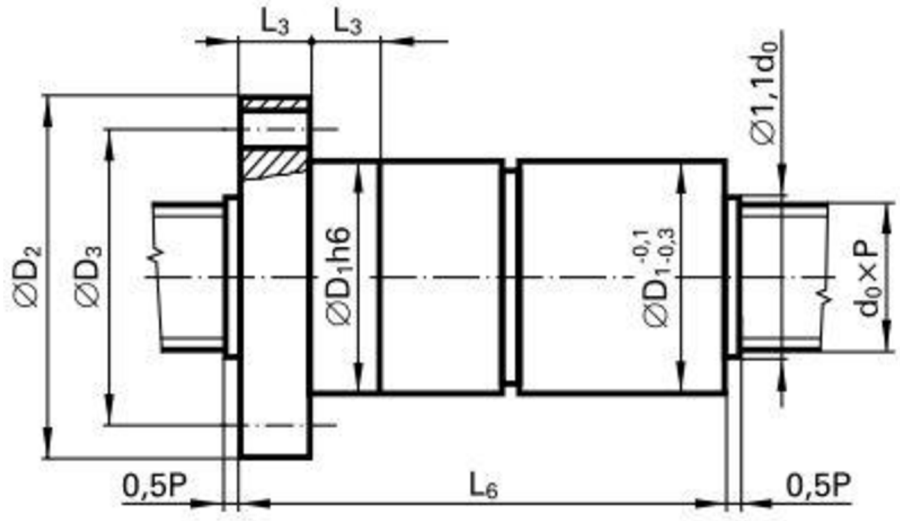
**Jednotlivé typy konstrukcí matic kuličkových šroubů jsou specifikovány v rozměrových tabulkách těmito parametry**

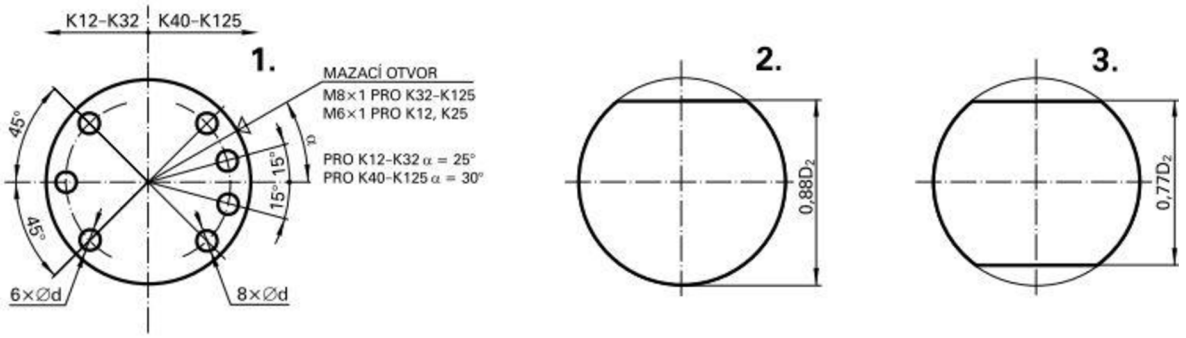
| parametr | popis |
|---|---|
| $d_o$ | **jmenovitý průměr** je průměrem válce, který obsahuje středy kuliček dotýkajících se v teoretických bodech v závitové drážce na hřídeli a v závitové drážce v tělese kuličkové matice |
| P | **stoupání** dráha kuličkové matice pro jednu otáčku hřídele kuličkového šroubu |
| i | **počet nosných závitů** počet nosných stoupání závitové drážky v kuličkových maticích |
| $D_w$ | **průměr kuliček** průměr kuliček osazených v maticové jednotce |
| L, D, t, ... | **rozměrové hodnoty** jmenovité hodnoty průměrových a délkových rozměrů pro jednotlivá provedení kuličkových matic a maticových jednotek |
| $C_o$ | **základní statická únosnost** je statické zatížení, které odpovídá celkové trvalé deformaci kuličky a oběžné dráhy v nejnamáhavějším místě styku, rovné 0,0001 průměru kuličky |
| $C_a$ | **základní dynamická únosnost** je stálé, neměnné zatížení, které může teoreticky kuličkový šroub přenášet při základní trvanlivosti jednoho milionu otáček |
| k | **součinitel tuhosti** je míra tuhosti kuličkového převodu mezi hřídelem a maticí, která je určena geometrickým tvarem závitové drážky a materiálovými parametry |
| R | **axiální tuhost** je míra elastické deformace matice vůči hřídeli při daném zatížení |
| E | **typ převodu** v maticové jednotce je použit externí převod kuliček pomocí vnějšího převáděcího elementu, který umožňuje převod kuliček přes několik nosných závitů |
| I | **typ převodu** v maticové jednotce je použit interní převod kuliček pomocí vnitřního převáděcího elementu (lůžka), který je samostatný pro každý nosný závit v matici. Rozměry matic s tímto typem převodu odpovídají DIN 69051. |
| S | **typ převodu** v maticové jednotce je použit interní převod kuliček pomocí vnitřního převáděcího elementu (segmentu), který je použit pro převod axiálním otvorem v matici. Rozměry matic s tímto typem převodu odpovídají DIN 69051. |

## 3.2. Příklad označování kuličkových šroubů

# PŘÍLOHA 2 (2/2)

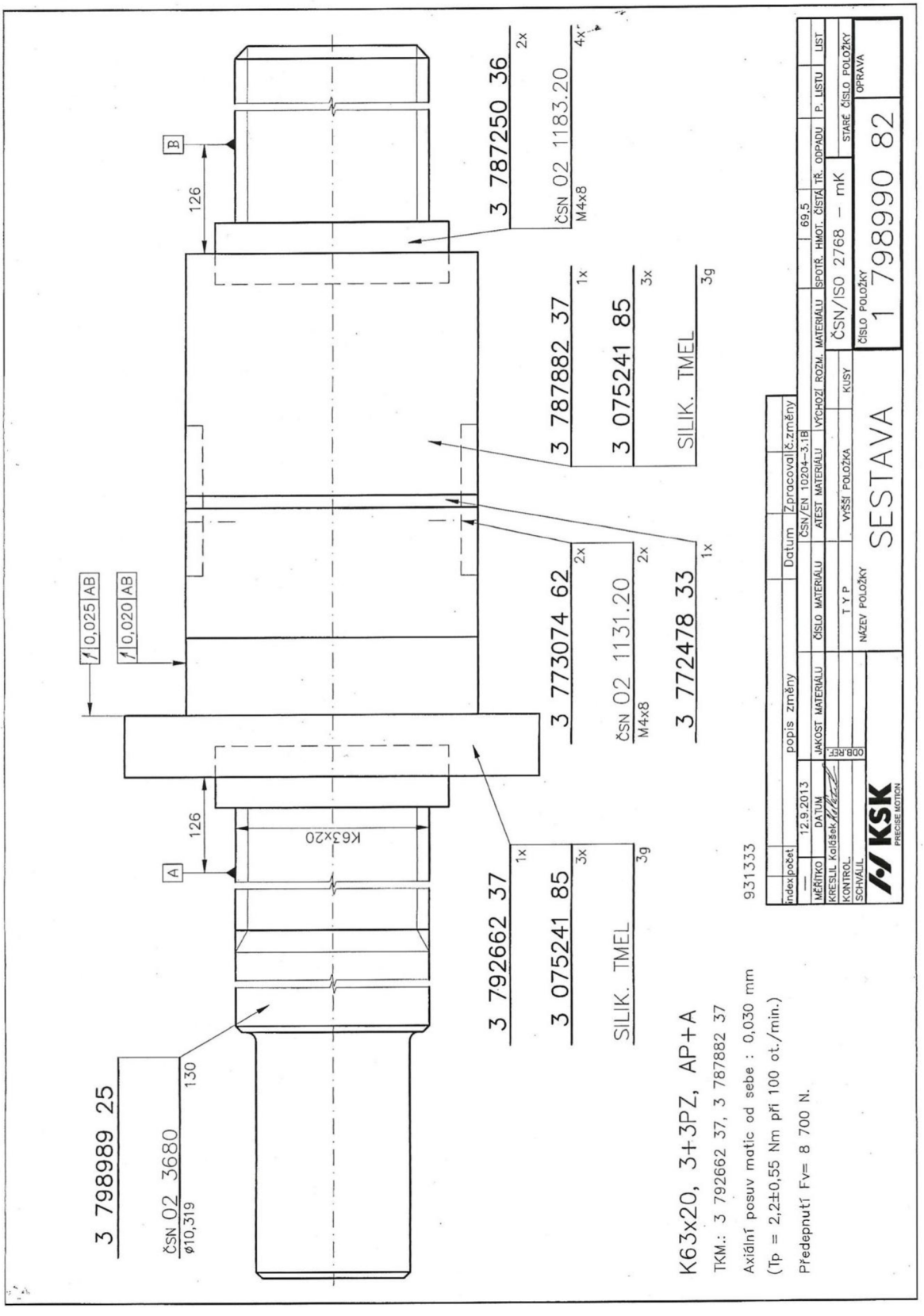
Popis a zobrazení parametrů kuličkového šroubu [5].



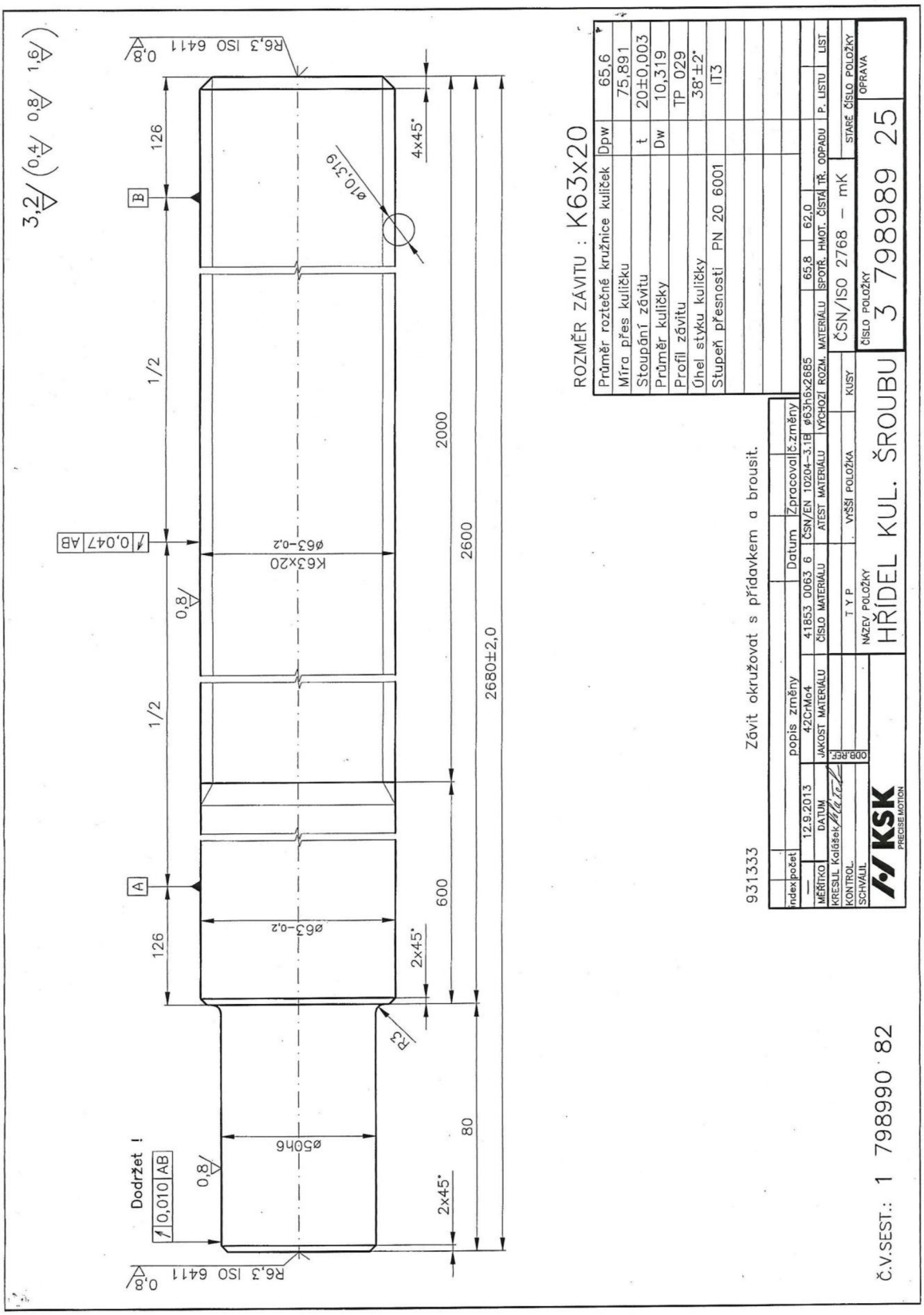
# PŘÍLOHA 3 (1/3)

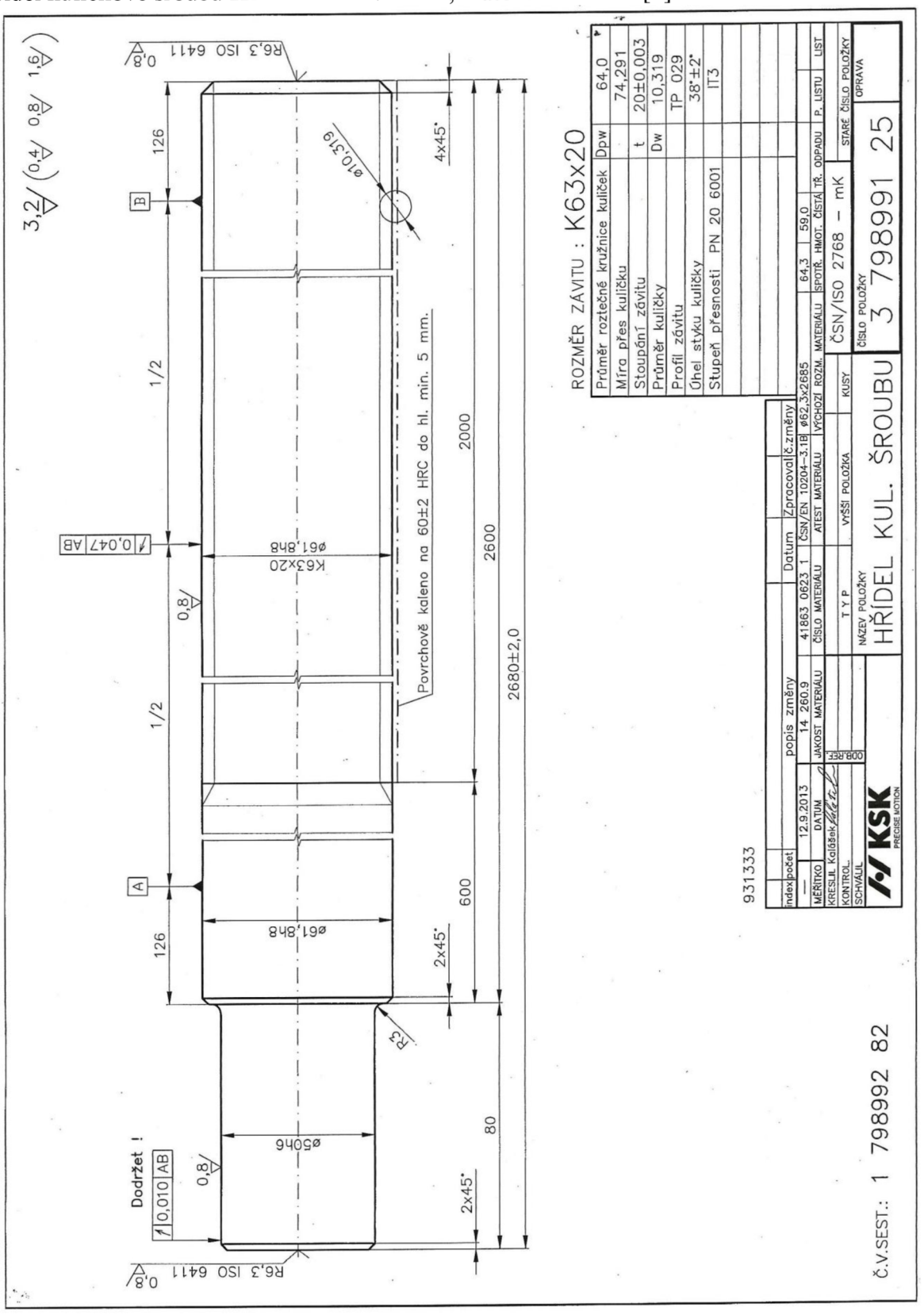
Sestava kuličkové šroubu K63x20 – 3+3/AP+A [5].



# PŘÍLOHA 3 (2/3)

Hřídel kuličkové šroubu K63x20 – 3+3/AP+A, materiál 42CrMo4 [5].



# PŘÍLOHA 3 (3/3)

Hřídel kuličkové šroubu K63x20 – 3+3/AP+A, materiál 54SiCr6 [5].