



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

OPTIMALIZACE SOUČÁSTÍ SPOJOVANÝCH LISOVÁNÍM ZA TEPLA

OPTIMALIZATION OF PARTS BONDED BY HOT CRIMPING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ladislav LIŠKÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ladislav Liškář

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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 bakalářské práce:

Optimalizace součástí spojovaných lisováním za tepla

v anglickém jazyce:

Optimization of parts bonded by hot crimping

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě táhel se ohřátá trubka zalisuje na vlnitý dřík a tím se vytvoří pevné spojení. Počet vln na dříku je proměnný parametr a je závislý na velikosti dříku a trubky. S cílem snížení nákladů má být provedena optimalizace takto vytvářeného spoje, která zajistí požadovanou pevnost spoje při minimálním počtu vln na dříku. Při hledání minimálního počtu vln je nutné vzít v úvahu měnící se velikost trubky. Výstupem práce je nalezení konkrétního počtu vln pro danou velikost trubky.

Cíle bakalářské práce:

Na podkladě rozboru současného stavu zhotovování lisovaných spojů budou v práci specifikovány dílčí problémy k řešení. Bude navržen plán a popsány metody testování spojů. Po výrobě potřebných vzorků a provedení testů budou analyzovány výsledky experimentů. Na základě provedené analýzy budou optimalizovány konstrukce vytvářených spojů. Součástí řešení bude vyčíslení úspor dosažených optimalizací spojů.

Seznam odborné literatury:

1. PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. Brno: CERM, s.r.o., 2003. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.
2. PÍŠTĚK, Václav. Aplikovaná mechanika. Brno: VUT Brno, 1987.
3. HOSFORD, William F. and Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.
4. ASM-Metals Handbook: Forming and Forging. Vol.14. USA ASM International, 2004. S.978. ISBN 0-87170-020-4

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 13.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce popisuje postup při ověřování koncepční myšlenky firmy. Návrh a výroba prototypů, testy a jejich vyhodnocení, vyčíslení úspor. Byly zvoleny dvě varianty spoje s rozdílnou tloušťkou stěny trubky. u nich byl zkrácen dřík na d a 3 zalisované drážky. Tyto varianty byly následně podrobeny dvěma testům statickým a jednomu testu dynamickému. Doporučením pro firmu je pokračovat s dalšími fázemi vývoje zkráceného dříku o jednu drážku oproti současné výrobě.

Klíčová slova

redukce hmotnosti, lisování, přechovací zkouška, zkouška tahem, vysokocyklový testy

ABSTRACT

The thesis describes the procedure for verifying the conceptual ideas of the company. Design and production of prototypes, testing and evaluation, quantifying savings. Two variants of crimped bond were chosen. For each was length of shaft changed to three and four crimped grooves. These prototypes were tested in two static and one dynamic tests. Recommendation for company is continue with other phases of development for shaft with four grooves.

Key words

weight reduction, pressing, upsetting test, tensile test, high-cycle test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LIŠKÁŘ, Ladislav. *Optimalizace součástí spojovaných lisováním za tepla*. Brno, 2015. 46s,2 přílohy,CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Optimalizace součástí spojovaných lisování za tepla** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Ladislav Liškář

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Doc. Ing. Zdeňku Lidmilovi CSc. za věcné připomínky a rady při tvorbě bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval firmě TRW Dačice, a.s. a jejím zaměstnancům, zejména pak panu Ing. Michalu Pittlovi a jeho týmu, za podporu v době mého studia, za odborné vedení během tvorby práce, hlavně pak za rady a připomínky při tvorbě prototypových dílů a jejich testování. Rád bych také poděkoval své rodině za hmotnou i nehmotnou podporu během celého studia.

OBSAH

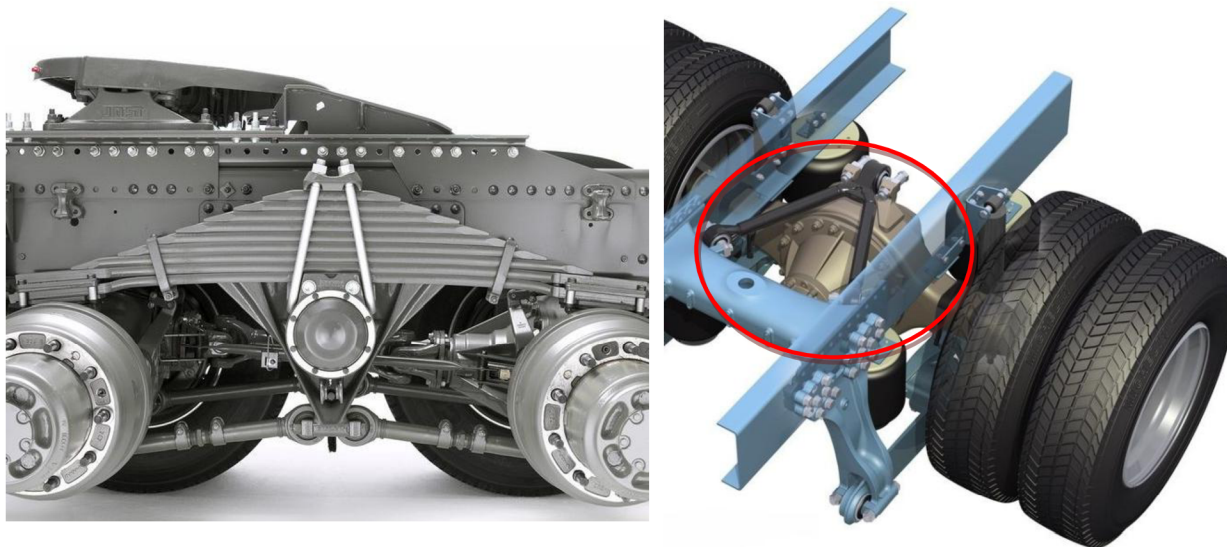
ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 rozbor zadání	9
2 Teoretické základy tváření.....	10
2.1 Deformace	10
2.2 Vliv teploty na tváření	11
2.3 Tření při tvářecích pochodech	12
2.4 Nerovnoměrná deformace	13
2.5 Analýzy tvářecích procesů.....	14
3 popis součásti a její funkce	16
4 Technologie výroby	18
4.1 Technologie opracování hlav.....	18
4.2 Technologie výroby čepů	19
4.3 Technologie spojů táhel.....	20
5 Analýza spoje	22
5.1 Pěchovací zkouška	22
5.2 Postu při návrhu výpočtu.....	25
5.3 Výsledky výpočtu procesu	26
6 Příprava testovacích prototypů	29
6.1 Výroba prototypů	30
7 Testování	32
7.1 Statický test tahem	32
7.2 Statický test krutem	32
7.3 Dynamický test Tah/tlak.....	33
8 Vyhodnocení	35
8.1 Výsledky testu tahem	35
8.2 Výsledky testu krutem.....	37
8.3 Výsledky dynamického testu.....	39
8.3.1 vyhodnocení trubky Ø 48x5 mm	39
8.3.2 vyhodnocení trubky 50x6 mm	42
9 Ekonomické hodnocení	43
10 Závěry	45

ÚVOD

Jedním z hlavních cílů automobilového průmyslu je v současnosti snižování emisí CO₂. S tím souvisí snižování hmotnosti vyšším využitím materiálu součástí při zachování původních charakteristických vlastností, jako je životnost, výkon, nebo schopnost odolávat stejnému zatížení apod. I při výrobě nákladních automobilů je dnes trendem snižování spotřeby paliva, kde snižování hmotnosti je jednou z možných cest.

Tato bakalářská práce je zaměřena na vodící a řídicí tyče nákladních automobilů, přesněji pak na optimalizaci spojení několika součástí v celistvý díl lisovaným spojem, kde je ocelová trubka nalisována na obrobený tvarový dřík. Slisováním dojde k velice pevnému spojení. Společnost TRW automotive a. s., pro kterou je bakalářská práce zpracována, v současné době nezná limity tohoto spojení, avšak některé již vyráběné součásti a výzkum konkurenčních součástí ukazují možné rezervy tohoto spoje. Účelem práce je stanovit nejnižší možnou délku spojení zajišťující pevný a spolehlivý spoj a maximalizovat tak úporu materiálu a strojních časů při obrábění.

Společnost TRW automotive a.s. je jedním z předních světových dodavatelů pro automobilový průmysl. Pro osobní automobily tak i pro ty nákladní. Sortiment společnosti se skládá z několika skupin odlišných výrobních odvětví, patří sem: elektronické bezpečnostní systémy, součásti řízení, zavěšení kol, brzdy a bezpečnostní prvky (airbagy, bezpečnostní pásy). Závod řízení ve městě Dačice se zabývá vývojem a výrobou součástí řízení a zavěšení náprav. Patří sem zejména vnější, vnitřní a kulové čepy, duté čepy, tyčky řízení, řídicí ramena náprav. Pro těžký průmysl jsou to hlavně vodící tyče (viz Obr. 1) a pogumované čepy pro nákladní vozidla, autobusy nebo pro speciální aplikace jako traktory, rychlovlaky a jiné.



Obr. 1 Příklady použití vodících tyčí [9]

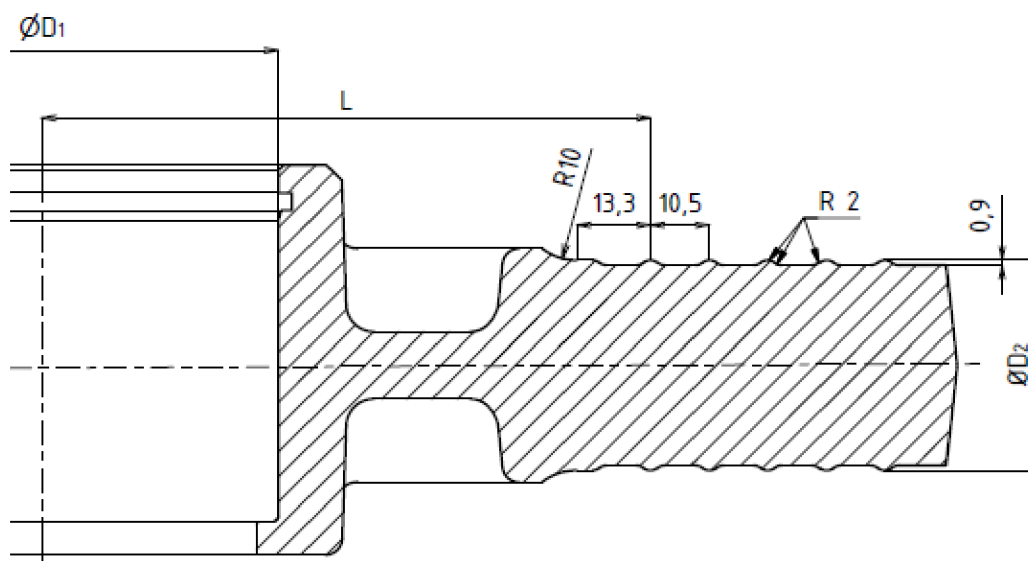
1 ROZBOR ZADANÍ

Účelem práce je otestovat koncept firmy, založený na zkrácení dříku lisovaného spoje při zachování požadované pevnosti spoje. Koncept poukazuje na fakt, že současný stav 5drážek lisovaného spoje je předimenzovaný a pro dostačující pevnost spoje by měl postačit dřík kratší, resp. se čtyřmi nebo až třemi drážkami. Již v minulosti byly provedeny testy, kdy délka dříku byla zkrácena z původních sedmi drážek na současných pět. Společnost se nyní rozhodla otestovat limity spoje. Práce je věnovaná základní myšlence vývoje, takzvané CV (Concept validation) fázi vývoje. V případě úspěchu konceptu naváže na fázi CV tzv. fáze DV (Design validation), při této fázi je testovaný design již doveden do stavu odpovídající skutečné výrobě (výroba nástroje, prototypy odpovídajícího tvaru). Následně je aplikován na sériové součásti. Ve fázi vývoje (CV) je důležitým faktem výroba prototypů při využití současných sériových součástí a jejich modifikací za účelem omezit náklady spojené s daným vývojem.

Cíle bakalářské práce jsou:

- analyzovat současný stav lisovaného spoje
- navrhnout a popsat plán testů
- analyzovat výsledky provedených testů
- navržení vhodné varianty pro další výzkum na základě testů
- vyčíslení úspor pro danou optimalizaci

Geometrie optimalizovaného dříku je vyobrazena na obrázku č. 2. Výchozí průměr D_2 je základním proměnným parametrem spoje a ve výrobě lze najít dříky s průměry 22,85; 28,4; 37,8 a 47,8 mm. Dalším závislým rozměrem je vzdálenost mezi osou hlavy a první drážkou dříku označená na obrázku jako L . Tento parametr je závislý na průměru dutiny pro čep D_1 . Ostatní rozměry dříku jsou vždy stejné. Pro každou velikost dříku je použita odpovídající trubka normalizovaného rozměru. Například pro dřík průměru 37,8 mm se využívá trubka o světlosti 38 mm a tloušťce stěny 5 nebo 6 mm.



Obr. 2 Rozměry dříku hlavy [8]

2 TEORETICKÉ ZÁKLADY TVÁŘENÍ [1] [2] [3] [5] [7] [13]

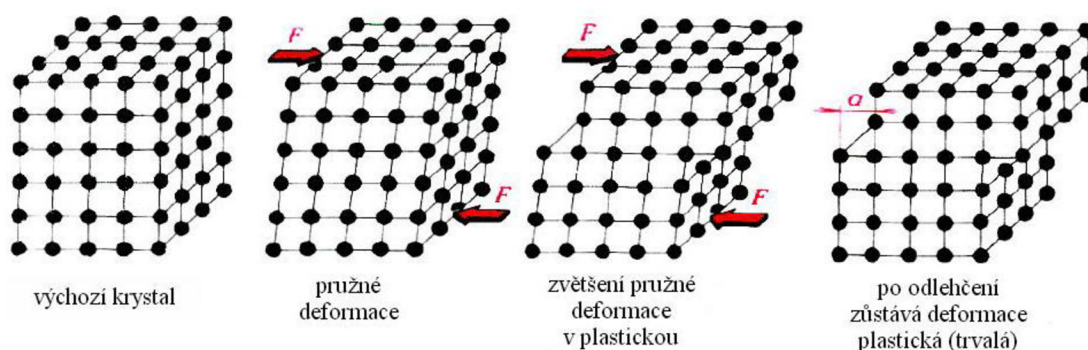
S ohledem na problematiku práce budou dále popsány základní pojmy důležité pro porozumění technologii tváření součástí. Tvářením rozumíme takovou činnost, při které je polotovár přetvářen do požadovaného tvaru výrobku působením vnějších sil. Materiál je přiveden do plastického stavu, kdy mění nejen svůj tvar, ale i mechanické vlastnosti. Výsledný výrobek musí být přetvořen do požadované formy bez porušení soudržnosti materiálu. Vlastnost materiálu, která vyjadřuje jeho schopnost být tvářen, se nazývá tvařitelnost materiálu.

2.1 Deformace [1] [2] [3] [7] [13]

Při zatížení tělesa vnější silou dochází k jeho deformaci. Podle toho zda se těleso vrátí do původního stavu po zániknutí vnější síly, či nikoli rozeznáváme deformaci Pružnou (vratnou) a Plastickou (trvalou). Oba druhy deformací jsou naznačeny na obrázku č.3.

- Pružná deformace je u kovových materiálu popsána Hookovým zákonem, který říká, že prodloužení materiálu (deformace) je přímo úměrná zatěžující síle. Při této deformaci dochází k posunu jednotlivých atomů bez porušení jejich vazeb, a proto se po zániknutí působící síly vrací do původního stavu a deformace tak zaniká.
- Plastická deformace v materiálu vzniká, pokud napětí překročí tzv. mez kluzu materiálu. Dochází k porušení meziatomových vazeb a k posunu jednotlivých atomů z jejich rovnovážných poloh. Plastickou deformaci lze dále rozdělit na deformaci stabilní a nestabilní. V případě stabilní dojde po zániknutí vnějších sil k zastavení deformace a těleso tak zůstane v daném tvaru. K deformacím nestabilním dochází po překročení meze pevnosti materiálu a deformace materiálu zde pokračuje i po zániknutí vnějšího zatížení a tvářený materiál se tak rozpadá. Takováto deformace je pro tváření nepřipustná.

Pro tváření kovů má největší význam deformace plastická, ale svůj vliv na konečný tvar výrobku má i deformace elastická. Velikost deformace je pak závislá na mnoha dalších vlivech. Příkladem těchto vlivů může být například teplota, rychlost deformace, tření mezi nástrojem a polotovarem.



Obr. 3 Schéma průběhu deformace [4]

Celkovou deformaci pak lze vyjádřit jako:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (1)$$

kde: ε_{el} je deformace pružná

ε_{pl} je deformace plastická

Poměrnou deformaci v jednotlivých směrech pak můžeme vyjádřit na příkladu pěchování hranolu o rozměrech h , b , l . Kde absolutní změny rozměrů jsou označeny Δh , Δb , Δl . Důležitou úlohu zde sehraje zákon o zachování objemu při plastické deformaci.

$$V = h \cdot b \cdot l = (h + \Delta h) \cdot (b + \Delta b) \cdot (l + \Delta l) \quad (2)$$

kde: V je objem hranolu

Poměrné deformace pak můžeme popsat jako poměry:

- $\epsilon_1 = h/\Delta h$ - vyjadřuje poměrné stlačení
- $\epsilon_2 = b/\Delta b$ - vyjadřuje poměrné rozšíření
- $\epsilon_3 = l/\Delta l$ - vyjadřuje poměrné prodloužení

Při větších plastických deformacích by jejich vyjádření pomocí poměrných deformací nevystihlo skutečnou hodnotu, proto se v praxi využívá častěji hodnoty skutečné neboli logaritmické deformace.

$$\varphi = \ln(1 + \epsilon) \quad (3)$$

Kde: φ je skutečná (logaritmická deformace)

ϵ je poměrná deformace

pro předchozí příklad pěchování hranolu pak lze skutečnou deformaci napsat například:

$$\varphi = \ln\left(\frac{l + \Delta l}{l}\right) \quad (4)$$

Obdobné vzorce pak lze napsat pro deformaci dalších dvou rozměrů, přičemž musí platit, že součet logaritmických deformací v těchto třech hlavních směrech musí být vždy roven nule.

2.2 Vliv teploty na tváření [1] [2] [3] [5] [7] [13]

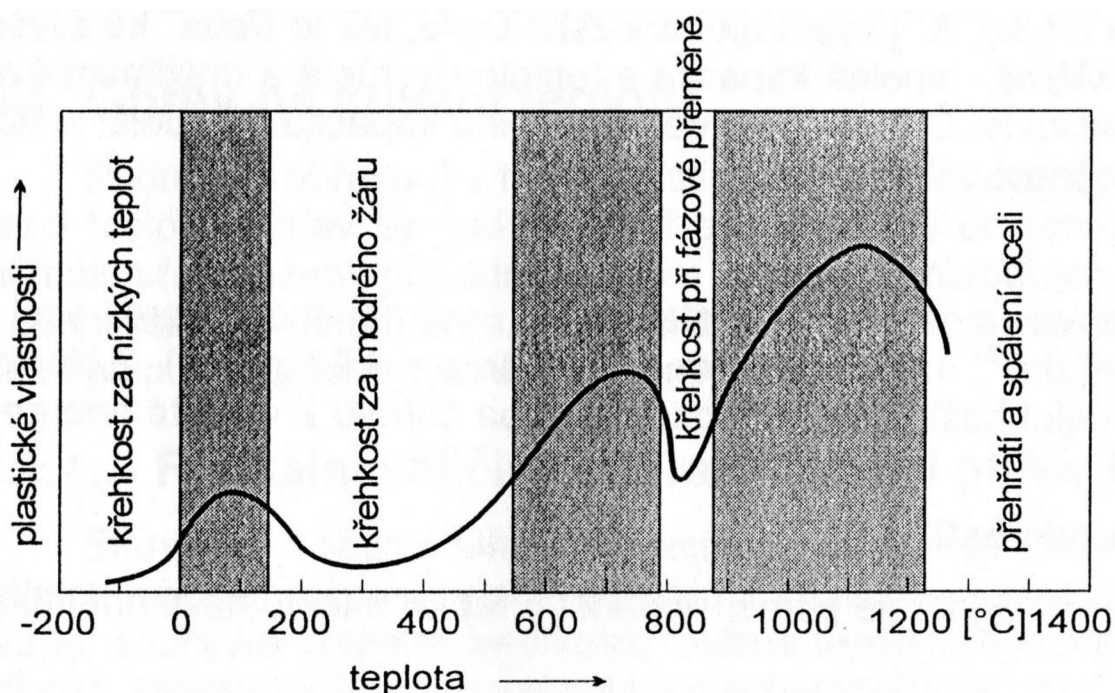
Teplota má zásadní vliv na mechanické vlastnosti materiálů. Vlivem zvýšené teploty dochází ke zvyšování plastických vlastností materiálu, při dosažení teplot kovací jsou v materiálu aktivovány tzv. uzdravovací procesy. Během nich dochází k obnově krystalické mřížky zrn tzv. rekrytalizací. Rekrytalizací nazýváme proces, při kterém jsou zrna plasticky deformované struktury obnovena na zrna s nedeformovanou strukturou. Rychlost rekrytalizace pak závisí na velikosti přetvoření, teplotě a chemickém složení. Závislost změny mezi plasticitou a teplotou tváření je u ocelí popsána funkcí na obrázku 12. Na obrázku jsou naznačena tři pásma křehkosti oceli a tři pásma se zvýšenou plasticitou vhodné pro tváření.

Podle teploty lze pak tváření rozdělit

- Tváření za studena - u ocelí se odehrává při teplotách nižších, než je jejich teplota rekrytalizace. Výsledkem je změna mechanických vlastností, hlavně pak zvýšení pevnosti a tvrdosti při současném snížení tažnosti.
- Tváření za poloohřevu- procesy probíhají při teplotách od 500°C do teplot počátku uzdravovacích procesů, přibližně 0,6 násobek teploty tavení. Dochází ke zlepšení přetvárných schopností, snížení přetvárných odporů. Horní teplota je omezena

nežádoucí oxidací povrchu. Touto metodou lze výhodně spojit některý výhody tváření za studena a tepla.

- Tváření za tepla- probíhá při teplotách vyšších než 0,6 násobek teploty tavení. Při tváření jsou spojeny procesy zpevnění a uzdravování a lze tak dosáhnout vyšších deformací. Zpevnění může být odstraněno částečně, nebo v některých případech úplně.



Obr. 4 Obecná změna plasticity v závislosti na teplotě [5]

Oxidace povrchu, nazývaná také okujemi nebo opalem, je ztráta objemu materiálu vlivem ohřevu. Okuje se začínají tvořit u ocelí při teplotách přibližně 700°C a velmi intenzivně se začínají tvořit při teplotách nad 1000°C. Množství okují lze snížit zkrácením doby, po kterou je ohřátý povrch vystaven okolí. Toho lze docílit zrychlením ohřevu například použitím indukčního ohřevu.

Dalším negativním vlivem při ohřevu může být oduhlíčení povrchu, ke kterému dojde při kontaktu povrchu materiálu s okolní atmosférou, hlavně pak působením CO_2 a H_2O . Oduhličení se na výrobku projeví snížením pevnosti, povrchové tvrdosti a obecně vlastností závislých na obsahu uhlíku. Oduhličení povrchu je významné zejména při nižších tzv. spodních kovacíh teplotách a může zasáhnout až do hloubky 2 mm průřezu.

2.3 Tření při tvářecích pochodech [1] [2] [3][7] [13]

Tření mezi nástrojem a polotovarem nazývané tření vnější, provází veškeré operace tváření. Fyzikální podstatu jevu tření, lze definovat jako odpor proti relativnímu pohybu dvou těles v místě jejich styku. Při tváření dochází v místě kontaktu nástroje a polotovaru ke klouzání materiálu po ploše nástroje. Tření tento pohyb zbrzdí a dochází tak k rozdílné deformaci v celém tělese. Vnější tření lze rozdělit do tří skupin na tření suché, polosuché a hydrodynamické. V případě tření suchého dochází k přímému styku nástroje a tvářeného tělesa, u tření polosuchého pak působí nesouvislá vrstva maziva. V posledním případě tření hydrodynamického je v místě styku souvislá vrstva maziva.

Pro nejjednodušší vyjádření třecí síly F_T můžeme využít Columbova zákona, který využívá pro velikost třecí síly velikost síly normálové a platí mezi nimi přímá úměrnost.

$$F_T = \mu \cdot F_N \quad (5)$$

Kde: μ je součinitel tření

F_N je normálová síla

Pokud výraz podělíme stykovou plochou S , dostáváme výraz

$$\tau = \mu \cdot \sigma_N \quad (6)$$

Kde: τ je smykové napětí na stykové ploše

σ_N je normálové napětí na stykové ploše

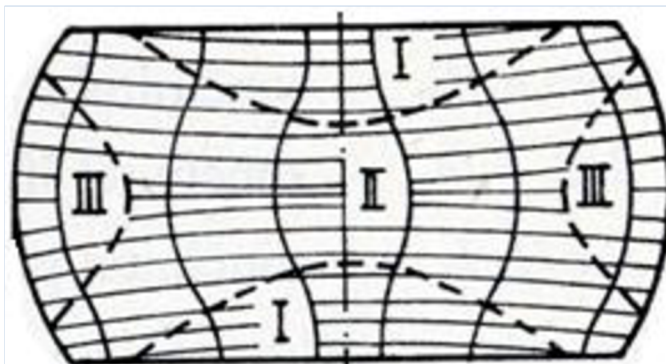
Vnější tření se může projevit při tváření jako pasivní činitel, kdy nepříznivě ovlivňuje stav napjatosti, deformační odpor, sílu, práci a životnost nástrojů, nebo jako aktivní činitel pak umožňuje, aby tvářecí proces vůbec mohl proběhnout (záběr kovu při válcování). Při pěchování poté vyvolává nerovnoměrnou deformaci.

Součinitel tření, který ovlivňuje velikost třecí síly je závislý na těchto parametrech:

- Povrchová jakost nástroje -největší vliv, čím menší drsnost povrchu tím nižší součinitel tření
- Povrchová jakost tvářeného kovu
- Chemické složení tvářeného kovu-při tváření za studena roste součinitel tření s obsahem uhlíku, při tváření za tepla se zanedbává
- Tvářecí teplota-zvyšování součinitele je příkládáno vzniku okují, snižování pak nižšímu deformačnímu odporu a tím lepšímu vyhlazení povrchu tvářeného kovu
- Pracovní rychlost nástroje-součinitel klesá s rostoucí rychlostí
- Mazivo-velmi výrazně snižuje tření a u některých procesů je dokonce nezbytnou součástí procesu

2.4 Nerovnoměrná deformace [1] [2] [3] [7] [13]

K ideální, nebo-li rovnoměrné deformaci může dojít jen při rovnoměrném stavu napjatosti, kterého lze dosáhnout například při tahové zkoušce (pouze do začátku tvoření krčku). V technologiích tváření se vždy mluví o deformaci nerovnoměrné. K jejím příčinám patří zejména vnější tření na stykové ploše s nástrojem, tvar pásma deformace a v neposlední řadě i nestejnoroďé vlastnosti tvářeného materiálu. Projevem



Obr. 5 Nerovnoměrná deformace při pěchování

nerovnoměrné deformace jsou nerovnoměrné zpevnění a uzdravování, což se ve výsledku projevuje rozdílným stupněm zpevnění, rozdílnou velikostí zrna a celkově tak rozdílnými mechanickými vlastnostmi v jednotlivých částech tělesa. Příklad

projevu nerovnoměrné deformace je popsán na obrázku č. 5, který ukazuje nerovnoměrnou deformaci válcového tělesa při pěchování. V oblasti I. je deformace zanedbatelná, vlivem vnějšího tření. K největším deformacím dochází v oblasti II. V poslední oblasti III se napjatost výrazně mění, mohou vznikat i tahová napětí způsobující podélné trhliny na povrchu. Deformace je zde střední velikosti.

2.5 Analýzy tvářecích procesů [1] [2] [3] [7] [13]

Aby tvářecí proces probíhal za optimálních podmínek a bylo dosaženo požadovaných výsledků, je nutné znát vlastnosti tvářeného materiálu. Tyto vlastnosti a zkoušky, kterými se zkoumají lze rozdělit na mechanické a technologické. Mechanické zkoušky slouží k získání základních plastických vlastností a deformačních odporů. Lze zjistit například mez kluzu, pevnost v tahu, rázovou pevnost nebo třeba poměrné prodloužení. Mezi tyto zkoušky lze zařadit zkoušku tahem, krutem, tlakem, nebo rázem v ohybu. Zkoušky technologické se využívají pro přiblížení se k napěťově deformačním podmínkám dané výrobní technologie a umožňují tak určení optimálních podmínek pro zpracování. Zjišťují se při nich vlivy parametrů, jako je teplota, rychlost deformace, dosažitelná velikost deformace. Patří sem zkoušky pěchovací, ohybové, děrovací a mnoho dalších. Při analýze tvářecích procesů pak lze popsat čtyři základní úlohy pro řešení daného procesu. Metody analýzy lze rozdělit na metody analytické a experimentálně analytické. Základní čtyři řešitelné úlohy jsou:

- stanovení tvářecí síly a přetvárné práce
- určení velikostí a průběhu zatížení (napjatosti) tvářecích strojů
- rozbor přetvoření a stanovení nejvýhodnějších tvarů a rozměrů polotovaru
- kritické podmínky přetvoření

Analytické metody využívají pro zjištění parametrů popsání děje matematickými metodami a následným výpočtem dané závislosti. Tyto metody jsou vhodné pro jednoduché typy úloh z hlediska geometrie. V technologické praxi bývají úlohy složitějšího charakteru, a proto se zde častěji využívá metod experimentálně analytických. Pokud však lze danou problematiku popsat matematickým vzorem, používají se v současné době častěji metody analytického výpočtu pomocí numerických metod, nejčastěji se využívá metody konečných prvků, dále jen MKP. Tato metoda spočívá v myšlence nahrazení objemu tělesa souborem geometricky jednoduchých podoblastí, tzv. konečných prvků.

Experimentálně analytické metody se využívají buď jako samostatné analýzy nebo častěji jako vhodné doplnění metod analytických. Mezi tyto metody patří:

- metoda přetvárného odporu
- metoda zviditelnění plastického toku
- mikroskopické metody
- doplňkové metody makroskopické

Velmi osvědčenou metodou makroskopického zkoumání je metoda vyvolání struktury vláken, která slouží pro zviditelnění přetvoření na tělese. Analýza spočívá v naleptání metalografického výbrusu přetvořeného tělesa, při němž dojde ke zvýraznění tzv. vláken v oceli. Tento jev je způsoben přítomností vměstků v materiálu, zejména sloučenin fosforu

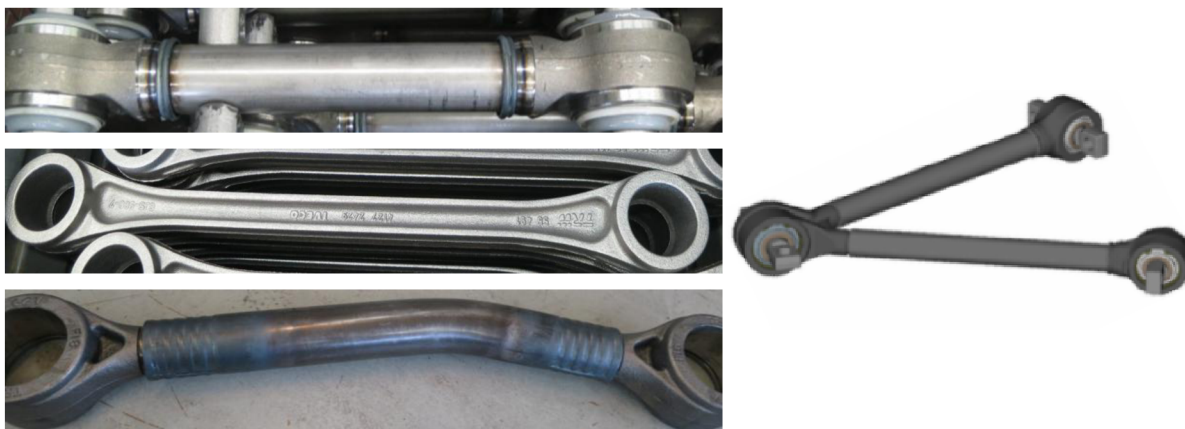
a síry. Protože tyto sloučeniny mají nižší teplotu tuhnutí, tuhnou v oceli jako poslední a tvoří tak obálku primárních zrn oceli. Při tváření dochází ke zploštění zrn a jejich prodloužení ve směru toku materiálu. Následnou rekrytalizací se ze zdeformovaných zrn vytvoří zrna nová, vměsky se ale díky své nízké difuzní rychlosti nepřemění. Po dosažení značného stupně deformace se pak po odleptání materiálu zvýrazní ve formě usměrněných vláken.

3 POPIS SOUČÁSTI A JEJÍ FUNKCE [10]

Vodící tyče (nebo také vodící táhla) se u nákladních automobilů používají pro spojení nápravy a kostry automobilu. Zajišťují správné vedení náprav v přímém i bočním směru. Díky gumovým kloubům, nebo-li silentblokům, umožňují omezený pohyb náprav, a to zejména při akceleraci, brzdění nebo při přejezdu nerovností. Omezují také vibrace a rázy přecházející do konstrukce vozu a tím zvyšují komfort i životnost celé soustavy. Podle velikosti vozidla a požadovaného zatížení náprav se vyrábí táhla s rozdílnou délkou (roztečí otvorů pro pogumované čepy), ale také s rozdílnými velikostmi těchto čepů. Samotná délka táhel je různá s každým dílem a může se pohybovat od 213 mm až po 1300 mm. Přitom se pak na jednom vozidle objevuje i několik těchto táhel s různou délkou, ale i samotným provedením. Jaké velikosti a konstrukční provedení jsou ve firmě TRW Dačice vyráběny popisuje následující kapitola

Obecně lze veškerý sortiment vodících tyčí rozdělit do dvou základních skupin na táhla přímá a táhla tvaru "V". Přímá pak lze rozdělit na táhla s rovnou a ohnutou trubkou. Podle typu technologie produkce pak rozeznáváme čtyři podskupiny. Příklady technologie produkce jednotlivých variant táhel jsou uvedeny na obrázku 6.

- Celistvé odlitky
- Svařovaná třením
- Lisovaná
- Se závitem

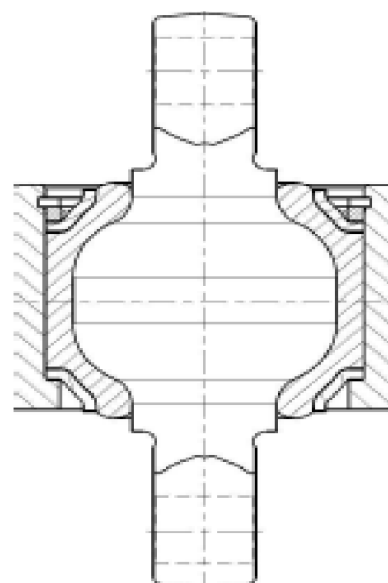


Obr. 6 Příklad táhel vyrobených různými technologiemi [10]

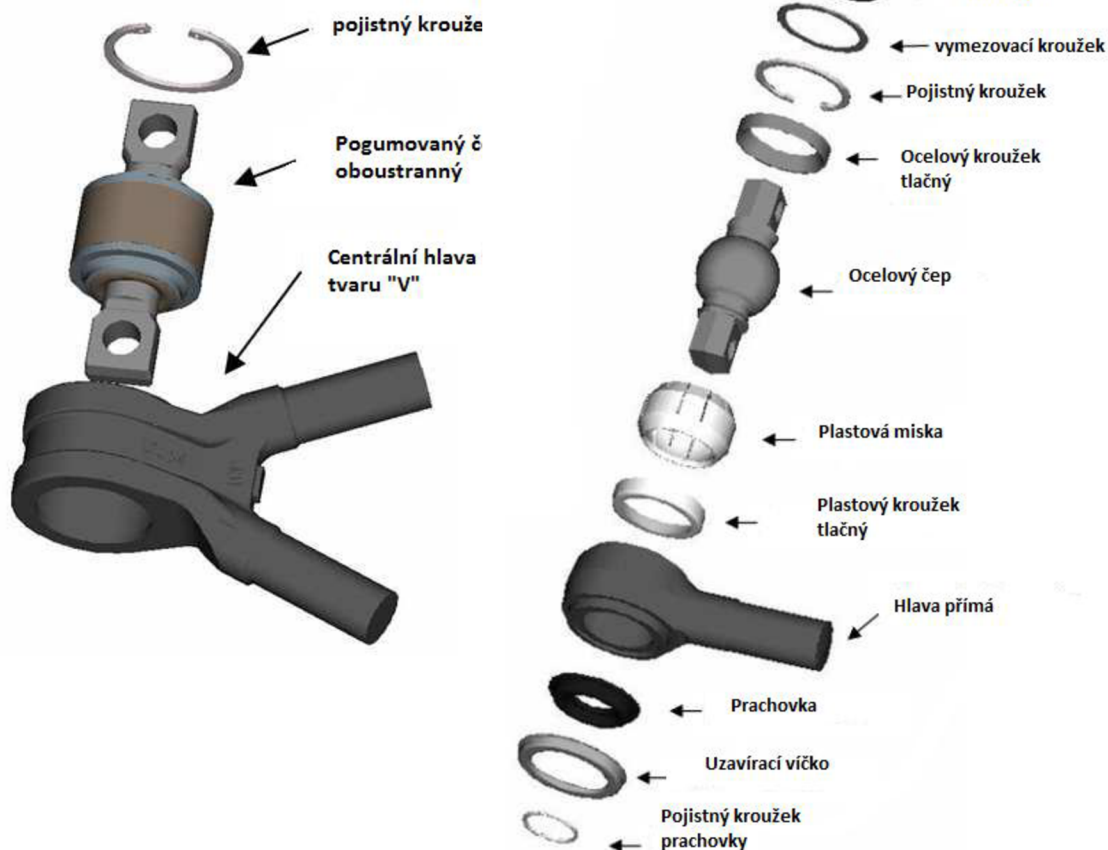
Při montáži táhel se používají dva základní druhy čepů, a to čepy pogumované (obr. 7) tzv. silentbloky a čepy skládané tzv. kluzné. Oba druhy čepů se vyrábí v různých velikostech a kombinacích pro docílení požadovaných vlastností. S měnící se velikostí čepu se mění i velikost hlavy. Samotná velikost čepu (kloubu) je rozlišována dle největšího průměru.

Pogumované čepy jsou nepoužívanější variantou a jejich vyráběný sortiment je nejšířší. Používané průměry jsou 55, 62, 70, 80 a 90 mm. Samotný čep se skládá z ocelového čepu, který je pogumován vrstvou kaučukové pryže. Další komponentou jsou opěrné ocelové kroužky na gumě, které slouží jako opěrné body v dutině hlavy a zároveň pomáhají při zatížení stabilizovat deformaci gumy. Rozdělení do jednotlivých skupin je podle největšího průměru čepu a podle tloušťky opěrného kroužku. Ocelové čepy mohou být jednostranné a oboustranné. Příklad složení pogumovaného čepu je na obrázku 8.

Skládané čepy jsou druhým používaným typem čepů. Koule ocelového čepu je uložena v plastové misce a díky mazacímu tuku může volně rotovat v hlavě táhla. Stejně jako u čepů pogumovaných se dělí podle průměru čepu, dále však jen na čepy oboustranné a čepy jednostranné zakončené přírubou (čepy s přírubou se používají pouze pro táhla tvaru "V"). Používané průměry čepů jsou pak 65 a 80 mm. Podrobnější popis komponent je na obrázku 8.



Obr. 7 Pogumovaný čep [10]



Obr. 8 Složení pogumovaného a skládaného čepu [10]

4 TECHNOLOGIE VÝROBY

Při výrobě jsou některé operace prováděny ve firmě v Dačicích, některé jsou však prováděny externími společnostmi. Tato kapitola se zabývá stručným popisem sériového procesu výroby táhel. Protože velikost série každé jednotlivé součástky není velká a proces je nutno často přestavovat, většina strojů je založena na CNC řídicím systému, který umožňuje poměrně snadné a rychlé přestavení provozu.

4.1 Technologie opracování hlav

Vstupním polotovarem hlav jsou odlitky z feritické litiny s kuličkovým grafitem nebo výkovky z oceli. Oba druhy polotovarů jsou dodávány externími společnostmi. Zatímco odlité slouží pro součásti s lisovaným spojem, kované hlavy jsou určeny pro spoje svařované třením a závitové spoje. Příklad polotovaru je na obrázku 9.

Protože polotovary jsou dopravovány lodní a automobilovou dopravou, prvním procesem zpracování je tryskání povrchu pro jeho zkvalitnění a očištění koroze a nečistot. Tato před-úprava má významný vliv na kvalitu lakování výsledných součástí. Tryskání probíhá v uzavřené komoře, kde jsou součásti zavěšeny na rotačním závěsu (obr. 9) a tryskány abrazivem ocelové drtě. Po tryskání jsou součásti uloženy do bedny a přepraveny na další pracoviště.

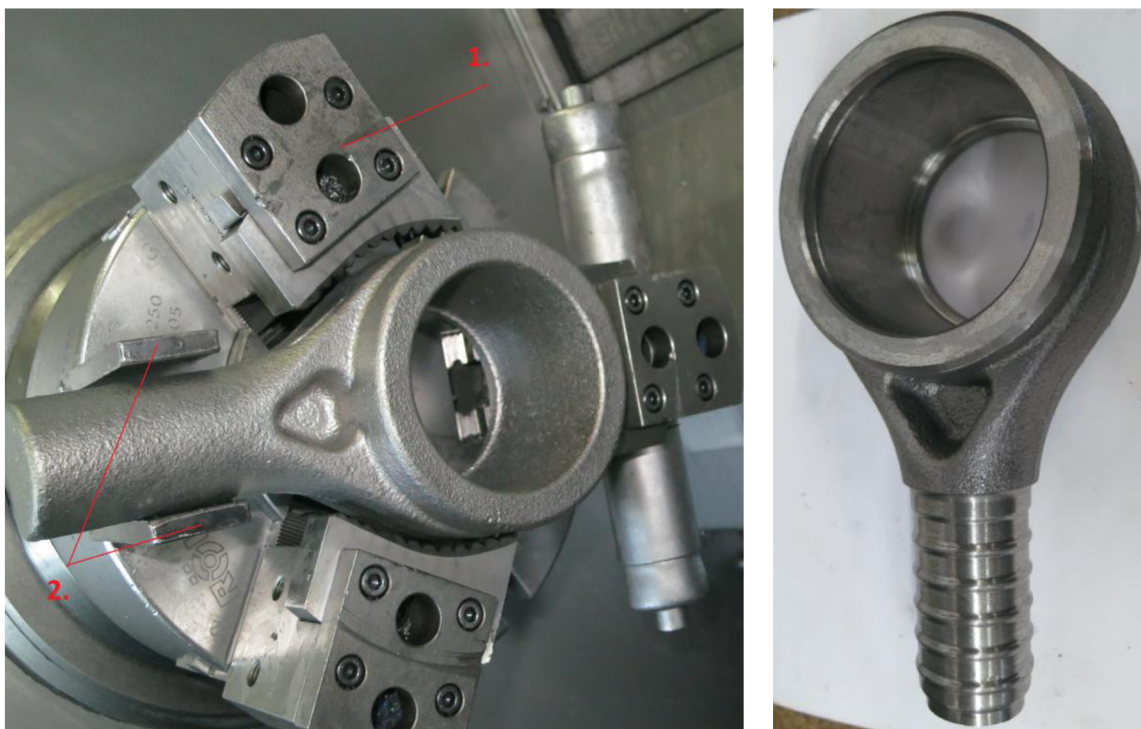


Obr. 9 Komora tryskače; polotovar hlavy-odlitek

První obráběcí operací, která následuje po tryskání je obrábění dutiny hlavy. Obrábění probíhá na CNC soustruhu řízeným systémem Siemens. Hlava je doražena do sklíčidla a upnuta za vnější plochu do upraveného tříčelistového sklíčidla viz obrázek 10. (pozice jedna označuje tvarovou čelist, pozice dva pak opěrné body pro založení dřívku hlavy)

Po obrobení následují operace měření průměru dutiny a polohy drážky pro pojistný kroužek. Před obráběním dřívku hlavy pro lisovaný spoj jsou navrtány středící otvory, při navrtávání je součást středěna za obrobenou dutinu a tak je zajištěna poloha geometrie dřívku ke geometrii dutiny.

Při procesu obrábění dřívku hlavy je součást upnuta mezi hroty. Současně je vřetenem opatřeno čelistí pro drážkové kameny, pomocí nichž je unášena součást otáčivým pohybem. Samotné obrábění probíhá na dvou-vřetenovém soustruhu. Po obrobení dřívku je součást dokončena (obr. 10 přímá hlava pro gumový kloub) a je připravena na kompletaci táhla nalisováním trubky.



Obr. 10 Upínání hlavy při obrábění; obrobená hlava připravená na montáž

4.2 Technologie výroby čepů

Polotovarem pro výrobu čepů je ve všech případech výkovek. Vykovaný polotovár se nachází na obrázku 11. Obrábění čepu je rozděleno na několik postupných operací prováděných na samostatných strojích.

Vrtání otvorů a sražení hran je první operací a probíhá na vrtacím automatu, do kterého pracovník zakládá polotovary do přípravku na rotačním stole. V pracovním prostoru jsou dvě vřetena, kdy každé provádí vrtání jednoho otvoru.

Po vyvrtání otvorů jsou navrtány středící důlky pro následující operaci obrábění koule čepu. Zde se proces mění podle toho, o jaký čep se jedná. Čepy pogumované jsou soustruženy na požadovaný rozměr a čepy skládané (kluzné) jsou navíc válečkovány pro dosažení kvalitního, hladkého a zpevněného povrchu. Dalším krokem je kontrolní měření vyrobených rozměrů

Po této operaci jsou čepy určené pro pogumování (obr. 11) odeslány externí společnosti, která provede proces vulkanizace (pogumování) čepů a poté se vrací zpět do Dačic k montáži.

Při procesu vulkanizace se na čep nejprve nanese speciální tenká vrstva zlepšující přilnutí pryže, poté jsou čepy spolu s kroužky usazeny do formy a po uzavření formy dochází ke vstříknutí pryže do formy. Případné otřepy jsou pak ručně obroušeny.

V případě požadavků zákazníka jsou některé čepy opatřeny protikoročním povlakem, nejčastěji se jedná o povlak zinkový.



Obr. 11 Polotovár čepu-výkovek a obroběný čep pro pogumování

4.3 Technologie spojů táhel

Při kompletaci táhel, jak již bylo řečeno v kapitole 1, se používají různé metody spojení hlav a trubky. Trubky jsou do firmy TRW dodávány v tyčích o délce 6 m o různých průměrech a tloušťkách stěny. Nejpoužívanější trubkou je $\phi 48$ mm, s tloušťkou 5 mm a $\phi 50$ s tloušťkou stěny 6 mm.

Při svařování třením je hlava s obroběným dřikem (Obr. 12) vložena do vřetene stroje a trubka do upínače konající posuvný pohyb. Při svaření je důležitá poloha natočení dutin táhla vůči sobě, proto se jako zdroje točivého momentu nevyužívá setrvačnick, ale přímého spojení s pohonem- metoda konveční. Mezi výhody toho spoje patří rychlost a vysoká pevnost spoje. Nevýhodou je vyšší cena oproti jiným metodám, která je spojena hlavně s nutností kovaných polotovaru hlav a složitějšího obrábění dříku.



Obr. 12 Tvar obroběný pro svařování

Při spojení táhla závitem je na dřík hlavy vyroben závit metodou válcování, naopak u trubky je závit vyřezán strojně a trubka je podélně rozříznuta v délce spoje. Pro dosažení potřebné pevnosti spoje je trubka stažena objímkou. Tato metoda se používá hlavně u táhel, kde je nutné regulovat délku táhla (geometrie přední nápravy). Vyrábějí se v sesterském závodě v Německu.

Posledním metodou spojení táhel, která je využívána ve firmě TRW je lisování za poloohřevu. Tato metoda je oproti ostatním finančně výhodnější a zajišťuje velice pevné spojení. Trubka, která je ohřátá indukčním ohřevem na teplotu cca 750°C je následně nasazena na tvarový dřík hlavy. Obě součásti jsou pak založeny do lisovací matrice (obr. 13), poloha trubky a dříku je vymezena dorazy přípravku a dojde k zalisování. Využívá se hydraulického lisu HZV 200 firmy Dunkes. Tlak při lisování je 11 MPa.



Obr. 13 Lisovací matrice

Teplota před zalisováním je měřena pomocí pyrometru firmy Braum. S jeho pomocí je teplota ohřevu trubky regulována tak, aby byla před lisováním optimální- přibližně 700°C. Kompenzuje tak nežádoucí ochlazení trubky na nižší teplotu způsobené zejména proměnlivou rychlostí operátora lisu.

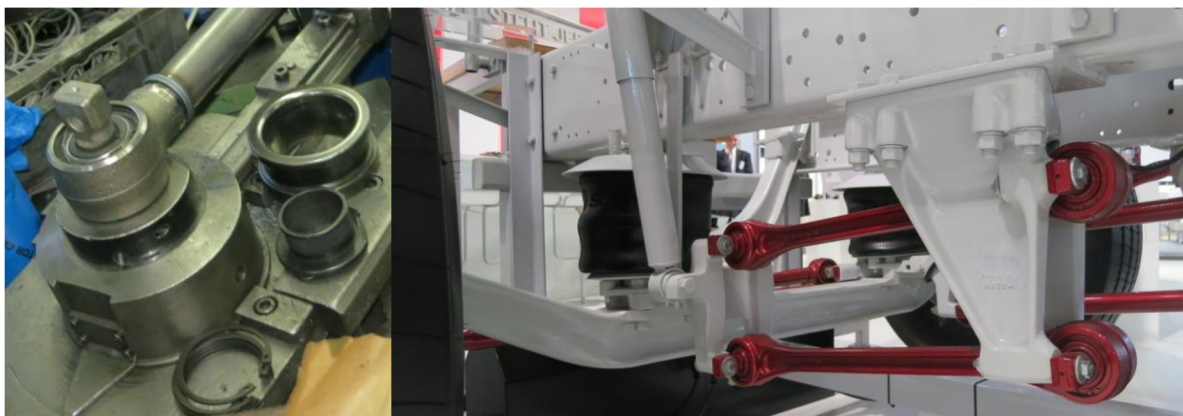
U některých přímých táhel je požadavek na ohnutí trubky a to buď jednoduchý ohyb, nebo dvojitý do tvaru "S". Jednoduchý ohyb (obrázek 14) se provádí na hydraulickém lisu pomocí ohýbacích kladek v Dačicích. Ohyby ostatní se provádí na ohýbacím automatu také v německém závodě.



Obr. 14 Ukázka jednoduchého ohybu

Poslední částí je montáž čepů do táhel (obr. 15). U táhel s pogumovanými čepy je požadavek aby byla pryž po montáži v již předepjatém stavu, a proto jsou čepy do dutiny zalisovány na hydraulickém lisu a v dutině zajištěny pomocí pojistného kroužku. Při montáži je do přípravku usazena hlava a do ní zasunut čep. Následně se na hlavu nasadí kuželové pouzdro a do něho vloží pojistný kroužek. Zalisování probíhá při síle 100 000 – 200 000 N dle velikosti čepu. Čepy skládané se montují obdobně jako pogumované. Plechová uzavírací víčka jsou po nasazení po obvodu bodově navařena ve čtyřech bodech.

Po konečné montáži jsou součásti v případě požadavku zákazníka přepraveny na lakovnu. Proces lakování probíhá v TRW na plně automatizované lince. V průběhu procesu je součást podrobena dvěma operacím, předúpravě povrchu a lakování. Předúprava chystá povrch na dobré přilnutí barvy. Takto vyrobené součásti jsou pak baleny a expedovány zákazníkovi pro montáž na vozidla. Příklad montáže je na obrázku 15.



Obr. 15 Montáž pogumovaných čepů a příklad montáže vodících táhel

5 ANALÝZA SPOJE [6] [11]

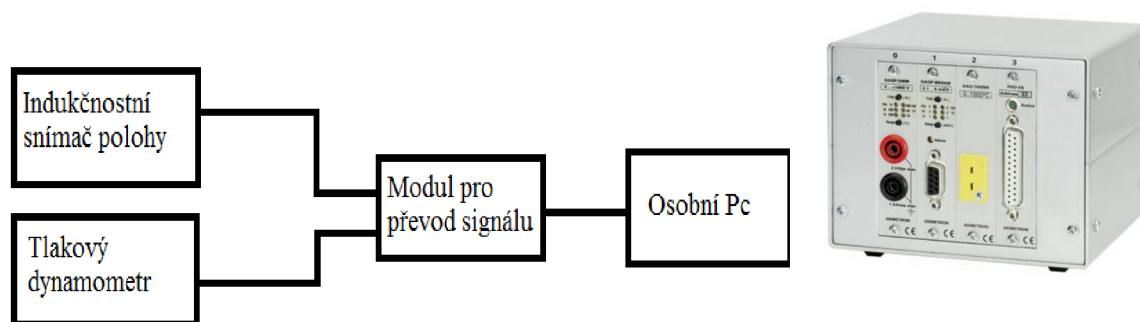
Tvářeným materiálem je nízkouhlíková ocel E335+N dle EN 10025-2 (dle již neplatné normy ČSN ocel třídy 11 600). Jedná se o běžně používanou konstrukční ocel vhodnou pro staticky i dynamicky namáhané strojní součásti. Dodávána je ve formě dutých kruhových tyčí vyráběných tažením za studena s následným normalizačním žiháním. Mez pevnosti v tahu je pro tento materiál rovna min. 490 MPa, mez kluzu min. 355 MPa a tažnost je stanovena na min. 20 %. Chemické složení oceli v hmotnostních procentech je v Tab. 1, kde složení dané normou je podle normy ČSN EN 10294-1 a chemické složení zjištěné je složení naměřené na zkušební tělese pomocí spektrální analýzy pomocí vyjiskřovacího spektrometru. Z tabulky je patrné že zkoumaný materiál odpovídá normovaného složení.

Tab. 1 Chemické složení oceli E335+N v hmotnostních procentech

	C	Si	Mn	P	S		Cr	Mo	Ni	Al		Cu
	max.	max.	max.	max.	min.	max.	max.	max.	max.	min.	max.	max.
složení dle normy	0,220	0,550	1,600	0,030	0,015	0,050	0,300	0,080	0,300	0,010	0,060	0,300
složení zjištěné	0,196	0,270	1,320	0,008	0,014	0,041	0,028	0,097	0,025			0,131

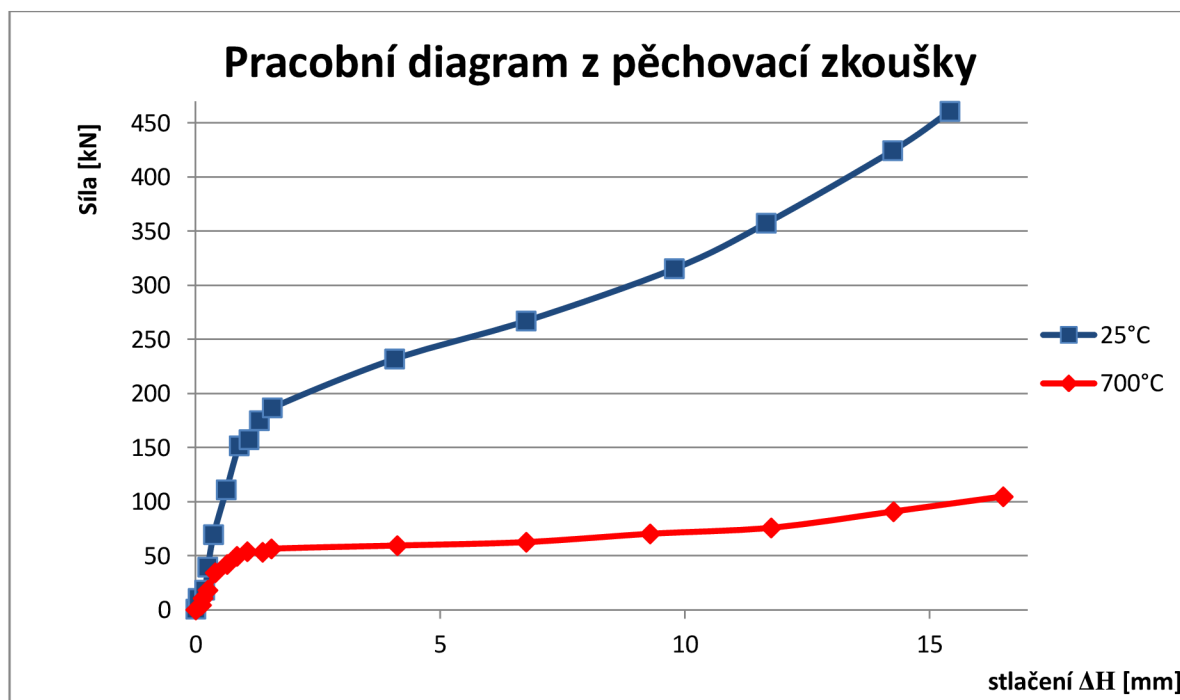
5.1 Pěchovací zkouška [6]

Ke zjištění plastických vlastností materiálu byla využita pěchovací zkouška. Ta proběhla při teplotách tváření kovu, tedy 700°C a za studena. Výsledky zkoušky budou využity pro další analýzu spoje ve formě numerického výpočtu MKP. Zkouška byla provedena na hydraulickém lisu mezi rovnými kovadly. Zvolen byl válcový vzorek o průměru $\varnothing D_0$ 18 mm a výšce H_0 28 mm vyrobený soustružením. Zařízení, na kterém byla zkouška provedena je hydraulický lis CZR 600 o jmenovité síle 600 kN. Zařízení bylo vybaveno dvěma měřicími zařízeními pro zaznamenávání fyzikálních veličin v průběhu zkoušky (schéma zapojení je na obrázku 16). Prvním je indukčnostní snímač dráhy a druhým tlakový dynamometr umístěný pod pěchovaným vzorkem o maximální hodnotě zatížení 500 kN. Protože byla zkouška prováděna i za vysoké teploty, bylo zařízení navíc vybaveno chladicí podložkou napojenou na vodní okruh, která oddělovala dynamometr od nástroje. Samotný vzorek byl při zkoušce umístěn v pěchovacím nástroji, který se skládá z nepohyblivé a pohyblivé čelisti, mezi něž byl vzorek umístěn. Oba snímače vysílají analogový signál ústící do modulu DE-WE-30-4 (obr. 16), který jej zesílí a převede na digitální. Ten je následně zpracován na běžném osobním počítači vybaveném softwarem firmy Dewetron. Blokové schéma zapojení je na obrázku 16.



Obr. 16 Blokové schéma zapojení snímačů při testu a modul pro převod signálu [12]

Kvůli malým rozměrům vzorku byl nástroj při zkoušce za tepla ohřát spolu se vzorkem, aby nedošlo ke chladnutí vzorku během manipulace před testem. Za účelem snížení tření a omezení velikosti nerovnoměrné deformace byly vzorky před testem lubrikovány grafitickým mazivem. Při zkoušce byly zpěchovány dva válcové vzorky, jeden při teplotě 25°C, druhý byl pak ohřát na teplotu 700°C. Pracovní diagramy obou vzorku jsou zachyceny na obrázku 17.



Obr. 17 pracovní diagram pěchovací zkoušky

Data z pracovního diagramu byla dále zpracována pro vyhodnocení přirozeného přetvárného odporu materiálu, řadou následujících vztahů.

Výpočet objemu zkušební vzorku:

$$V = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot h_0 = \frac{\pi \cdot 17,95^2}{4} \cdot 28,01 = 7079 \text{ mm}^3 \quad (7)$$

Skutečná výška vzorku (v daném okamžiku i)

$$H_i = H_0 - \Delta H = 28,01 - 0,4 = 27,61 \text{ mm} \quad (8)$$

Střední průměr vzorku (v daném okamžiku i)

$$D_{Si} = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{H_i \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7079}{27,61 \cdot \pi}} = 18,07 \text{ mm} \quad (9)$$

Přirozený přetvárný odpor (v daném okamžiku i)

$$\sigma_{Pi} = \frac{4 \cdot F_i}{\pi \cdot D_{Si}^2} = \frac{4 \cdot 34358}{\pi \cdot 18,07^2} = 134 \text{ MPa} \quad (10)$$

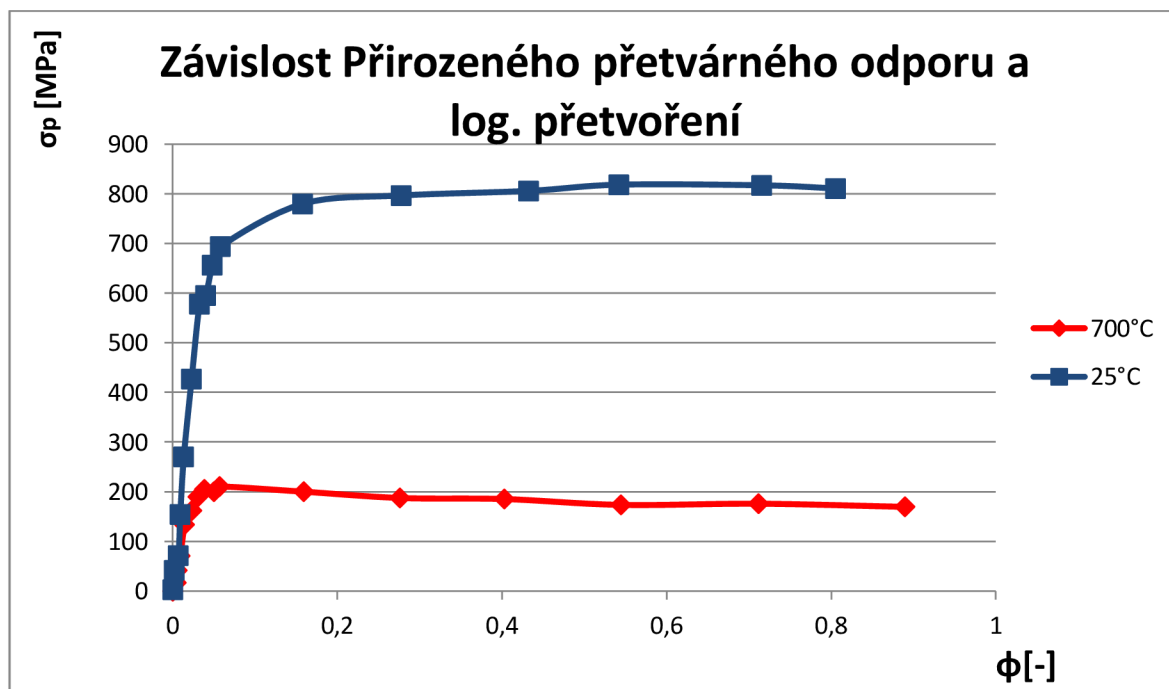
Kde:

F_i je síla v daném okamžiku

Logaritmičké přetvoření (v daném okamžiku i)

$$\varphi_i = \ln\left(\frac{H_0}{H_i}\right) = \ln\left(\frac{28,01}{27,61}\right) = 0,014 \text{ [-]} \quad (11)$$

Výsledná závislost přetvárného odporu a logaritmičkého přetvoření je pro obě teploty na obrázku 18. Kompletní tabulky s naměřenými daty a vypočtenými hodnotami jsou umístěny v příloze 1.



Obr. 18 Graf závislosti přetvárného odporu na přetvoření

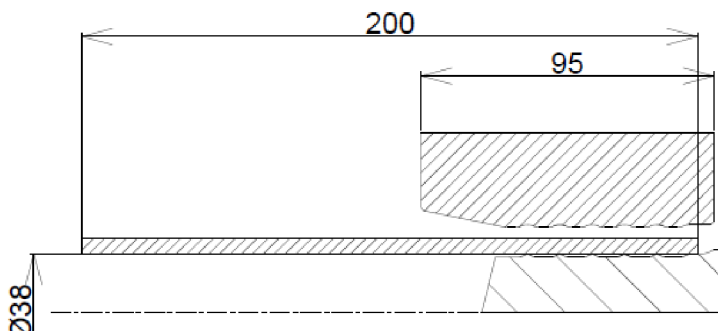
Závěrem lze říci, že zkoušený materiál (E355+N) je dobře tvářitelný, ani u jednoho ze vzorku (vzorky viz. obr. 19) nedošlo ke vzniku trhlin ani přes velký stupeň deformace. S rostoucí deformací dochází u vzorku pěchovaného za studena ke zpevňování materiálu. Naopak při teplotě 700°C jsou již částečně aktivované procesy uzdravování materiálu a odpor pak spíše klesá. Křivky přetvárného odporu byly následně použity pro definování chování materiálu při výpočtu a v budoucnu mohou posloužit pro další výzkumné činnosti v této oblasti procesu zalisování spoje.



Obr. 19 Vzorky před a po zkoušce

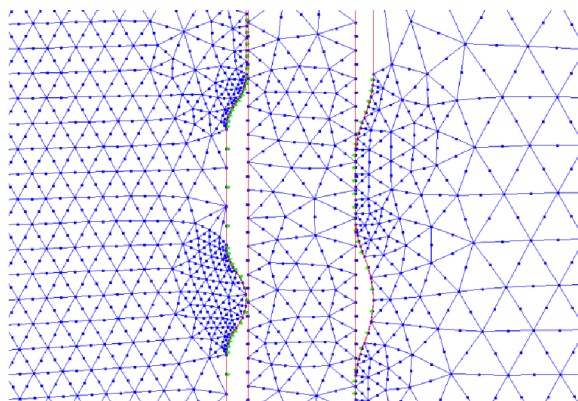
5.2 Postu při návrhu výpočtu

Pro analýzu procesu zalisování byla zvolena metoda numerického výpočtu pomocí metody konečných prvků. Pro analýzu byl zvolen software FormFEM společnosti ITA Company. Tento software je určen pro výpočty objemových tvářecích procesů, které jsou rotačně symetrické. V našem případě není proces ideálně symetrický a byl proto pro tuto skutečnost upraven s podmínkou vnesení chyby do výpočtu. Vstupem do softwaru je u modelu řez, se kterým následně software počítá jako se součástí rotačně symetrickou kolem osy. Pro řešený případ je osou rotace osa lisované trubky. Proto je při výpočtu model nadefinován následovně. Spodním nepohyblivým nástrojem je dřík hlavy, horním pak lisovací nástroj a trubka tvářeným kovem viz obrázek 20.



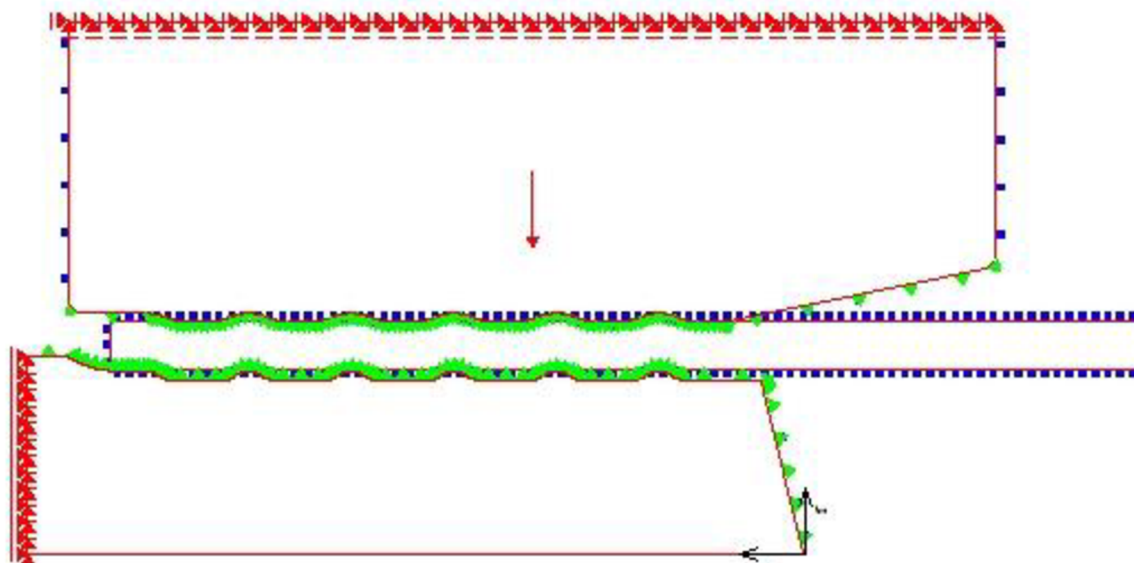
Obr. 20 Návrh modelu pro výpočet

Předem vytvořený model každé součásti (vytvořeno v Autocad 2010) je do softwaru vložen do jednotlivých objektů. Model trubky je definován jako polotovár, zbylé dva modely jako nástroj. Objekty typu nástroj jsou ideálně tuhé prvky, které se během procesu nedeformují. Dalším krokem je vytvoření sítě konečných prvků (Obr. 21) a to pro obě skupiny objektů. Lze využít automatického nasítování, nebo lze síťovat vlastnoručně. V tomto případě bylo zvoleno manuální vytvoření sítě trojúhelníkového typu. V oblastech kontaktu nástroje s polotovarom byla síť prvků vytvořena hustější, tedy s menšími prvky. To má za následek zpřesnění výpočtu v daných oblastech, ale i zvýšení náročnosti výpočtu. Po vytvoření sítě se zadávají vlastnosti objektů. První vlastností je materiál. Ten byl popsán v předcházející kapitole. Stejným způsobem jsou nadefinovány materiály nástroje, tedy dřívku a lisovací matrice. Tyto však nemají velký vliv a proto nejsou popsány. Následuje definice počáteční teploty každého objektu. Pro nástroje je to 25°C a pro polotovár 700°C. Pokud jsou vytvořeny všechny potřebné objekty a definovány jejich vlastnosti, jsou všechny označeny jako úplné a lze přikročit k vytvoření sestavy.



Obr. 21 Vytvořená síť

Do sestavy se vkládají postupně všechny objekty, lze také vložit objekt polotovaru z jiného výpočtu a to i s parametry přetvoření a teploty. Lze tak provádět jednoduše výpočty pro víceoperační procesy. Po vložení objektů a jejich posunutí polohy, lze definovat podmínky procesu. Definuje se tak kontakt mezi jednotlivými objekty (zelené značky na obrázku 22), přestup tepla mezi jednotlivými objekty a do okolního prostředí (modré na obrázku 22), druh maziva, stroj, směr pohybu nástroje a jeho konečná poloha nebo podpory představující pokračování materiálu (červené na obrázku 22).



Obr. 22 Zobrazení podmínek při výpočtu

Po vytvoření všech kontaktních podmínek je sestava uložena a připravena pro výpočet. V dialogovém okně lze vybrat podmínky a druh výpočtu. V tomto případě se jedná o výpočet mechanický a teplotně vázaný. Dále je nastaveno jak často ukládat hodnoty, nebo možnost přesíťování prvků po určitém počtu kroků. Každý zvolený bod v okně ovlivňuje náročnost výpočtu, a proto je třeba této volbě věnovat pozornost. Po úspěšném provedení výpočtu lze procházet výsledky zaznamenaných kroků a zobrazit požadované výsledky s omezenou možností úprav, jako je rozsah škály, barvy a výsledky lze také rotovat o požadovaný úhel.

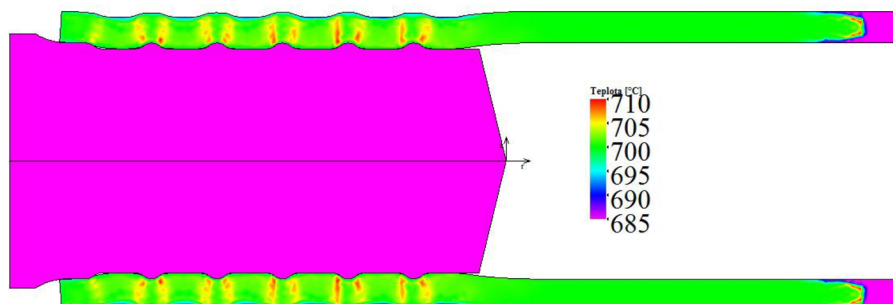
5.3 Výsledky výpočtu procesu

Úvodem je nutno říci, že model procesu byl v mnoha ohledech zjednodušen. Zjednodušená je geometrie modelu, kde místo nástroje ze dvou částí, který sevře a zalisuje trubku spolu s dříkem a v dělicí rovině nástroje dojde k vytlačení části objemu trubky nastává stažení nástroje okolo trubky a dotlačení na dřík. Přesně nebyla ani definovány parametry stroje, jedná se o starý stroj po mnoha úpravách a přesné parametry nejsou známy. Výsledky výpočtu jsou proto pouze informativního charakteru a mají za úkol názorně přiblížit dění v průběhu procesu a zjistit přibližné hodnoty fyzikálních veličin, nikoli jejich přesné stanovení.

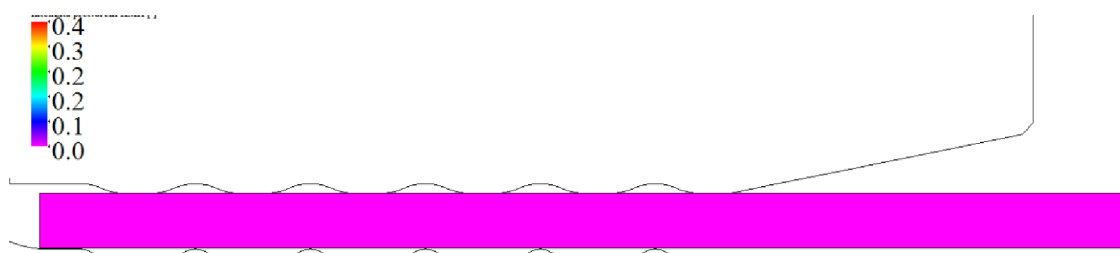


Obr. 23 Teplotní pole (100% výpočtu)

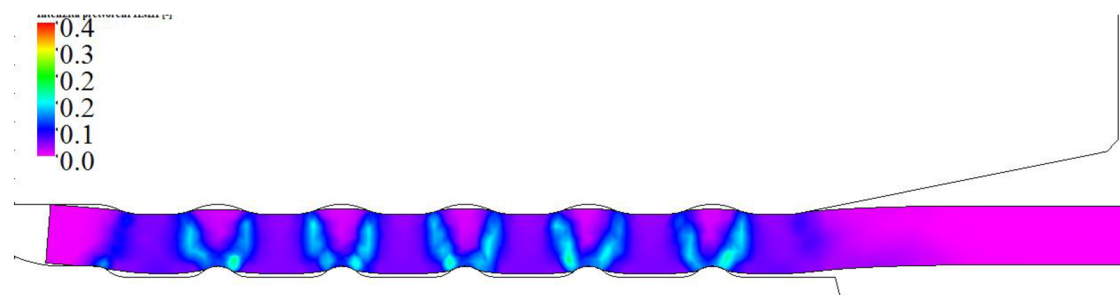
Jak je patrné na obrázku 23 a 24 teplota se během procesu na první pohled téměř nemění. Při bližším zkoumání lze ale pozorovat malé změny teplot, přibližně v rozahu $700 \pm 10^\circ\text{C}$. Tyto změny jsou způsobeny kontaktem trubky se studeným nástrojem, kde způsobují chladnutí od povrchu. Naopak v místě největších deformací se teplota mírně zvyšuje. Během procesu také dochází k tepelné výměně mezi teplým a studeným koncem trubky.



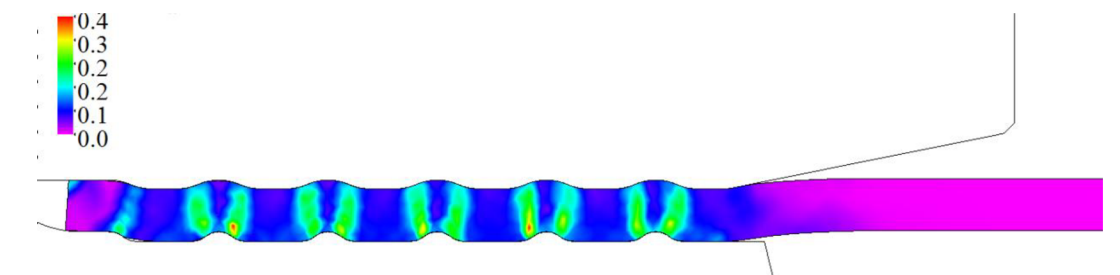
Obr. 24 Teplotní pole (100% výpočtu) - upravený rozsah vykreslení



Obr. 25 Log. přetvoření (0% výpočtu)



Obr. 26 Log. přetvoření (55% výpočtu)

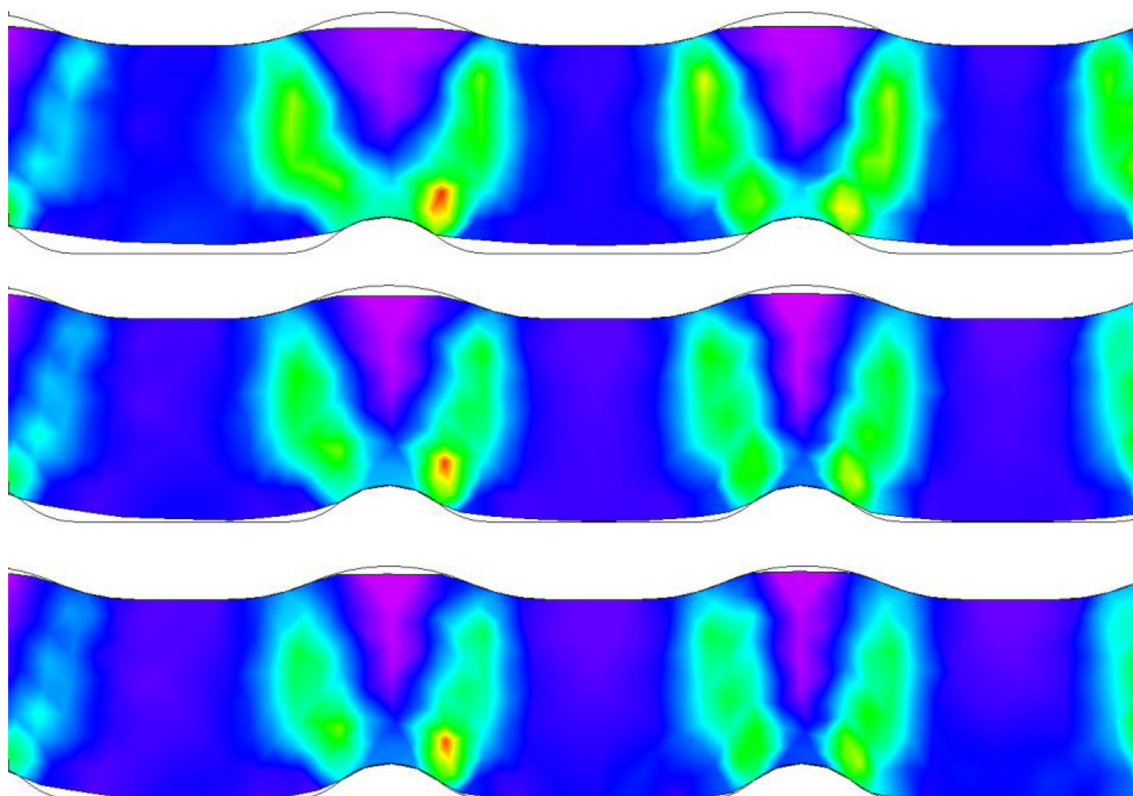


Obr. 27 Log přetvoření (100% výpočtu)

Z předchozích obrázků (Obr. 25;26;27) přetvoření lze vypočítat hlavní směry deformace během procesu. Velikost přetvoření se zde pohybuje $\varphi=0,2$ - $\varphi=0,3$. Pozorovat lze i postupné zaplňování drážky dřívky materiálem trubky. V oblasti zaoblení dna drážky dochází k nedokonalému zaplnění prostoru materiálem (Detailně obr.26) a zůstává tak zde malá dutina. Tento jev lze pozorovat i na reálných sériových dílech (obr. 28). Na výslednou pevnost spoje, nemá tento jev žádný vliv. Těchto poznatků lze využít pro možné úpravy geometrie nástroje a dřívky. Na obrázku 29 lze vidět průběh zaplnění drážky během procesu a vznik dutiny.



Obr. 28 Detail nedokonalostí dolisování



Obr. 29 Průběh zaplnění drážky dřívky

6 PŘÍPRAVA TESTOVACÍCH PROTOTYPŮ [8]

Testovacím prototypem má být základní vodící tyč přímého typu s úpravami pro potřeby testů. Prvním krokem bylo stanovení velikostí trubky použité testování, podle nichž budou vybrány velikosti dříků a hlav. Protože trubek se ve výrobě používá poměrně velké množství, byly po analýze počtu vyráběných vzorků provedeno rozhodnutí na testování dvou nejpoužívanějších rozměrů trubek a k nim následně přiřazen odpovídající rozměr dříku.

- dřík \varnothing 37,8 mm v kombinaci s trubicí o rozměrech \varnothing 38x5 mm
- dřík \varnothing 37,8 mm v kombinaci s trubicí o rozměrech \varnothing 40x6 mm

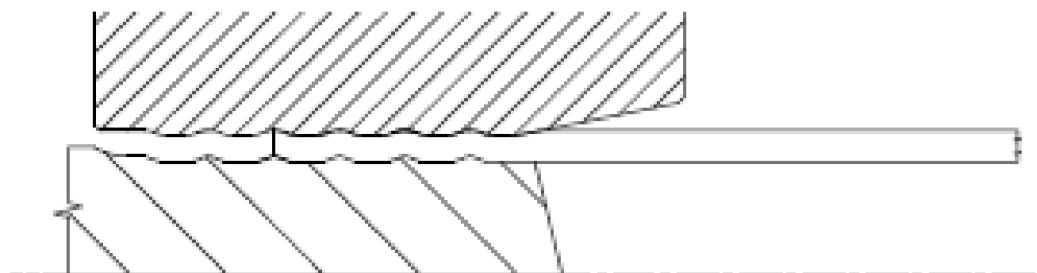
Podle dříku přišla na řadu volba hlavy. Pro dřík rozměru \varnothing 37,8 se vyrábějí hlavy o velikostech 55, 62, 70 mm. Protože velikost hlavy je úměrná únosnému zatížení, byla zvolena hlava velikosti 70 mm pro snížení rizika znehodnocení testu poškozením v nežádoucím místě mimo spoj. Základní délka trubky a tím výsledná rozteč otvorů hlav byla zvolena tak, aby se přiblížila vyráběným součástem a poskytla na své délce dostatečnou délku pro pružnou deformaci v průběhu testů. Byla zvolena délka 395 mm délky trubky, které odpovídá při sériovém způsobu zalisování (5 zalisovaných drážek) odpovídá rozteč otvorů 587 mm tento rozměr je stejný pro obě varianty použité trubky.

Posledním krokem pro zvolení a výrobu prototypových dílů je určení změny zalisování rozdílného počtu drážek. Pro dodržení požadavku použití sériových dílů s co nejmenším počtem potřebných úprav a za použití sériového lisovacího nástroje pro zalisování pěti drážek byly zvažovány dvě varianty. První variantou je zkrácení dříku o požadovaný počet drážek a ponechání délky trubky (obr. 30). Druhou je varianta zkrácení trubky o odpovídající hodnotu, kdy opět dojde jen k zalisování požadovaného počtu drážek (obr. 31). Po zhodnocení výhod a nevýhod obou variant, byla zvolena varianta výroby způsobem dva, tedy zkrácení trubky o požadovanou hodnotu. Důvodem byla hlavně ta



Obr. 30 Výroba prototypů-varianta 1

skutečnost, že při zkrácení dříku dojde během lisovacího procesu k nežádoucímu zdeformování trubky v místě původních dvou vln a vytvořením tak velmi nepříznivého vrubu na průřezu trubky. Místo vrubu je nastíněno na obrázku 30 šrafovanou částí trubky.



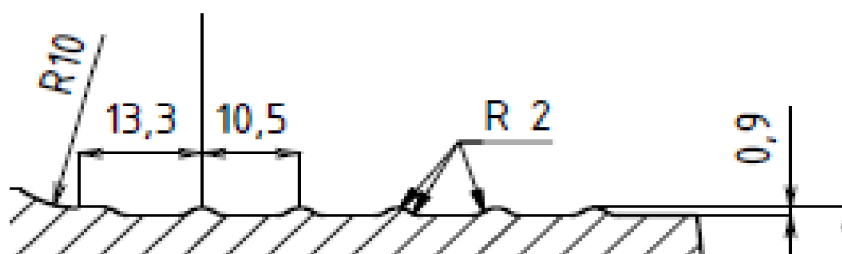
Obr. 31 výroba prototypů-varianta 2

Negativním vlivem zvolené metody je delší tepelně ovlivněná oblast trubky, protože délka ohřevu trubky je přesně dána přípravkem při ohřevu a nelze ji regulovat bez zásahu do jeho konstrukce. Druhým je pak vytvoření vrubu na hlavě součásti v místě nezalisovaných drážek na dříku. Pro potřeby testů byly zvoleny tři skupiny variant počtu drážek. První je varianta sériového počtu drážek, tedy pěti. Druhou je varianta zkrácení na čtyři drážky a třetí je varianta se třemi drážkami. Varianta sériového počtu bude sloužit jako zdroj dat pro porovnání. Tři drážky byly zvoleny jako uvažovaný teoretický limit, který byl určen na základě zkušeností pracovníků firmy. Varianta se čtyřmi drážkami je pak mezikrokem mezi oběma variantami. Celkově tak bylo vytvořeno šest variantních skupin určených pro testování (tab. 2). Prototypy jsou na obrázku 34 a 35.

Tab. 2 Varianty vyrobených prototypů

Číslo Var.	Rozměr trubky [mm]	Počet zalisovaných drážek	Délka trubky [mm]
1. (obr. 30)	Ø 48x5	5	395
2. (obr. 30)	Ø 48x5	4	368,5
3. (obr. 30)	Ø 48x5	3	347,5
4. (obr. 31)	Ø 50x6	5	395
5. (obr. 31)	Ø 50x6	4	368,5
6. (obr. 31)	Ø 50x6	3	347,5

Upravená délka trubky vychází z geometrie dříku na obrázku 32 a je zkrácena o danou rozteč mezi jednotlivými úseky dříku o 13,3 a 10,5 mm. Zkrácení je provedeno u obou hlav, tedy dvojnásobný. Výrobní výkres součásti viz. příloha 3



Obr. 32 Rozměry dříku pro zkrácení trubky [8]

6.1 Výroba prototypů

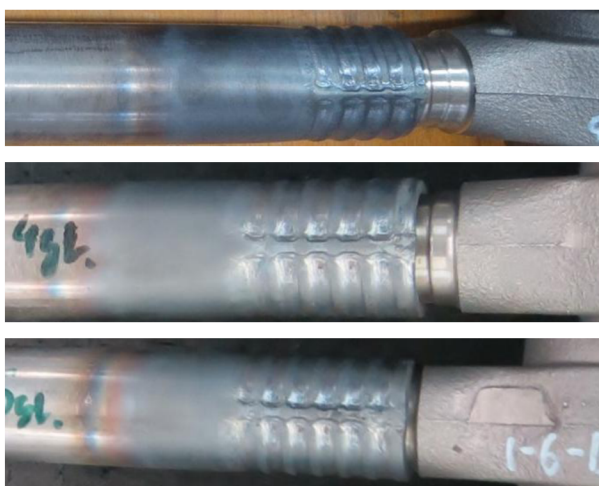
Při lisování prototypových dílů bylo postupováno stejným způsobem, jako při sériové výrobě. Bude popsána pouze jedna exemplární skupina. Technologie lisování byla popsána v kapitole 4, a proto zde budou doplněny pouze potřebné informace. Při lisování táhel se postupuje tak, že se v prvním kroku nalisuje hlava na jedné straně a až po dokončení celé dávky se lisuje strana druhá. Důvodem tohoto postupu je fakt, že pro založení jsou využívány rozdílné přípravky, které je nutno vyměnit a seřadit pro danou délku. Druhým důvodem je, že po zalisování má trubka v místě lisování přibližně 500°C, což by bylo pro operátora lisu nebezpečné a značně by to sťažovalo plynulost procesu. Proto se vždy součásti po zalisování jedné strany nechávají chladnou na vzduchu. Trubka je při ohřevu zasunuta do cívky (Pozice 4 na obr. 33), kde dojde k sepnutí spínače pro ohřev. Při lisování první strany je lisovaná hlava zajištěna v přípravku za dutinu hlavy (Pozice 1 na obr. 33) a její poloha je přesně zajištěna vůči nástroji. Ohřátá trubka, která se nasazuje na dřík je naopak doražena za volný konec do přípravku (Pozice 2 na obr. 33), který zajistí ideální

vzdálenost. Oba přípravky lze výškově nastavit pro zajištění polohy osy obou komponent vůči ose nástroje (pozice 3-obr. 33).

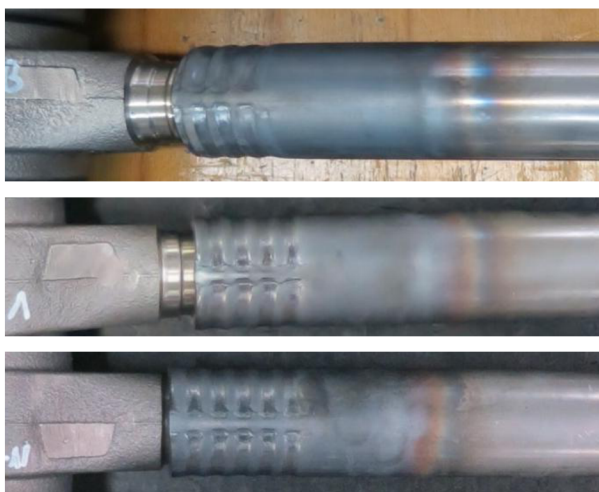


Obr. 33 Pracoviště pro lisování

Pro lisování druhé strany je postup identický, rozdíl je pouze v levém přípravku, který místo trubky zajišťuje polohu již zalisované hlavy. Rozteč obou přípravků je pak rovna celkové rozteči os táhla.



Obr. 34 Spoj trubka Ø 48x5 mm spolu s 3,4,5 drážkami



Obr. 35 Spoj trubka Ø 50x6 mm spolu s 3,4,5 drážkami

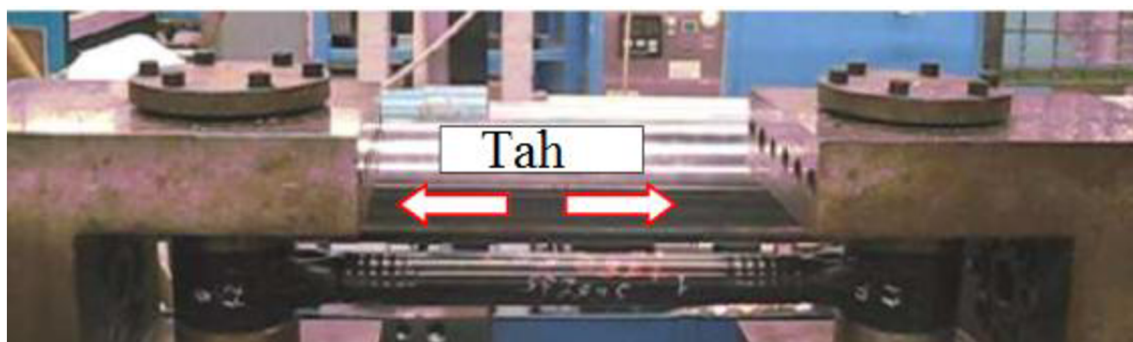
7 TESTOVÁNÍ [10]

Protože vodící táhla jsou určena pro automobilový průmysl a jejich montáž do celku podvozku automobilu z nich tak dělá kritický element bezpečnosti, musí součásti podstoupit a obstát v mnoha testech a splnit mnoho požadavků ze strany zákazníků. Testů prováděných na vodících tyčích je velké množství. Součásti lze namáhat staticky, dynamicky, dále pak jednoosým, nebo víceosým namáháním (tzv. kombinovaným). Testy lze rovněž provádět za teplot konstantních, nebo měnících se s časem. Pro potřeby otestování spoje byly zvoleny pouze tři základní testy, které by měli odhalit případné problémy konceptu. Jsou to:

- Statický test tahem
- Statický test krutem
- Dynamický test cyklickým namáháním tah/tlak

7.1 Statický test tahem [10]

Zkouška je obdobná jako zkouška tahem pro zjišťování materiálových charakteristik. Princip spočívá v zatížení součásti jednoosým tahovým napětím při stálé rychlosti zatěžování. Zkouška končí přetržením součásti a vyhodnocuje se maximální síla potřebná pro přetržení a místo přetržení. Během testu jsou zaznamenávány údaje o dráze a síle, z nichž je následně sestrojen pracovní diagram tahové zkoušky. Zkušebním strojem je univerzální servo-hydraulický trhací stroj o jmenovité síle 1000 kN. Jedná se o horizontální stroj s maximálním rozevřením 3000 mm a je vybaven dvěma pohyblivými čelistmi. Do obou čelistí je součást upnuta za dutinu hlavy na trn. Součást se během zatěžování může na trnu pootočit, čímž lze eliminovat vnesení víceosé napjatosti. Celý prostor stroje je pak zakryt průhledným krytem, aby nedošlo ke zranění pracovníka při přetržení vzorku. Rychlost zatěžování je pro všechny vzorky stejná a to $0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Názorná ukázka upnutí součásti na stroji a směru zatěžování je na obrázku 36.

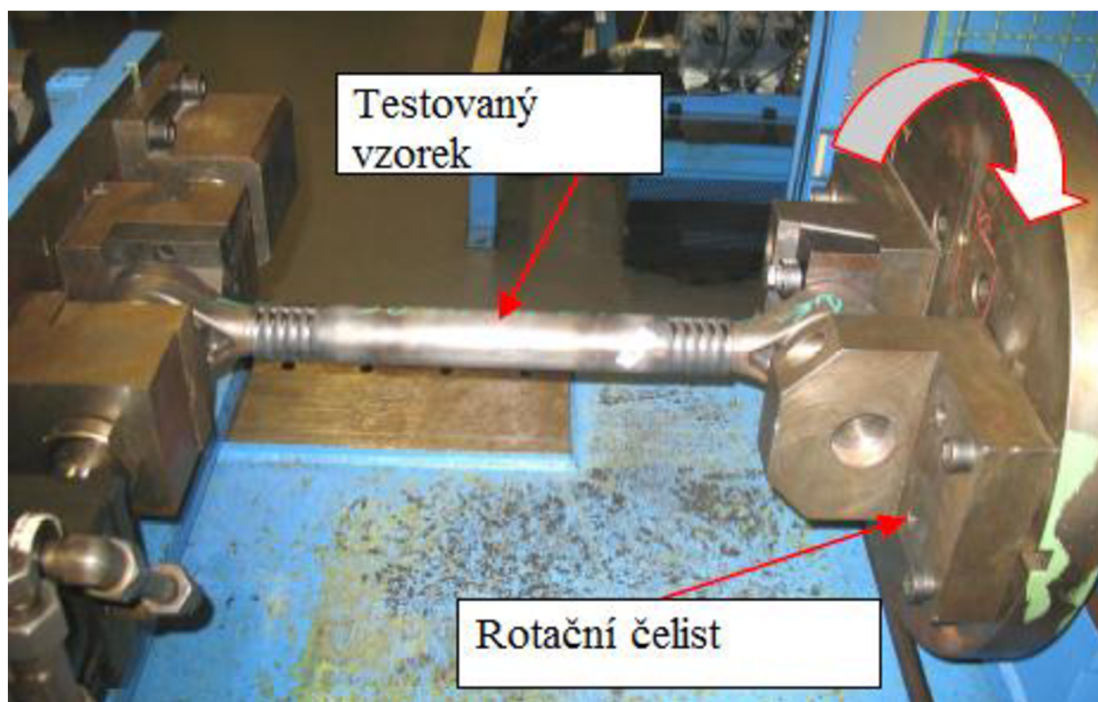


Obr. 36 Upnutí táhla při zkoušce tahem

7.2 Statický test krutem [10]

Při testování spoje krutem je součást upnuta za dutiny hlav táhla, jedna z čelistí je součástí servo-hydraulického rotačního stroje, který součást zatěžuje kroutícím momentem, test končí v okamžiku uvolnění. Během testu se zaznamenává pouze zvyšující se moment a následně je vyhodnocena největší únosnost součásti na krut. Protože nejslabším prvkem je na vodících tyčích v tomto směru právě lisovaný spoj, dochází ve všech případech k porušení právě ve spoji. Aby bylo možné po testu pozorovat místo selhání je před testem

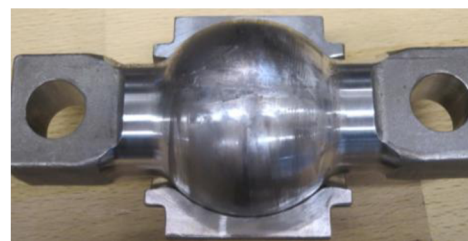
vytvořena ryska značící polohu hlavy a trubky. Princip upínání součástí a směr zatěžování je zobrazen na obrázku 37.



Obr. 37 Princip testu krutem

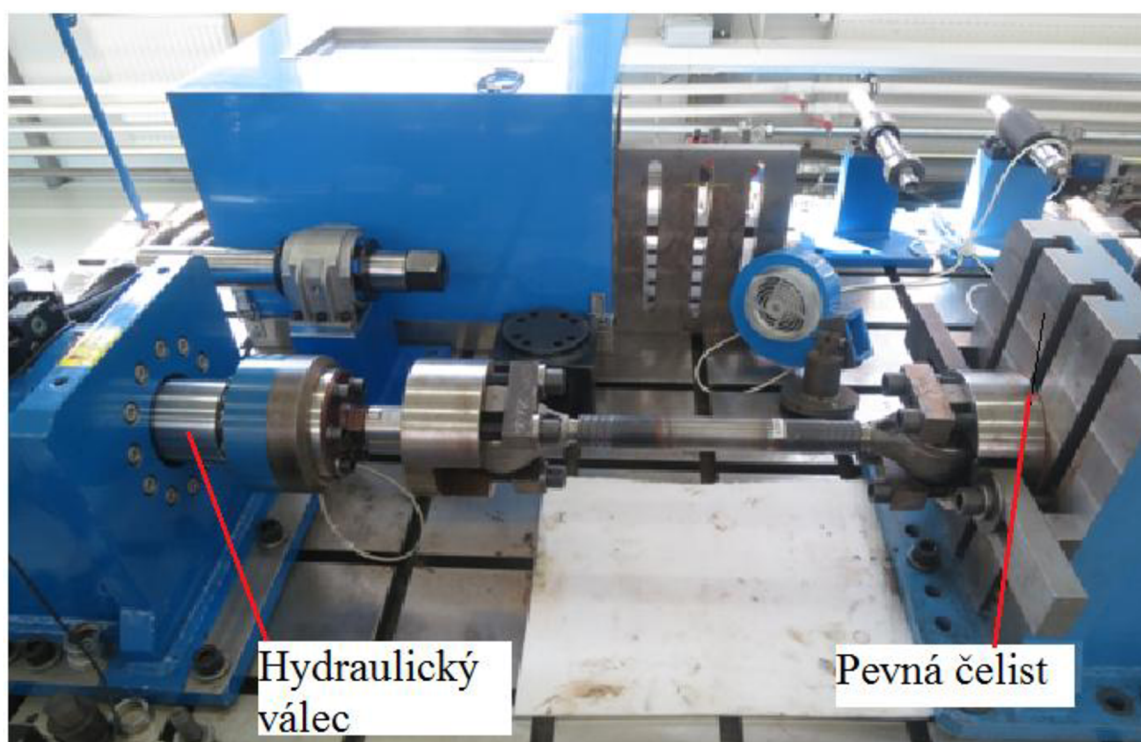
7.3 Dynamický test Tah/tlak [10]

Posledním a zároveň velice důležitým je test vysokocyklový, životnostní dynamický. Tento test nejlépe ze všech tří simuluje skutečný provoz součástí v montážním celku. Součást je při něm namáhána střídavým symetrickým zatěžovacím cyklem Tah/tlak. osa zatěžování je shodná s osou trubky součásti. Test končí ve chvíli, kdy dojde k únavovému lomu (vyhodnocuje se počet cyklů a velikost zatížení), nebo pokud splní požadavky na počet cyklů při daném zatížení. Aby bylo dosaženo optimálního stupně volnosti soustavy, je při testu součást upnuta za speciálně upravené ocelové klouby. Ty v dutině hlavy simulují volnost jako při použití běžného pogumovaného čepu. Ten lze pro test využít také, ale pryž čepu lze zatížit pouze frekvencí 0,5 Hz, v opačném případě dochází k přehřátí gumy a k brzkému znehodnocení celého kloubu. U ocelového kloubu je pryž nahrazena ocelovou miskou v kombinaci s běžným čepem pro skládaný kloub. Ten má tak v průběhu testu možnost volně rotovat a naklápět se, vylučuje se tím možnost víceosého namáhání. Ocelový kloub je zobrazen na obrázku 38, skládá se z čepu a dvoudílné misky, pro usnadnění pohybu je kloub před testem lubrikován tukem. V dutině hlavy je zajištěn běžným pojistným kroužkem.



Obr. 38 Ocelový kloub pro testy

Při použití ocelových kloubů byla frekvence zatěžování stanovena experimentálním způsobem na hodnotu 5Hz. Zatěžující síla byla zvolena 85 a 120 kN. Testovat se tedy bude při dvou různých silách pro docílení křivky životnosti každé varianty. Ocelové čepy jsou dimenzovány na nižší životnost než samotná táhla a je zapotřebí je během testu několikrát vyměnit. Aby nedošlo k poškození stroje, nebo testované součásti je na servo-hydraulickém válci nastaven limit dráhy. Pokud tedy dojde ke vzniku lomu na čepu, nebo jiné komponentě a prodlouží se dráha pístu o více než 4 mm, je celý test pozastaven a po kontrole a výměně komponent znovu manuálně spuštěn. Testovací soustava je na obrázku 39, ta je celá připevněna na testovací desce o rozměrech 4000x3000 mm a výšce zhruba 400 mm. Ta je uložena na několika pružných nohách, které omezují přenášení vibrací.



Obr. 39 Testovací stroj pro vysokocyklové namáhání

8 VYHODNOCENÍ

V této kapitole jsou popsány výsledky jednotlivých testů prováděných při CV fázi vývoje

8.1 Výsledky testu tahem

Pro každou ze šesti variant byly vyrobeny 3 identické zkušební vzorky. U každého vzorku byl zaznamenán pracovní diagram závislosti síly na prodloužení v celém průběhu testu a vyhodnoceny hodnoty maximálního únosného zatížení. Za kladný výsledek lze považovat případ poručení trubky mimo spoj, ideálně v polovině její délky (obr. 40). Takový výsledek má pak pracovní diagram podobný, jako by tomu bylo při běžné tahové zkoušce materiálu trubky. V tabulce 3 jsou znázorněny průměrné hodnoty jednotlivých testovaných variant.

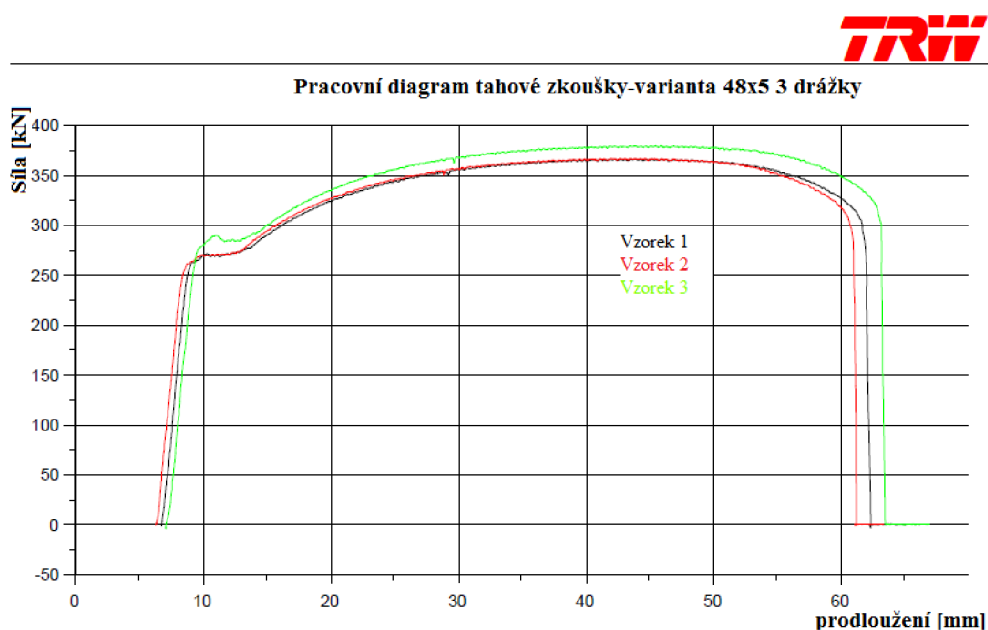


Obr. 40 Ukázka výsledku testu

Tab. 3 průměrná síly pro přetržení táhla

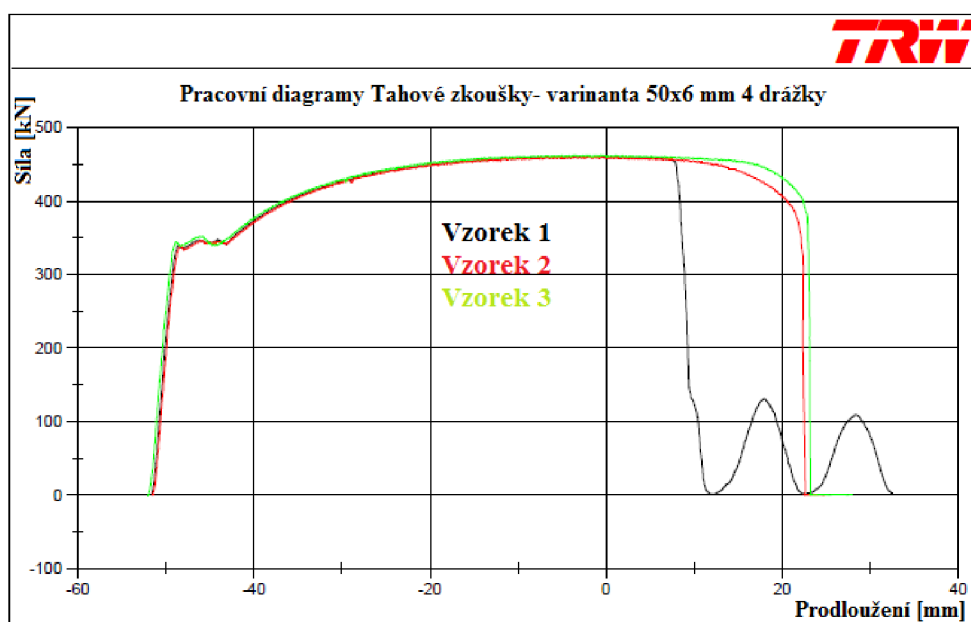
Varianta	Průměrná síla pro přetržení [kN]	Místo poškození	Výsledný stav
1. (48x5-5 drážek)	376,2	Trubka	OK
2. (48x5-4 drážek)	371,4	Trubka	OK
3. (48x5-3 drážek)	371,5	Trubka	OK
4. (50x6-5 drážek)	460,8	Trubka	OK
5. (50x6-4 drážek)	460,2	Trubka/ Uvolnění /vytržení spoje	OK/nOK limitní
6. (50x6-3 drážek)	421,4	Vytržení spoje	nOK

Při hlubším zkoumání výsledků lze pozorovat, že u trubky s tloušťkou stěny 5 mm je nominální síla pro přetržení přibližně 374 kN. Tabulka hodnot pro všechny hodnoty je v příloze 2. U všech testovaných součástí došlo k přetržení trubky mimo lisovaný spoj, tedy u testu obstály všechny tři varianty. Pracovní diagramy na obrázku 41 znázorňují průběh zkoušky pro variantu 48x5 mm se třemi drážkami.



Obr. 41 Ukázka pracovního diagramu tahové zkoušky (48x5-3drážky)

V případě trubky $\varnothing 50 \times 6$ mm s tloušťkou stěny 6 mm byl výsledek pro variantu s pěti drážkami také jednoznačný. Došlo k přetržení trubky mimo spoj při průměrné síle 460 kN. V případě varianty se třemi drážkami je výsledek také jednoznačný, ale naopak nevyhovující. Spoj selhal při průměrné síle 420 kN a ve všech případech došlo k vytržení dřívku ze spoje. V případě varianty se čtyřmi drážkami je pak výsledek na hranici pevnosti spoje. U jednoho vzorku došlo k vytržení dřívku, u dalších dvou se přetrhla trubka, avšak spoje těchto vzorků byly poškozeny testem a došlo k vytvoření vůle ve spoji. Síla se u těchto součástí rovněž pohybovala na kolem 460 kN. Pracovní diagram je na obr. 42. Na tvaru křivky vzorku 1, u kterého došlo k vytržení dřívku lze pozorovat náhlý pokles síly k nulové velikosti. Ten je následován opakovaným nárůstem a poklesem síly. Tento jev je způsoben postupným vytržením dřívku z drážek.

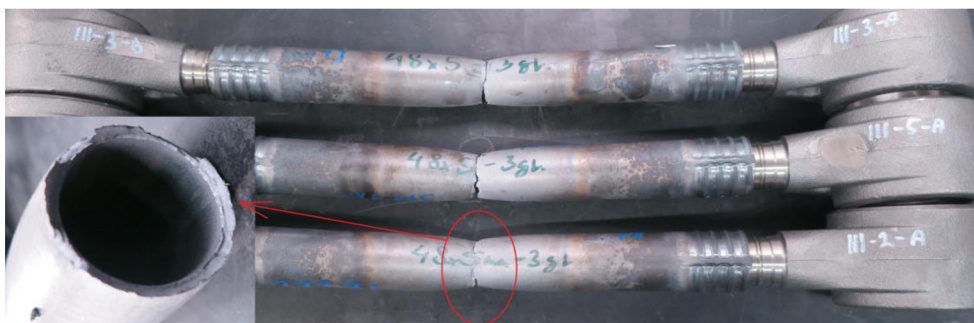


Obr. 42 Ukázka pracovního diagramu tahové zkoušky (50x6-4drážky)

Příklady výsledných vzorků jsou na obrázku 43 a 44.



Obr. 43 Vzorky po přetržení (50x6-4 drážky)



Obr. 44 Vzorky po přetržení (48x5-3 drážky)

8.2 Výsledky testu krutem

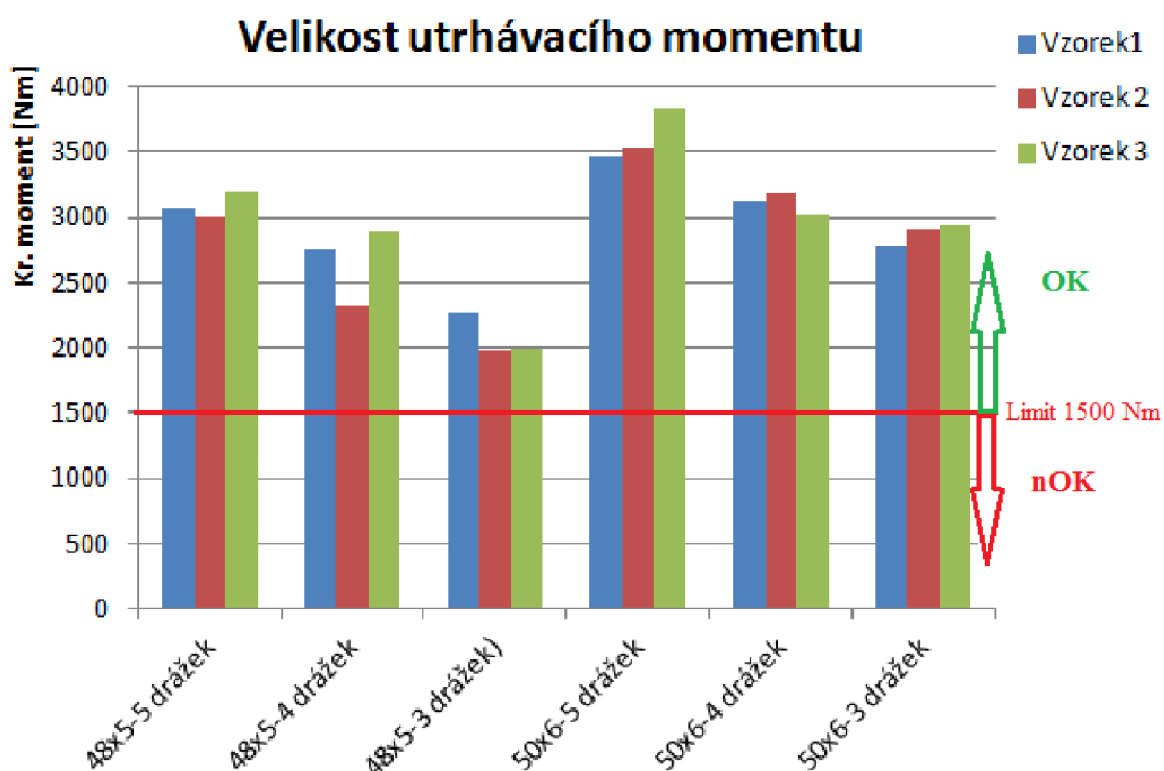
Jak již bylo řečeno v popisu testu, ve všech případech je lisovaný spoj nejslabším místem táhla při zatížení krutem. I v případě tohoto testu došlo k selhání všech součástí přímo ve spoji a trubka se na dřívku protočila. Kritériem je u této zkoušky moment potřebný pro proklouznutí (utržení) trubky na dřívku. Příklad pootočení komponent je na obrázku 45. Limitní hodnota, pod kterou nesmí moment klesnout, byla stanovena následujícím způsobem. Pro dřívek $\varnothing 37,8$ mm je největší používaná hlava velikosti 70 mm. Odpovídající čep, působí v maximální poloze výkyvu 10° na součást kroutícím momentem o velikosti 1000 Nm. Při uvažovaném koeficientu bezpečnosti 1,5 je tak limitní pevnost spoje 1500 Nm. Pokud dosáhne testovaný spoj pevnosti větší, je vyhovující. Testovány byly vždy 3 vzorky od každé varianty. Hodnota výsledných momentů pro testované varianty je znázorněna v tabulce 4. Na první pohled je zřejmé, že žádný ze vzorků se nedostal pod hranici 1500 Nm. Nejhorší vzorky dosáhly hodnoty okolo 2000 N. Proto lze bezpečně říct, že test na krut splnilo 100% testovaných vzorků a všech šest variant je vyhovujících. Hodnoty jsou pro názornost zobrazeny v grafu na obrázku 46.



Obr. 45 Příklad spoje pootočeného krutem

Tab. 4 Výsledné hodnoty kroutících momentů

Varianta	Vzorek 1 [Nm]	Vzorek 2 [Nm]	Vzorek 3 [Nm]	Průměrná hodnota [Nm]	Výsledný stav
1. (48x5-5 drážek)	3067	3002	3189	3086	Ok
2. (48x5-4 drážek)	2742	2315	2894	2650	OK
3. (48x5-3 drážek)	2267	1985	1987	2080	OK
4. (50x6-5 drážek)	3468	3524	3839	3610	OK
5. (50x6-4 drážek)	3117	3183	3023	3108	OK
6. (50x6-3 drážek)	2779	2910	2945	2878	OK



Obr. 46 Graf utrhávacích momentů

8.3 Výsledky dynamického testu

Stejně jako u předešlých dvou testů, byly testovány vzorky z připravených šesti skupin. Od každé skupiny však byly testovány vzorky čtyři. Dva byly testovány při zatížení ± 85 kN a frekvenci 5 Hz. Další dva pak při zatížení ± 120 kN a frekvenci také 5 Hz. Snahou bylo docílit hodnot životnosti každé varianty při dvou rozlišných zatíženích pro možnost sestavit následně přibližnou křivku životnosti. Při testování u skupiny vzorků s trubkou $\text{Ø}50 \times 6$ mm docházelo k únavovým lomům na dříku v oblasti nezalisovaných drážek (viz. kap. 6) a tomu musel být způsob vyhodnocení přizpůsoben. Při běžném výsledku vzniká únavový lom na trubce v přechodu ze zalisovaného místa na nezdeformovanou část, tedy v oblasti za koncem dříku. Stejně jako je tomu u zkoušky přetrží tahem nesmí dojít k defektu v místě spoje, tedy k vytržení dříku z trubky. Během testu, lze zaznamenávat mnoho fyzikálních veličin, ale v našem případě je důležitý pouze konečný počet cyklů ve chvíli únavového lomu. Limitní hodnoty únavy, dle zatížení v automobilu je stanovena zákazníkem.

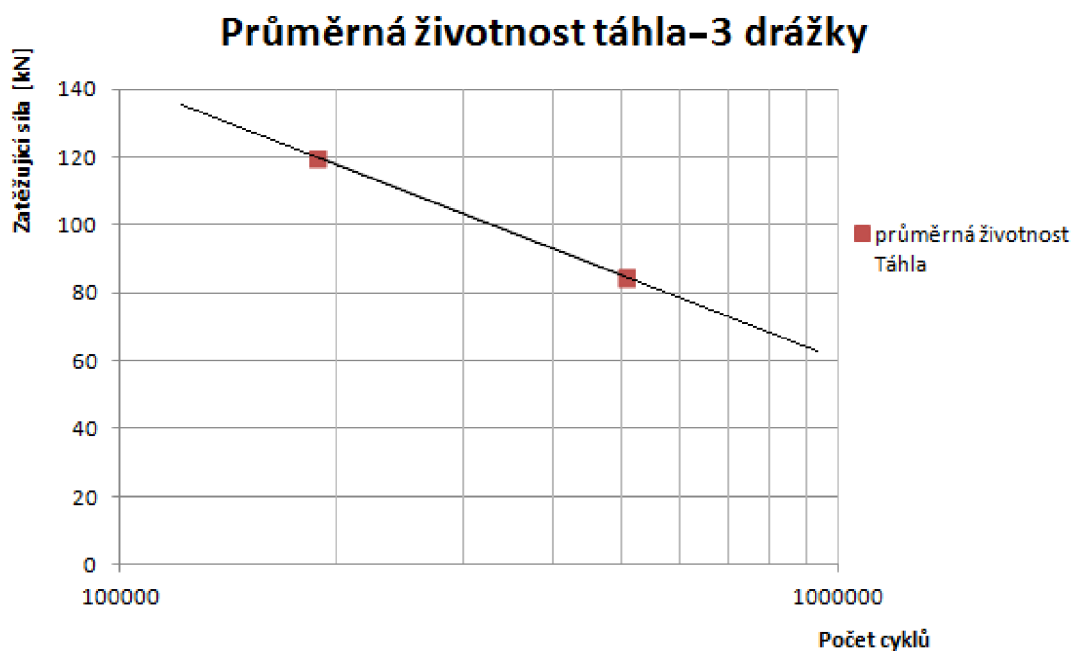
U vzorků s trubkou $\text{Ø} 48 \times 5$ mm došlo ve většině případů k únavě materiálu přímo za koncem dříku na materiálu trubky, tak jak je obvyklé. Pouze u dvou vzorků došlo k lomu na dříku v nezalisované drážce. Výsledky celého testu jsou přehledně zobrazeny v tabulce 5.

8.3.1 vyhodnocení trubky $\text{Ø} 48 \times 5$ mm

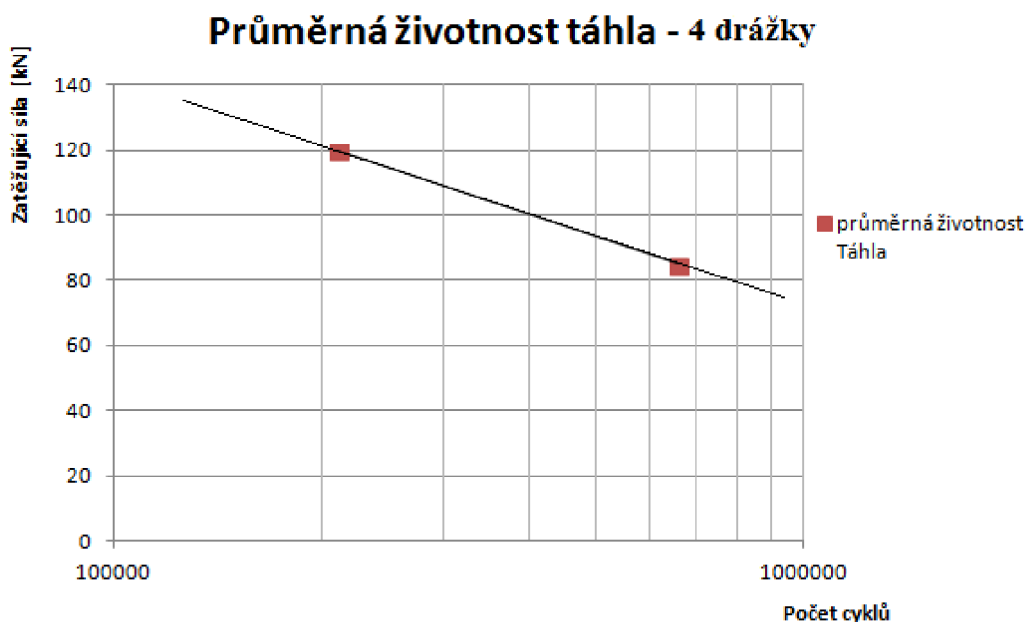
Tab. 5 Výsledky počtu cyklů v dynamickém testu- vzorky s trubkou $\text{Ø} 48 \times 5$ mm

Vzorky se 3 drážkami	Zatížení 85 kN	Zatížení 120 kN	Místo lomu
Vzorek 1		187 574	Trubka
Vzorek 2	326 700		Dřík v drážce (neprůkazný)
Vzorek 3		201 133	Dřík v drážce (neprůkazný)
Vzorek 4	503 940		Trubka
Průměrný počet Cyklů	503 940	187 574	
Vzorky se 4 drážkami	Zatížení 85 kN	Zatížení 120 kN	Místo lomu
Vzorek 1		201 120	Trubka
Vzorek 2	715 882		Trubka
Vzorek 3		221 001	Trubka
Vzorek 4	601 279		Trubka
Průměrný počet Cyklů	658 581	211 061	
Vzorky se 5 drážkami	Zatížení 85 kN	Zatížení 120 kN	Místo lomu
Vzorek 1	868 669		Trubka
Vzorek 2		201 736	Trubka
Vzorek 3		187 611	Trubka
Vzorek 4	786 503		Trubka
Průměrný počet Cyklů	827 586	194 674	

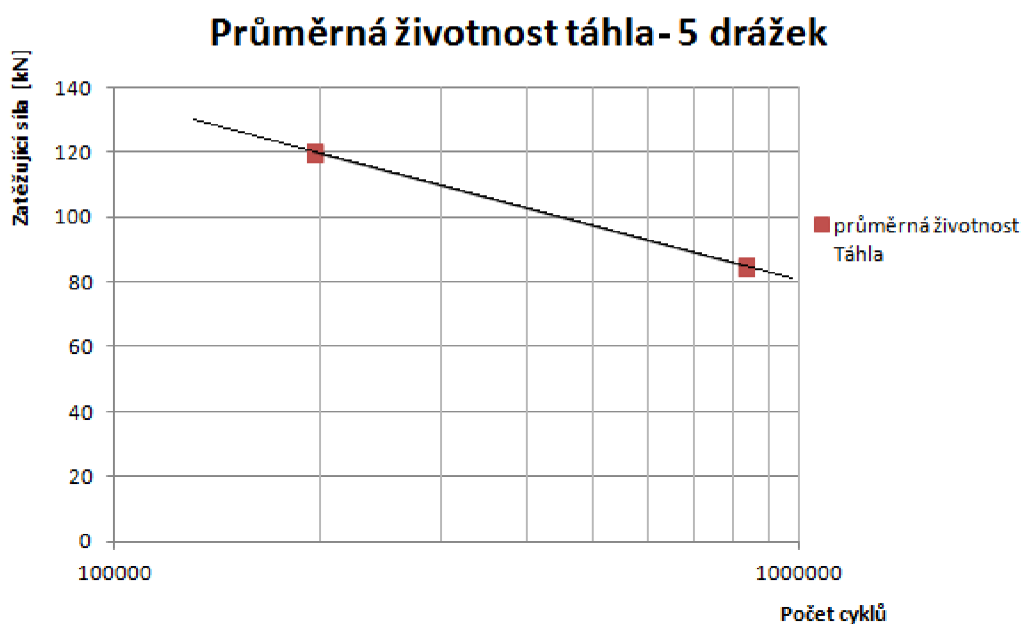
Z průměrných hodnot cyklů pak byly sestrojeny přibližné křivky životnosti pro každou variantu prototypů. Pro získání přesnějších výsledků by bylo zapotřebí provést test s větším počtem vzorků, který by byl velmi časově náročný. Získání přesnějších křivek pak bude účelem následující fáze DV. Grafy životnosti jednotlivých variant jsou na obrázcích 47-49.



Obr. 47 Graf životnosti táhla s třemi drážkami pro trubku $\varnothing 48 \times 5$ mm



Obr. 48 Graf životnosti táhla se čtyřmi drážkami pro trubku $\varnothing 48 \times 5$ mm



Obr. 49 Graf životnosti táhla s pěti drážkami pro trubku $\varnothing 48 \times 5$ mm

Výsledek testu trubky je velice uspokojivý, při testu nedošlo ke snížení životnosti spoje. Mírné odchylky v počtu cyklů mezi jednotlivými variantami lze přisoudit zjednodušené výrobě prototypů CV fáze. Současně jsou data zatížena také malým počtem vzorků, u kterých se výsledná životnost reálných dílů (vyrobených za stejných podmínek) může lišit.



Obr. 50 Příkladů únavových lomů táhel (na dříku-neplatný; na trubce)

8.3.2 vyhodnocení trubky 50x6 mm

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly u vzorků s trubkou Ø50x6 mm, docházelo během testu k únavovým lomům dřívě, které znehodnotily celkové cykly životnosti. Z tohoto důvodu byla tato skupina vzorků vyhodnocena rozdílným způsobem. Na základě zákaznické specifikace, která předepisuje životnost téměř identických součástí, byla stanovena spodní hranice životnosti. Tato specifikace udává, že při zatížení ±90 kN musí součást přežít 400 000 cyklů. Podle následujícího vztahu (12) byl limit přepočítán na zatížení 85 a 120 kN.

$$N = 4 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{F_f}{F_a}\right)^5 = 4 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{90}{85}\right)^5 = 532\,326 \quad (12)$$

Kde: N je počet cyklů pro zatížení F_a

F_f je síla dle výkresu

F_a je požadovaná testovací síla

Dle vztahu 12 tak byly určeny minimální limity potřebné ke splnění zákaznického požadavku. Pro zatížení ±85 kN je limit 532 326 cyklů, zatížení ±120 kN pak musí splnit 94 922 cyklů. Dle takto nastavených kritérií byly součásti dále testovány a vyhodnoceny.

Tab. 6 shrnuje výsledky dosažené při testu vzorků s trubkou Ø 50x6 mm

Tab.6 Shnutí výsledků životnostního testu pro trubku Ø 50x6 mm

Vzorky se 3 drážkami	Zatížení 85 kN	Zatížení 120 kN	Místo lomu	Výsledný stav
Vzorek 1	>532 326		Bez poškození -	ok
Vzorek 2	>532 326		Bez poškození	ok
Vzorek 3		>94 922	Bez poškození	ok
Vzorek 4		>94 922	Bez poškození	ok
Vzorky se 4 drážkami	Zatížení 85 kN	Zatížení 120 kN	Místo lomu	Výsledný stav
Vzorek 1		>94 922	Bez poškození	ok
Vzorek 2		>94 922	Bez poškození	ok
Vzorek 3	>532 326		Bez poškození	ok
Vzorek 4	>532 326		Bez poškození	ok
Vzorky se 5 drážkami	Zatížení 85 kN	Zatížení 120 kN	Místo lomu	Výsledný stav
Vzorek 1	>532 326		Bez poškození	ok
Vzorek 2		>94 922	Bez poškození	ok
Vzorek 3		>94 922	Bez poškození	ok
Vzorek 4	>532 326		Bez poškození	ok

Všechny tři skupiny úspěšně splnily minimální požadavek zákazníka, lze tak říci že i při použití tří drážek na dřívě byla zachována požadovaná pevnost spoje.

9 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Ekonomické zhodnocení projektu je rozděleno na dvě části. V první části je řešena samotná cena výzkumu, v druhé pak finanční úspory a úspory na hmotnosti. Výpočty úspor jsou uvažovány pro variantu zkrácení dřívku o jednu drážku (na celkové 4). Důvodem je selhání dřívku se třemi drážkami při testu přetržením u jedné varianty trubky. Protože obě varianty se vyrábějí z identického polotvaru, musí být změna provedena komplexně.

Při výpočtu cen výzkumu, byly použity dostupné přibližné hodnoty získané od firmy. V ceně pak není započítána cena vedlejších nákladů: návrh designu a výroby prototypů, plánování testů, náklady na dopravu.

Celkový počet testovaných vzorků:

- Test tahem.....6x3.....18 ks
- Test krutem.....6x3.....18 ks
- Test dynamický.....6x4.....24 ks

Celkem bylo tedy otestováno 60 kusů táhel

Ceny jednotlivých komponent táhel, jejich ceny a ceny testování jsou uvedeny v Tab. 7

Tab. 7 Ceny materiálových, technologických a testovacích položek

Položka	Počet Položek	Jednotková cena [Kč]	Cena celkem [Kč]
Hlava	120	274	32 880
Trubka Ø48x5 mm	-	-	-
• 5 drážek (Délka 395 mm)	10	83	830
• 4 drážky (Délka 369 mm)	10	77	770
• 3drážky (Délka 348 mm)	10	73	730
Trubka Ø50x6 mm	-	-	-
• 5 drážek (Délka 395 mm)	10	100	1 000
• 4 drážky (Délka 369 mm)	10	93	930
• 3drážky (Délka 348 mm)	10	88	880
Zalisování	120	26	3 120
Ocelová miska	16	1 938	31 008
Ocelový čep	25	329	8 225
Test Tahem	18	489	8802
Test Krutem	18	458	8244
Dynamický test	24	10 328	247 872
Celková hodnota	-	-	345 291

Výsledná cena projektu rozhodně není cenou konečnou. Práce je věnována pouze fázi ověření konceptu a před možným aplikováním na sériové díly budou muset součástí projít následující DV fázi. V té bude nutné vyrobit součásti již nezjednodušeným způsobem, pak bude o mnoho dražší z důvodu nutnosti výroby lisovacího nástroje a nutností výroby hlav se zkráceným dřívkem.

Tato část ekonomického zhodnocení uvádí hodnoty úspor v případě zavedení zkráceného dřívku se čtyřmi drážkami do sériové výroby.

Úspora hmotnosti a cena uspořené materiálu je zaznamenána v Tab. 6. Cena materiálu hlavy (GJS-500-7) je přibližně 10,80 Kč za kilogram. Uváděné hmotnosti byly vypočteny pomocí softwaru Autodesk Inventor professional 2014.

Druhy finančních úspor:

- Materiál- materiálová úspora na polotovaru jedné hlavy činí 100g, při uvažované ceně 10,8 Kč za kilogram je tak úspora 1,08 Kč na kus.
- Doprava- protože doprava polotovaru ze slévárny je počítána za přepravené tuny budou v případě lehčí hlavy i náklady na dopravu polotovaru nižší. Cena dopravy není jednoduše vyčíslitelná, její vliv není velký a proto nebyla zahrnuta
- Obrábění- časová úspora při obrábění dřívku je nepatrná a proto není dále uvažována. Uvažována není ani úspora trvanlivosti nástroje, která je přibližně 20%.

Při uvažování úspory pouze za cenu materiálu pak bude na jednom táhle cena nižší o 2,06 Kč za táhlo. Cena materiálu tvoří 75% z celkové ceny jednoho kus. Finančních úspor v závislosti na počtu vyrobených kusů za rok jsou na obrázku 51.



Obr. 51 Závislost úspor na velikosti roční série

Při výpočtu úspor hmotnosti táhla je potřeba brát pouze čisté hmotnosti obrobených hlav. U obrobené hlavy je vypočítána úspora hmotnosti 79g oproti původní hlavě. Výsledná součást dodávaná zákazníkovi by byla lehčí o 158g při zachování životnosti.

10 ZÁVĚRY

Na základě řešeršní části byla provedena analýza pěchovaného materiálu E355+N. Z pěchovací zkoušky je zřejmé, že materiál má při testu za studena tendenci zpevňovat. Při teplotě lisování, tedy přibližně 700°C je již materiál velice dobře tvárný.

Z numerického výpočtu metodou konečných prvků v softwaru FormFEM byla stanovena přibližná hodnota logaritmického přetvoření $\varphi=0,2-0,3$. Zároveň byl výpočtem znázorněn i proces zaplnění drážky dříku, zde po zalisování zůstává úzká mezera, kde nedojde k zatečení materiálu.

Při ověřování konceptu navrženého firmou byly vyrobeny prototypy se zkráceným lisovaným spojem s 5,4 a 3 drážkami pro dvě různé trubky $\varnothing 48 \times 5$ a $\varnothing 50 \times 6$ mm.

Pro otestování koncepčních prototypů byly zvoleny tři duhy základních testů, které se na součásti běžně aplikují. Statický test přetržením, test krutem a dynamický vysokocyklový test pro zjištění životnosti.

Během testu přetržení byl nalezen limit spoje při 460 kN u vzorků se čtyřmi drážkami a trubku $\varnothing 50 \times 6$ mm. Zde docházelo k destrukci spoje i trubky. Varianta se třemi drážkami pro tutéž trubku byla nevyhovující. Vzorky pro trubku $\varnothing 48 \times 5$ byly ve všech případech úspěšné s průměrnou silou pro přetržení 374 kN.

Pro test krutem byl stanoven limit pevnosti 1500 Nm, jež všechny vzorky splnily s rezervou.

V dynamickém testu byly vzorky testovány při dvou rozdílných zatíženích 85 a 120 kN. U trubky $\varnothing 48 \times 5$ mm byl výsledek opět vyhovující a v žádném z případů nedošlo k selhání spoje. Na základě toho byly sestrojeny přibližné křivky životnosti, které určují použitelnost u zákazníka. U trubky 50×6 byly vzorky během testu znehodnoceny únavovým lomem v nezalisované drážce dříku. Data byla následkem toho vyhodnocena podle minimálního limitu životnosti dle specifikace zákazníka. Zde bylo prokázáno, že všechny vzorky splňují tento limit.

Protože pro obě velikosti trubek je použit stejný dřík a vychází ze stejného polotovaru, bylo na základě výsledků testů doporučeno firmě provést další vývoj se zkráceným dříkem pro čtyři drážky. Důvodem je selhání spoje při třech drážkách u trubky 50×6 mm a limitní pevnost spoje při drážkách čtyřech. Firma s vyhodnocenými výsledky souhlasila a plánuje pokračování ve vývoji na základě udělených doporučení.

Na základě výpočtu byla stanovena značná úspora hmotnosti 158g (při použití 4 drážek) na jednom táhle při zachování požadované pevnosti spoje. Při montáži na nákladní automobil je úspora několikanásobná, protože na jednom nákladním vozidle můžeme takových táhel najít celou řadu v různých modifikacích. Finanční úspora pro firmu je pak na jednom táhle 2,16 Kč pouze za materiál.

Seznam použitých zdrojů

- 1 ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992, 524 s. ISBN 8003006511.
- 2 FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1992, 167 s. ISBN 80-214-0415-9.
- 3 HOSFORD, William F a Robert M CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 3rd ed. New York, NY: Cambridge University Press, 2007, xiii, 312 p. ISBN 05-218-8121-8.
- 4 LENFELD, Petr. *Technologie tváření kovů* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- 5 LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření II*. Vyd. 1. Brno: Univerzita obrany, 2008, 106 s. ISBN 978-80-7231-580-2.
- 6 SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů: mechanics and metallurgy*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 175 s. ISBN 80-704-3417-1.
- 7 *Metals handbook*. 9th ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1989, 17 v. ISBN 08717000771.
- 8 *Fertigungsrichtlinie: Rillenschäfte Rillenform C*. Düsseldorf: TRW Fahrwerksysteme GmbH & Co. KG, 2002.
- 9 *Stručný úvod do konstrukce nákladního automobilu, díl 1*. [online]. 2012 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.liaznavzdy.cz/nedtrans/konstrukce1.php>
- 10 *Generic Product Specification for Commercial Vehicles: Rear axle products: Radius rods, V-links Groups: 38, 72*. Rev. A. Düsseldorf: TRW Automotive GmbH, Tech Center Düsseldorf, 2012.
- 11 *Duté ocelové tyče určené k obrábění- Technické dodací podmínky- Část1: Nelegované a legované oceli*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2006.

- 12 *DEWE-30-4* [online]. 2012 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <https://ccc.dewetron.com/pr/dewe-30-4>
- 13 ŽÍDEK, Milan. *Tváření oceli*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1988, 520 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CNC	[-]	Computer numeric control
CV	[-]	Concept validation/ koncepční fáze vývoje
DV	[-]	Design validation/ designová fáze vývoje
MKP	[-]	Metoda konečných prvků

Symbol	Jednotka	Popis
a	[mm]	Obecné znázornění znázornění posunu atomových rovin
b	[mm]	Šřka hranolu
D₀	[mm]	Výchozí průměr vzorku
D1	[mm]	Průměr dutiny pro čep
D2	[mm]	Průměr dříku
D_{si}	[mm]	Střední průměr vzorku v čase
F	[N]	Obecná síla
F_a	[kN]	Síla pro testování
F_f	[kN]	Síla daná zákazníkem
F_i	[N]	Síla v čase
F_N	[N]	Normálová síla
F_T	[N]	Třecí síla
h	[mm]	Výška hranolu
H₀	[mm]	Výchozí výška vzorku
H_i		Skutečná výška vzorku v čase
L	[mm]	Vzdálenost osy dutiny pro čep a první drážky
l	[mm]	Délka hranolu
N_c	[-]	Počet cyklů
V	[mm ³]	Obejm vzorku
Φ_i	[-]	Skutečná deformace v čase
φ	[-]	Skutečná (logaritmická deformace)
τ	[MPa]	Smykové napětí na stykové ploše
σ_{pi}	[MPa]	Přirozený přetvárný odpor v čase
σ_N	[MPa]	Normálové napětí na stykové ploše
μ	[-]	Součinitel tření
ε_{pl}	[-]	Deformace plastická
ε_{el}	[-]	Deformace elastická

Symbol	Jednotka	Popis
ϵ_c	[-]	Celková deformace
ϵ_3	[-]	Poměrné prodloužení
ϵ_2	[-]	Poměrné rozšíření
ϵ_1	[-]	Poměrné stlačení
ϵ	[-]	Poměrná deformace
Δl	[mm]	Absolutní změna délky
Δh	[mm]	Absolutní změna výšky
ΔH	[mm]	Absolutní změna výšky vzorku v čase
Δb	[mm]	Absolutní změna šířky

Seznam obrázků

Obr. 1 Příklady použití vodících tyčí [9]	8
Obr. 2 Rozměry dříku hlavy [8].....	9
Obr. 3 Schéma průběhu deformace [4]	10
Obr. 4 Obecná změna plasticity v závislosti na teplotě [5].....	12
Obr. 5 Nerovnoměrná deformace při pēchování.....	13
Obr. 6 Příklad táhel vyrobených různými technologiemi [10]	16
Obr. 7 Pogumovaný čep [10].....	17
Obr. 8 Složení pogumovaného a skládaného čepu [10].....	17
Obr. 9 Komora tryskače; polotovár hlavy-odlitek	18
Obr. 10 Upínání hlavy při obrábění; obrobená hlava připravená na montáž.....	19
Obr. 11 Polotovár čepu-výkovek a obrobený čep pro pogumování	20
Obr. 12 Tvar obrobení pro svařování.....	20
Obr. 13 Lisovací matrice	20
Obr. 14 Ukázka jednoduchého ohybu.....	21
Obr. 15 Montáž pogumovaných čepů a příklad montáže vodících táhel.....	21
Obr. 16 Blokové schéma zapojení snímačů při testu a modul pro převod signálu [12]	22
Obr. 17 pracovní diagram pēchovací zkoušky.....	23
Obr. 18 Graf závislosti pētvárného odporu na pētvoření	24
Obr. 19 Vzorky před a po zkoušce	24
Obr. 20 Návrh modelu pro výpočet	25
Obr. 21 Vytvořená síť	25
Obr. 22 Zobrazení podmínek při výpočtu.....	26
Obr. 23 Teplotní pole (100% výpočtu)	26
Obr. 24 Teplotní pole (100% výpočtu) - upravený rozsah vykreslení.....	27
Obr. 25 Log. pētvoření (0% výpočtu)	27
Obr. 26 Log. pētvoření (55% výpočtu)	27
Obr. 27 Log pētvoření (100% výpočtu)	27
Obr. 29 Průběh zaplnění drážky dříky	28
Obr. 28 Detail nedokonalostí dolisování	28
Obr. 31 výroba prototypů-varianta 2	29
Obr. 30 Výroba prototypů-varianta 1	29
Obr. 32 Rozměry dříku pro zkrácení trubky [8]	30
Obr. 33 Pracoviště pro lisování.....	31
Obr. 34 Spoj trubka Ø 48x5 mm spolu s 3,4,5 drážkami	31
Obr. 35 Spoj trubka Ø 50x6 mm spolu s 3,4,5 drážkami	31
Obr. 36 Upnutí táhla při zkoušce tahem	32
Obr. 37 Princip testu krutem.....	33
Obr. 38 Ocelový kloub pro testy.....	33
Obr. 39 Testovací stroj pro vysokocyklové namáhání	34
Obr. 40 Ukázka výsledku testu	35
Obr. 41 Ukázka pracovního diagramu tahové zkoušky (48x5-3drážky).....	36
Obr. 42 Ukázka pracovního diagramu tahové zkoušky (50x6-4drážky).....	36
Obr. 43 Vzorky po pētržení (50x6-4 drážky)	37
Obr. 44 Vzorky po pētržení (48x5-3 drážky)	37
Obr. 45 Příklad spoje pootočeného krutem	37
Obr. 46 Graf utrřavacích momentů	38
Obr. 47 Graf životnosti táhla s třemi drážkami pro trubku Ø 48x5 mm.....	40

Obr. 48 Graf životnosti táhla se čtyřmi drážkami pro trubku Ø 48x5 mm.....	40
Obr. 49 Graf životnosti táhla s pěti drážkami pro trubku Ø 48x5 mm.....	41
Obr. 50 Příklady únavových lomů táhel (na dřívku-neplatný;na trubce)	41
Obr. 51 Závislost úspor na velikosti roční série	44

Seznam tabulek

Tab.1 Chemické složení oceli E355+N v hmotnostních procentech
Tab.2 Varianty vyrobených prototypů
Tab.3 Průměrná síly pro přetržení táhla
Tab.4 Výsledné hodnoty kroutících momentů
Tab.5 Výsledky počtů cyklů v dynamickém testu- vzorky s trubkou Ø 48x5 mm
Tab.6 Shrnutí výsledků životnostního testu pro trubku Ø 50x6 mm
Tab.7 Ceny materiálových, technologických a testovacích položek

Seznam příloh

Příloha 1	Tabulka zaznamenaných a vypočtených hodnot při pýchovací zkoušce
příloha 2	Tabulka zaznamenaných hodnot při tahové zkoušce
příloha 3	Výrobní výkres prototypových dílů

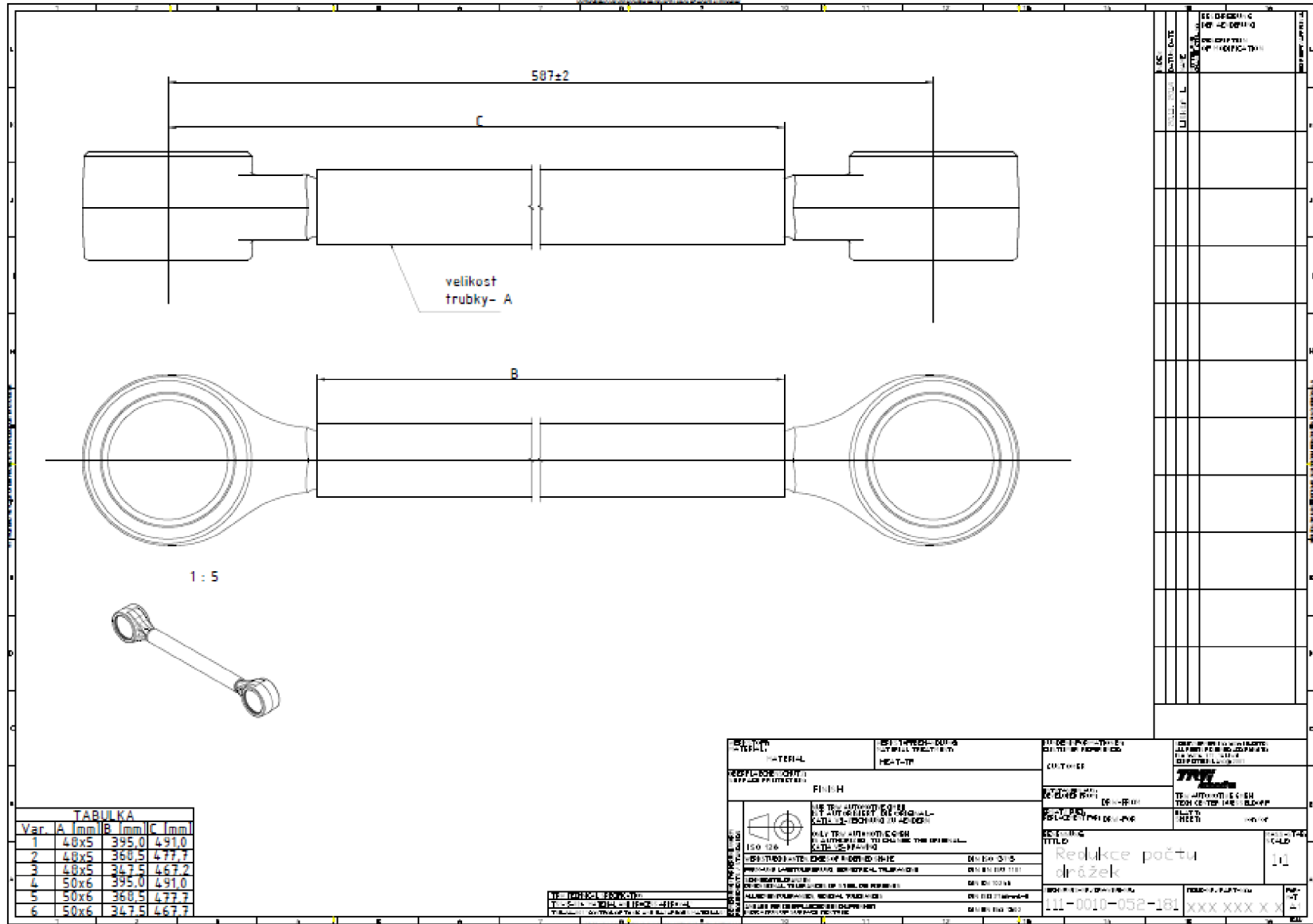
PŘÍLOHA 1

Pro teplotu 700°C						
Dráha zaznamenaná [mm]	Síla Fi [N]	Dráha skutečná ΔH [mm]	Výška vzorku Hi[mm]	střední průměr Ds [mm]	σ_{pi} [Mpa]	ϕ_i
4,54	0,00	0,00	28,01	17,94	0,00	0,000
4,66	4351,08	0,12	27,89	17,98	17,14	0,004
4,69	10652,65	0,15	27,86	17,99	41,92	0,006
4,79	18154,51	0,25	27,76	18,02	71,19	0,009
4,94	34358,53	0,40	27,61	18,07	134,00	0,014
5,19	42010,43	0,65	27,36	18,15	162,39	0,023
5,39	49512,30	0,85	27,16	18,22	189,99	0,031
5,60	53863,38	1,06	26,95	18,29	205,06	0,039
5,91	53263,23	1,37	26,64	18,39	200,44	0,050
6,09	56414,01	1,55	26,46	18,46	210,85	0,057
8,66	59414,75	4,12	23,89	19,42	200,49	0,159
11,30	62565,54	6,76	21,25	20,59	187,83	0,276
13,83	70217,44	9,29	18,72	21,94	185,69	0,403
16,30	75768,81	11,76	16,25	23,55	173,90	0,545
18,80	90772,55	14,26	13,75	25,61	176,28	0,712
21,04	104575,97	16,50	11,51	27,99	169,98	0,890
Pro teplotu 25°C						
Dráha zaznamenaná [mm]	Síla Fi [N]	Dráha skutečná ΔH [mm]	Výška vzorku Hi[mm]	střední průměr Ds [mm]	σ_{pi} [Mpa]	ϕ_i
3,11	737,28	0,00	27,87	17,98	2,90	0,000
3,16	10639,74	0,05	27,82	18,00	41,81	0,002
3,30	18291,64	0,19	27,68	18,04	71,53	0,007
3,36	39596,93	0,25	27,62	18,06	154,50	0,009
3,48	69604,39	0,37	27,50	18,10	270,42	0,013
3,74	111014,67	0,63	27,24	18,19	427,23	0,023
4,00	151674,76	0,89	26,98	18,28	578,06	0,032
4,20	157376,17	1,09	26,78	18,35	595,32	0,040
4,41	174930,54	1,30	26,57	18,42	656,47	0,048
4,68	186783,48	1,57	26,30	18,51	693,99	0,058
7,18	231944,70	4,07	23,80	19,46	779,86	0,158
9,86	267053,41	6,75	21,12	20,66	796,59	0,278
12,89	315365,42	9,78	18,09	22,32	805,80	0,432
14,77	357375,85	11,66	16,21	23,58	818,32	0,542
17,35	424442,50	14,24	13,63	25,72	817,01	0,716
18,52	460751,53	15,41	12,46	26,90	810,78	0,805

PŘÍLOHA 2

Test přetržením	Trubka 48x5 mm			
Vzorek	3 Drážky síla [kN]	4 Drážky síla [kN]	5 Drážek síla [kN]	Tube damaged
1			374,5	Tube damaged
2			374,7	Tube damaged
3			379,5	Tube damaged
4		366,6		Tube damaged
5		367,7		Tube damaged
6		380		Tube damaged
7	372,7			Tube damaged
8	370,8			Tube damaged
9	371			Tube damaged
Průměr	371,5	371,4	376,2	
Test přetržením	Trubka 50x6 mm			
Vzorek	3 Drážky síla [kN]	4 Drážky síla [kN]	5 Drážek síla [kN]	Results
1			463	Tube damaged
2			459	Tube damaged
3			460,4	Tube damaged
4		460,6		Tube damaged
5		459		Tube damaged
6		461		Tube damaged
7	438			connection damaged
8	411			connection damaged
9	414,2			connection damaged
Průměr	421,4	460,2	460,8	

Příloha 3



MATERIÁL HEAT-TREAT	MATERIÁL HEAT-TREAT	MATERIÁL HEAT-TREAT	MATERIÁL HEAT-TREAT
KVALITA TOLERANCE	KVALITA TOLERANCE	KVALITA TOLERANCE	KVALITA TOLERANCE
FINISH USE THE APPROPRIATE FINISH TO ACHIEVE THE REQUIRED SURFACE QUALITY AND TO AVOID CORROSION.	FINISH USE THE APPROPRIATE FINISH TO ACHIEVE THE REQUIRED SURFACE QUALITY AND TO AVOID CORROSION.	FINISH USE THE APPROPRIATE FINISH TO ACHIEVE THE REQUIRED SURFACE QUALITY AND TO AVOID CORROSION.	FINISH USE THE APPROPRIATE FINISH TO ACHIEVE THE REQUIRED SURFACE QUALITY AND TO AVOID CORROSION.
ISO 128 FIRST ANGLE PROJECTION UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ISO 128 FIRST ANGLE PROJECTION UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ISO 128 FIRST ANGLE PROJECTION UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ISO 128 FIRST ANGLE PROJECTION UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
TITLE Redukce počtu drážek	TITLE Redukce počtu drážek	TITLE Redukce počtu drážek	TITLE Redukce počtu drážek
11-0010-052-181	11-0010-052-181	11-0010-052-181	11-0010-052-181