



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# ROZBOR SVAŘOVÁNÍ TŘENÍM V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

ANALYSIS OF FRICTION WELDING IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Čurda

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček, IWE

BRNO 2023

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jakub Čurda**  
Studijní program: Základy strojírenského inženýrství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubiček, IWE**  
Akademický rok: 2022/23

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:

## Rozbor svařování třením v automobilovém průmyslu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nekonvenční metody svařování mají své zastoupení i při výrobě dopravních prostředků. Svařování třením je při výrobě komponentů v automobilovém průmyslu velmi široce zastoupeno. Bakalářská práce je zaměřena na rozbor a porovnání použití třecího svařování a mechanického spojení u táhla pro nákladní automobily

### Cíle bakalářské práce:

- vypracování literární studie zaměřené na oblast třecího svařování,
- popis funkce a výroby táhla,
- provedení experimentu,
- vyhodnocení svarového spoje.

### Seznam doporučené literatury:

ASM handbook Welding, brazing, and soldering Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá aplikací svařování třením v automobilovém průmyslu, jmenovitě při výrobě táhel pro nákladní automobily ve firmě THK RYTHM AUTOMOTIVE CZECH, a.s., a ověřením vlastností svarového spoje. V rozboru součásti jsou uvedeny a rozebrány veškeré relativní informace týkající se výroby komponent pro táhlo a výroby samotného táhla. Teoretická část se věnuje rozboru svařování třením a jeho mechanismů, s ohledem na historický vývoj a uplatnění této metody. V experimentální části jsou za pomoci materiálových zkoušek ověřeny mechanické vlastnosti materiálu svaru, bylo zde využito tahové zkoušky, měření tvrdosti a makroskopického pozorování. Z výsledků těchto testů jsou následně vyvozeny závěry pro aplikaci táhla v praxi a jeho výrobní proces.

### **Klíčová slova**

THK, svařování třením, táhlo, náprava nákladního automobilu, KUKA

## **ABSTRACT**

This thesis focuses on application of friction welding in automotive industry, namely in the production of radius rods used in axels of heavy duty commercial vehicles by the THK RYTHM AUTOMOTIVE CZECH, a.s. company, and the verification of properties of the weld. The breakdown for the rod consist of all the information on the manufacturing of the components the rod consist of, as well as information on the welding process. The theoretical part of this thesis focuses on analysis of friction welding and its mechanisms, with emphasis on the evolution and application of this style of welding. Main focus of the experimental section is verification of mechanical properties of the weld, this is done using a tensile strength test, microscopic observation and hardness measuring. The data collected using these tests is then utilized to form a conclusion on the practical application of this method and the friction welding process.

### **Keywords**

THK, friction welding, radius rod, axles in heavy duty commercial vehicles, KUKA

---



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČURDA, Jakub. *Rozbor svařování třením v automobilovém průmyslu* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149265>.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Rozbor svařování třením v automobilovém průmyslu vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....  
místo, datum

.....  
Jakub Čurda

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji Ing. Jaroslavu Kubíčkovi, IWE za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vedení bakalářské práce. Za pomoc při vypracování experimentů děkuji také Ing. Kamilu Podanému Ph.D. a Vojtěchu Řiháčkovi. Mé poděkování patří též firmě THK a jejím zaměstnancům, mezi jinými Ing. Vojtěchu Besedovi, Janu Tesařovi, Ing. Pavlu Kubkovi a Zdeňku Neuvirtovi za poskytnutí potřebných materiálů a odborné rady.

---

**OBSAH**

Abstrakt .....	4
Bibliografická citace .....	7
Prohlášení .....	8
Poděkování .....	9
Obsah .....	8
Úvod .....	9
1 Rozbor součástí .....	10
1.1 Stručné představení firmy a její historie .....	11
1.2 Výroba komponent táhla .....	11
1.2.1 Hlava .....	11
1.2.2 Trubka .....	12
1.2.3 Čep .....	12
1.3 Svařování a kompletace táhla .....	13
2 Svařování třením .....	16
2.1 Úvod do problematiky svařování třením .....	16
2.2 Rozdělení dle způsobu přenosu energie na svařované součástky .....	17
2.3 Rozdělení dle typů pohybů svařovaných součástí .....	19
2.4 Mechanismus svařování třením .....	22
2.5 Parametry ovlivňující svarový spoj .....	23
2.6 Svařitelnost kovů a jejich slitin při svařování třením .....	25
2.7 Vlastnosti svarového spoje .....	28
2.8 Srovnání metod třecího a tavného svařování .....	29
3 Experimentální zkouška svarového spoje .....	30
3.1 Parametry materiálů a svařovacího procesu .....	30
3.2 Představení zkušebních metod .....	32
3.2.1 Zkouška tahem .....	32
3.2.2 Zkouška tvrdosti .....	33
3.3 Makroskopické pozorování .....	34
3.4 Zkouška tvrdosti .....	36
3.5 Tahová zkouška .....	38
3.6 Zhodnocení a porovnání výsledků experimentu .....	42
Závěr .....	44
Bibliografie .....	45
Seznam použitých symbolů a zkratk .....	49
Seznam příloh .....	51

## ÚVOD

Spojování komponent je jedním z hlavních problémů strojírenské výroby a strojírenství obecně, v automobilovém průmyslu je však rozebíratelných a nerozebíratelných spojů využíváno v extrémní míře. Ekonomický růst a s ním spojené větší nároky na výrobu a kvalitu spoje, společně se zvětšující se bezpečnostní a ekologickou odpovědností výrobců strojů a zaměstnavatelů, mají za následek neustálý vývoj a pokroky ve spojovacích metodách. V současnosti je věnováno čím dál tím více pozornosti spojování různorodých materiálů, zmenšování výrobních a energetických nákladů a zefektivňování výroby snížením výrobních časů.

V praxi se vedle nýtování, pájení a lepení ve větší míře využívá také mnohých druhů svařování. Nejčastěji se při běžné výrobě můžeme setkat s obloukovým svařováním, a to díky jeho relativní nenáročnosti na obsluhu, provoz a možnosti ovlivnit a ovládat mnoho parametrů tvorby svaru. Ve specifických případech však nemusíme být schopni materiály spojit běžnějšími metodami a musíme tak využít specializovanějších způsobů, jako je například svařování třením vyobrazené na obr. 1.



Obr. 1 Ukázka třecího svařování [9].

Metoda svařování třením se objevila již v druhé polovině 19. století, z této doby také pochází první patent, ten patřil Američanu Bevingtonovi (patent z osmdesátých let). Z let 1930-1940 existují také záznamy o pokusech s metodou zvanou otáčivé sváření. Její praktické využívání však začalo až v padesátých letech minulého století. V našich kruzích byla pro rozvoj třecího svařování významná především činnost A. I. Čudíkova, na kterou poté navázal V. I. Vill, který metodu teoreticky zpracoval a položil tak základ pro její využití v praxi. Začátkem šedesátých let pak došlo k mnoha pokrokům díky výzkumu v USA, Velké Británii a Japonsku. S hromadným používáním svařování třením ve výrobě se však začalo až v sedmdesátých letech. [1; 2; 3]

## 1 ROZBOR SOUČÁSTI

Zkoumanou součástí je táhlo nákladního automobilu svařované třením, skládající se z trubky o průměru 58 mm z oceli EN 10305-1-E 355+N a hlavy s velikostí dutiny pro čep 80 mm z oceli EN 10025 ST52-3N S355J2G3 (1.0570). Součást je dále opatřena pogumovaným čepem, ten však v experimentu není důležitý a jeho přítomnost tak u posuzování svarového spoje zanedbávám. [4]

Táhla slouží u nákladních automobilů k zavěšení a spojení náprav (viditelné na obr. 3), používají se však také u náprav rychlovlaků; jsou tak určena především pro náročné aplikace. Tato táhla se v prostředí firmy THK vytváří dvěma způsoby v několika verzích. Kromě v práci řešeného svařování třením se zde táhla vyrábí lisováním, při kterém je trubka předehřátá na 750 °C tlakem přibližně 11 MPa nalisována na dřík hlavy opatřený vlnovcem. Tato metoda je jednodušší, nevykazuje však zdaleka tak velkou pevnost spoje, přesnost a opakovatelnost jako třecí svarový spoj. Obě tyto metody se používají pro spojování táhel dvou základních typů: rovné vodící táhlo a vodící táhlo do písmene V; ta jsou vyráběna v mnoha rozměrových kombinacích závislých na požadavcích zadavatele zakázky. [4; 5]



Obr. 2 Přímé táhlo připravené na export.

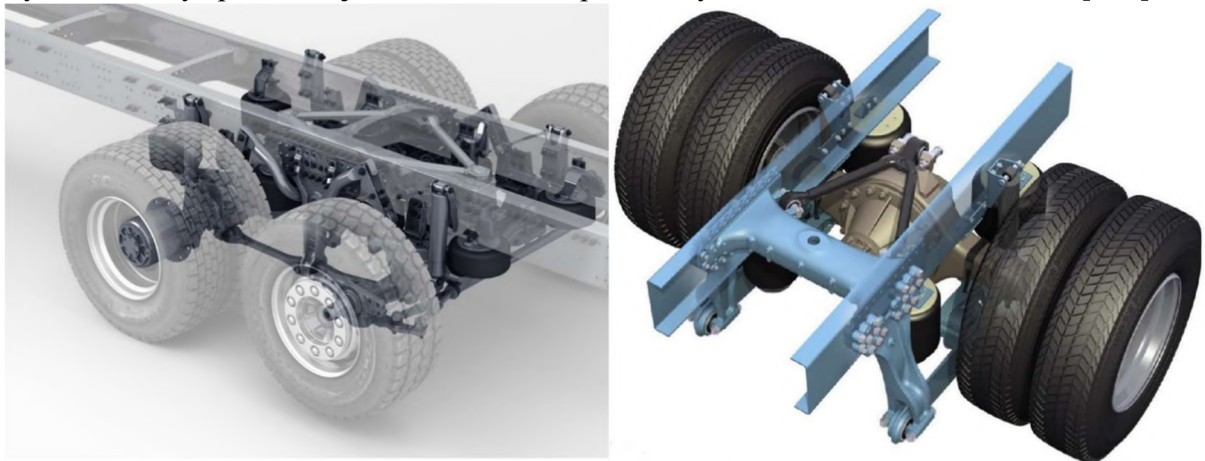
Firma THK ve svých jiných závodech využívá mnoho dalších druhů vyrábění táhel spojováním standardizovaných komponent, každá z těchto metod má své výhody i nevýhody. Mezi nejvíce používané patří:

- svařování třením (obr. 2),
- lisování s předehřátím,
- odlévání již hotových profilů,
- spojení pomocí šroubového spoje.

Uplatňují se také kombinace výše uvedených procesů jako jsou například svařování třením a lisování s předehřevem, svařování třením a šroubový spoj nebo lisování s předehřevem a šroubový spoj. [5]

## 1.1 Stručné představení firmy a její historie

Firma THK RYTHM AUTOMOTIVE CZECH, a.s. vznikla v září roku 2015 z původní firmy TRW-DAS a.s., která byla již na přelomu tisíciletí největším zaměstnavatelem v Dačicích. V tomto trendu pokračuje i THK a se svými přibližně 850 zaměstnanci je druhým největším zaměstnavatelem a největším dodavatelem a vývozcem pro automobilový průmysl v celém okrese Jindřichův Hradec. TRW bylo původně rozděleno do dvou divizí: divize Řízení, která má vlastní vývojové a výzkumné centrum TSCD (kde se také ověřuje životnost a odolnost součástek), nyní zahrnuje tři hlavní výrobní haly vystavené v letech 1965, 2012 a 2016; a divize Ventily, která má svou vlastní výrobní halu, tato divize byla však v únoru roku 2015 pronajmuta americké firmě Federal-Mogul a není tak nyní ve vlastnictví firmy THK. Tyto dvě firmy spolu sdílejí industriální komplex na východní straně města Dačice. [6; 7]



Obr. 3 Umístění přímého a V-táhla na nápravách nákladních automobilů [45; 46].

## 1.2 Výroba komponent táhla

Táhla jsou vyráběna ze standardizovaných komponent, ty jsou mezi sebou z větší části zaměnitelné pro jednoduší personalizaci jednotlivých zakázek dle specifikací zadavatelů. Hlavní součásti táhla je hlava, trubka a čep.

### 1.2.1 Hlava

Polotovarem na tzv. hlavu táhla je výkovek z oceli S355J2G3, který je do závodu dodáván (obr. 4). Hlavní funkcí této komponenty je udržení později montovaného čepu na správném místě v nápravě vozidla.

Polotovar se po převzetí následně upravuje v tomto pořadí:

- osoustružení dosedací plochy čela hlavy,
- vytvoření vnitřního průměru dutiny pro uložení čepu,
- konstrukční zápich pro umístění vnitřního pojistného kroužku,
- sražení hran čela,
- na dalším stroji poté kontura budoucí svařované plochy, díky které se prakticky jedná o svařování trubka k trubce.

V průběhu výroby hlav obsluha stroje neustále kontroluje rozměry dutiny a drážky pro pojistný kroužek a vzdálenost obou čel. Takto obrobene hlavy jsou důkladně očištěny od třísek a chladiva a následně přepraveny do meziskladu, odkud jsou postupně odebírány na svaření s trubkou. Ukázkou hotové hlavy můžeme vidět na obr. 5.





Obr. 4 Výkovek hlavy před obráběním.



Obr. 5 Obrobená hlava připravená na svaření.

Ve firmě THK se podobně obrábí také hlava pro lisovaná táhla, ta se však vyrábí z odlitku z litiny EN-GJS-500-7, a namísto obrobení svarové plochy je na dřívku hlavy odlitý vlnovec pro lepší spojení při zalisování.

### 1.2.2 Trubka

Trubka je největší komponenta celého táhla, ve kterém slouží především jako prvek pevně spojující obě hlavy (v případě V-táhla všechny tři) k sobě. Řezání a další operace se dříve prováděly přímo ve firmě, dnes je však trubka přímo objednáвана jako hotový výrobek, nařezaná na požadovanou délku a se sraženými hranami z oceli EN 10305-1-E 355+N (obr. 6).

### 1.2.3 Čep

Dodávaným polotovarem pro výrobu čepu je taktéž výkovek viditelný na obr. 7, z oceli 41Cr4+QT. Jeho funkcí v táhle je rozložení a přenos axiálního či radiálního zatížení při pohybu nápravy nákladního automobilu či vlaku.

Postup výroby hlavní části čepu je poté následující:

- Vyvrtání děr pro šrouby a sražení hran na upevňovacích částech čepu.
- Navrtání středících důlků pro upnutí při dalších operacích, po této operaci následuje kontrola průměrů otvorů a důlků spolu s jejich roztečí.
- Na dalším stroji pak obrobení kontury koule čepu, následná kontrola průměru a geometrie povrchu koule.

Poté je výrobek očištěn a odeslán na pogumování do zahraničí (čep je zobrazen na obr. 8), přičemž při pogumování dochází k:

- Povrch koule je opatřen materiálem zajišťujícím dobrou přilnavost.
- Takto upravený čep je následně vložen do formy, do které je vstříknuta zahřátá pryžová směs.
- Po vulkanizaci jsou odstraněny přetoky a ořepy.

Tento již pogumovaný čep je následně odeslán zpátky do THK, kde se montuje do hlav táhel (obr. 9).





Obr. 6 Trubka před svařením s hlavou.



Obr. 7 Výkovek čepu před obráběním.



Obr. 8 Obrobený čep před expedicí z továrny.



Obr. 9 Pogumovaný čep připravený na zalisování do hlavy táhla, kovové plochy jsou zde opatřeny protikorozní úpravou povrchu.

### 1.3 Svařování a kompletace táhla

Ještě před začátkem svařování si obsluha stroje vždy připraví bedny se svařovanými komponentami a bednu na svařená táhla (ta je viditelná na obr. 28). Kvůli velké efektivitě procesu nemá totiž operátor mezi výměnami dílu prostoje a musí tak mít detailně připravené pracoviště. Táhla jsou svařována na stroji KUKA RS-30 s parametry: minimální třecí síla 12,7 kN; maximální pěchovací síla 300 kN; maximální otáčky vřetena  $1500 \text{ min}^{-1}$  a upínací síla čelistí 50 kN. [4; 8]

Proces spojování součástí začíná vložením hlavy do upínače ve vřetenu a vložením trubky do upínače na saních, ta je při prvním svaru doražena čelem na rovnou plochu. Obsluha poté zajistí bezpečnost zavřením krytu a stroj zahájí proces svařování. Po jeho ukončení operátor kryt opět otevře a v závislosti na vyráběném typu táhla buď vyjme táhlo s jednou hlavou ze stroje do přepravní bedny pro navaření na hlavu typu V (pro táhla ve tvaru V), nebo zajistí nově navařenou hlavu do druhé části upínače na saních a do vřetenu vloží další hlavu pro svaření (pro rovná táhla, viz obr. 40). Po kompletním svaření je táhlo kontrolováno vizuálně na defekty při tvorbě výrobku, a úchylkoměrem na sousost dutin obou hlav a celkovou délku.

Tato detailnější kontrola se však kvůli velmi nízké zmetkovitosti provádí přibližně jednou za hodinu. Hodnoty základních veličin svařovacího procesu jsou uvedeny v tab. 1 [4]:

Tab. 1 Parametry svařovacího procesu pro trubku  $\phi 58$  mm.

	Otáčky [rpm]	Zkrácení ve fázi tření [mm]	Celkové zkrácení [mm]	Koncová poloha [mm]	Třecí tlak [MPa]
Mezní maximální hodnota	1600	6,50	10,50	12,00	30
Mezní minimální hodnota	1400	5,50	8,5	8,00	23
Skutečná hodnota	1489 až 1504	6,00	9,50	10,00	26

	Brzdný tlak [MPa]	Pěchovací tlak [MPa]	Dokončovací tlak [MPa]	Celková doba tření [s]	Doba brždění [s]
Mezní maximální hodnota	28	80	80	10,00	0,5
Mezní minimální hodnota	18	70	70	3,00	0,2
Skutečná hodnota	20	75	75	8,00	0,4

Horní mezní hodnota otáček je zde uvedena čistě za účelem vyplnění parametrů v tabulce pro svařování na stroji, jeho maximální otáčky jsou totiž  $1500 \text{ min}^{-1}$  a nemůže tak překonat hranici  $1600 \text{ min}^{-1}$ . Zhotovený výrobek je vyobrazen na obr. 28. Tabulka je převzata přímo ze svařovacího programu stroje pro spojování trubek  $\phi 58$  mm a hlav  $\phi 80$  mm.

Po svaření táhlo pokračuje na zalisování čepu, to je prováděno na lisu MAE S40S s maximálním tlakem 40 t, z nich se při lisování čepu do v práci řešeného táhla využije cca 300 kN. Hlava o průměru 80 mm je totiž jednou z největších možností nabízených firmou THK, při výrobě táhel z hlav menších průměrů se běžně využívá lisovací tlak okolo 200 kN.

Táhlo je na začátku procesu vloženo do speciálně upraveného lisovacího přípravku a do jeho dutiny je vložen pogumovaný čep. Na ten je následně umístěn kuželový přípravek viditelný na obr. 12, který umožňuje snadnější a konzistentnější instalaci pojistného kroužku, ten je na něj následovně nasazen společně s distančním kroužkem a takto připravený čep je poté zalisován až do dostatečného stlačení. To je signalizováno zaskočením pojistného kroužku do předem obrobené drážky, během lisování se také vyrazí datum výroby do čela hlavy, výsledný výrobek lze vidět na obr. 11.

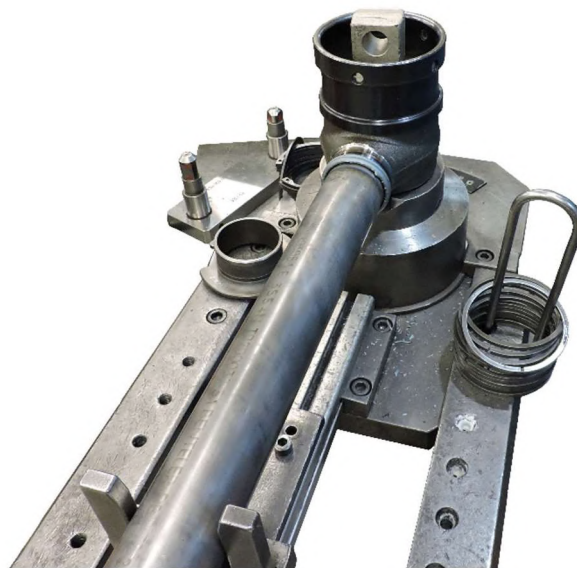
Táhlo opatřené čepem je následně expedováno na povrchovou úpravu lakováním dle specifikací zadavatele zakázky. Tento proces se do roku 2018 prováděl v prostorách továrny, dnes jsou však táhla lakována v zahraniční sesterské firmě. Během celého procesu výroby není z táhla odstraňován výronek vzniklý při svařování, jeho přítomnost totiž zadavatelům nevádí a také nijak negativně neovlivňuje provoz a životnost táhla v nápravě. Hotové táhlo je vyobrazeno na obr. 10. [5]



Obr. 10 Táhlo po povrchové úpravě.



Obr. 11 Táhlo s nalisovaným čepem.



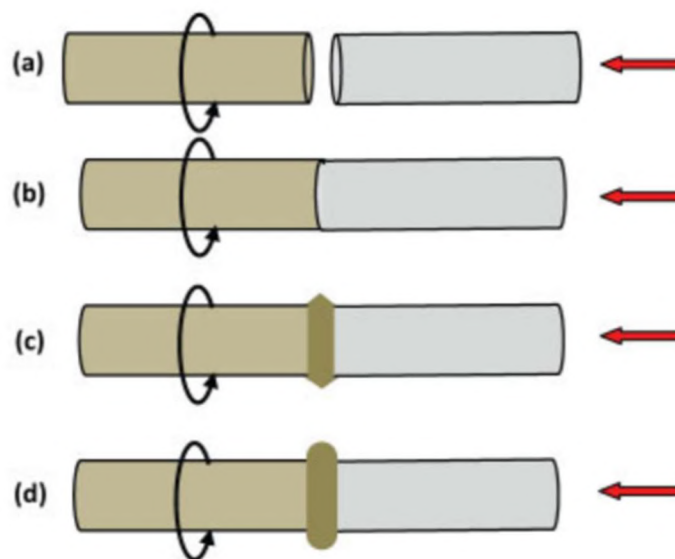
Obr. 12 Proces zalisování čepu.

## 2 SVAŘOVÁNÍ TŘENÍM

Svařování třením spojuje zplastizované, ne však roztavené, materiály za pomoci působení tlaku a tepla generovaného mechanickým třením. Zahřáté materiály ve viskózním stavu jsou mechanicky donuceny se promíchat a vytvořit tak spoj. [9]

### 2.1 Úvod do problematiky svařování třením

Svařování třením lze obvykle rozdělit do čtyř hlavních fází tvorby svaru. Ještě před vložením polotovaru do stroje je nutné důkladně očistit stykové plochy, důvody této akce jsou uvedeny v kapitole 2.6. V první fázi je jeden z polotovarů roztáčen, zatímco druhý zůstává pevně usazen (obr. 13a). Tato fáze přechází plynule v další, při které se po dosažení dostatečných otáček jeden polotovar přiblíží k druhému, přičemž míra přiblížení závisí na parametrech krystalové mřížky materiálů a požadované deformaci, a je na něj aplikována axiální síla. V této části procesu tak dochází k vytvoření kontaktu, vzájemnému zarovnání nerovností a dodatečnému očištění povrchů (obr. 13b). Toto zapříčiní vznik tření při třetí, takzvané třecí fázi, kde teplota vlivem tření vzroste na 80–85 % teploty tání svařovaného materiálu (obr. 13c). Následné zastavení rotace a vtlačení obou součástek do sebe ve čtvrté fázi má za následek vzájemné spojení obou polotovarů, tato fáze se také nazývá kovací (obr. 13d). V této fázi dochází k tvorbě chemických vazeb a k následné relaxaci obou materiálů. Uvedená stádía lze pozorovat jak při svařování stejných, tak i odlišných materiálů, při svařování odlišných materiálů se jejich vlastnosti však přestanou překrývat. [1; 3; 2; 10]



Obr. 13 Fáze procesu svařování třením [10].

Svar vytvořený při svařování třením je charakteristický velmi malou tepelně ovlivněnou zónou (anglicky: Heat affected zone/HAZ), přítomností plasticky ovlivněného materiálu a naprostou absencí roztaveného materiálu a jiných zón s většími následky změny skupenství. Při tření se tvoří teplo, které postupně změkčí oba dílce až do bodu, kdy zplastizují. Po přitlačení pak dojde k vytažení materiálu z oblasti styku až na okraje spoje. Tak se docílí toho, že v oblasti spoje zůstane pouze čistý materiál. Největší výhodou svařování třením je možnost svařovat bez roztavení materiálu, svar se totiž tvoří v tuhém stavu. [1; 10]

Při svařování třením se často využívá pomocný support, na kterém se odstraňují výronky vzniklé během spojování. Pro táhlo řešené v této práci se supportu však nevyužívá, jednalo by se jen o další zbytečnou operaci při výrobním procesu, toto je následně potvrzeno v experimentální části. [5; 3]



## 2.2 Rozdělení dle způsobu přenosu energie na svařované součástky

Podle konstrukce svařovacího stroje a způsobu přenosu energie na svařované součásti lze svařování třením rozdělit do dvou podkategorií:

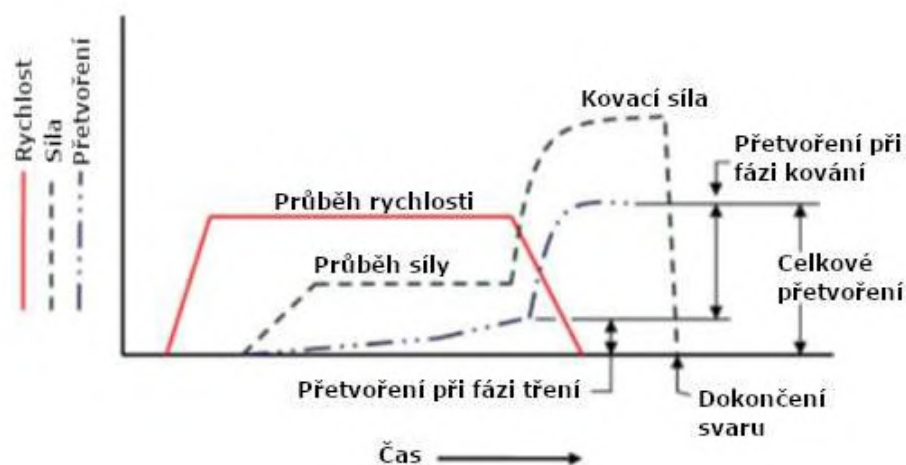
- Přímé pohánění, někdy také nazývané klasické (anglicky: direct drive welding), spočívá v přenosu kroutícího momentu z motoru přímo do svařované součástky, a je nejrozšířenějším způsobem v automobilovém průmyslu. Tohoto způsobu je často využíváno ke svařování konvenčních ocelí a ve výjimečných případech i ke svařování náročných spojů, například u kovů rozdílných vlastností nebo specializovaných legovaných slitin. [1; 11; 3]

Základní požadavky při svařování pomocí přímého pohonu definoval M. Turňa takto:

- Dosažení dostatečného množství otáček.
- Vyvození dostatečné přitlačné síly při fázi tření.
- Vyvození dostatečné tvářecí síly při fázi kování.
- Správný čas strávený tvořením tepla při třecí fázi.
- Správný čas strávený disipací tepla ve fázi kování. [3]

Ještě před začátkem svařovacího procesu je jedna ze součástek připojena na motorem hnané rotující vřeteno, nejčastěji pomocí kleštinového či klínového upínání, druhá součástka je následně pevně spojena se zbytkem stroje tak, aby jí bylo zamezeno v axiálním pohybu a rotaci, obvykle pomocí klínového svěrákového upínání. Při klasickém svařování je pohyblivá součástka nejprve roztočena na předem určený počet otáček, poté je přitlačena na stacionární součást, kdy je na ni aplikována dostatečná síla pro vytvoření tření, které vzniká jako následek otírání povrchů obou součástek, toto tření následně vytváří teplo. Jako příklad hodnot byla u klasického svařování třením naměřena maximální teplota 1 295 °C na okraji svařovaných dílců v čase 20 s, maximální teplotní spád byl 593 °C po 6 s od začátku svařování. Tento stav trvá po předem určenou dobu, dokud nedojde k dostatečnému zplastizování v okolí svaru a postačujícímu promísení materiálů obou spojovaných součástí, teplo se zde kvůli konstantní rychlosti otáček vytváří rovnoměrněji. Součástky jsou poté odpojeny od motoru a buďto samovolně, nebo za pomoci brzdy jsou uvedeny do klidu. [1; 3]

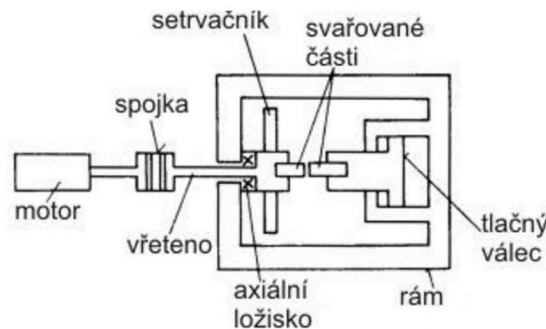
Relativní rotační pohyb zajišťují nejčastěji elektromotory či hydromotory, o vyvození dostatečné axiální síly se obvykle starají hydraulické či pneumatické systémy. Upínací systémy musejí být dimenzovány velmi pevné, musejí totiž vydržet přenášení třecího momentu během špiček na začátku a konci svařovacího procesu. [3]



Obr. 14 Průběh rychlosti součásti, tvářecí síly a deformace při svařování přímým pohonem [10].

Jak lze vidět na obr. 14, hodnota rychlosti je během třecí fáze konstantní, stejně jako ustálená třecí síla, během této fáze také začíná docházet k deformaci obou součástí. Při kovací fázi rychlost postupně lineárně klesá až na nulovou hodnotu, kovací síla však nápadně vzroste a udržuje se na této zvýšené hodnotě i po ukončení pohybu, vytváří se zde také většina přetvoření.

- Další způsobem pohánění je setrvačnickové svařování (anglicky: inertia drive welding), jedná se o nejčastěji využívanou metodu svařování osově souměrných součástí v leteckém průmyslu. Při této metodě je jedna ze součástí uchycena tak, aby jí bylo zamezeno v rotaci, druhá je připojena na setrvačnick, který je roztočen na potřebné otáčky a funguje tak prakticky jako baterie na uskladnění mechanické energie. Motor je poté od setrvačnicku odpojen (viz spojka v obr. 15) a obě součástky jsou k sobě přitlačeny silou požadovanou pro vytvoření spoje. Kinetická energie setrvačnicku je poté přeměněna na teplo vzniklé ze tření a setrvačnick tak zpomaluje, tvorba tepla zde však není tak konstantní, jako při přímém pohonu motorem. Před jeho úplným zastavením bývá často dočasně zvýšena přitlačná síla, ta je poté aplikována ještě nějakou dobu po ukončení rotace svařovaných dílů. V porovnání s přímým poháněním jsou u setrvačnickového svařování svařovací časy asi desetkrát kratší a tepelně ovlivněná zóna je menší s větším teplotním gradientem. [1; 3]



Obr. 15 Schéma stroje pro svařování pomocí setrvačnicku [3].

Metoda pohonu pomocí setrvačnicku se nejvíce rozvíjela v USA a od klasické metody pohánění se liší především rychlostí přeměny energie na teplo, potřebnou prací a rozdílem ve vývoji tepelného pole. Pro porovnání M. Turňa uvádí teplotu 1 460 °C na okraji součásti v čase 0,06 s a teplotou ve středu pouze 189 °C. Ke konci svařovacího procesu se tyto teploty téměř vyrovnají. [3]



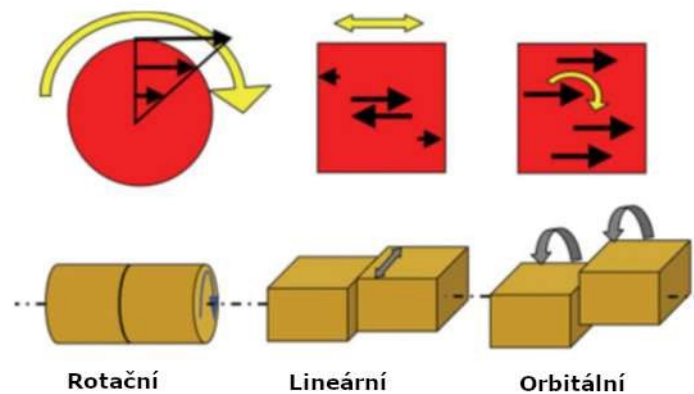
Obr. 16 Průběh rychlosti součásti, tvářecí síly a deformace při svařování pomocí setrvačnicku [10].

Mezi hlavními rozdíly při použití přímého pohonu a pohonu pomocí dočasněho uskladnění energie v setrvačnicku patří: Čas, při svařování s využitím setrvačnicku je čas svařování až desetkrát kratší než při klasickém. Průběh rychlosti, u klasického svařování je rotační rychlost konstantní, zatímco u setrvačnickového svařování rychlost nelineárně klesá. Tvářecí síla, u setrvačnickového svařování je síla aplikována skokově na začátku třecí a kovací fáze, u přímého pohonu je však aplikována postupně, a to na začátku třecí fáze téměř lineárně a na začátku fáze kování téměř exponenciálně. Grafické znázornění průběhu parametrů svařovacího procesu je vyobrazeno na obr. 16. [1; 10; 3]

### 2.3 Rozdělení dle typů pohybů svařovaných součástí

Nejstarším způsobem svařování třením je rotační svařování třením (anglicky: rotary friction welding). Tato metoda se úspěšně používá již od čtyřicátých let 20. století a dnes zahrnuje naprostou většinu svařování třením v běžné výrobě. Při rotačním svařování zůstává jeden komponent nehybný, zatímco druhý se roztáčí okolo své osy a je ke stacionární součásti postupně přibližován, svar pak vzniká po kontaktu obou komponent za dostatečného tlaku. Při rotačním svařování se však vyskytuje několik nevýhod. Touto metodou není možné svařovat díly nekruhového průřezu. Rychlost není po celém průřezu konstantní, ale lineárně stoupá. To ovlivňuje tvorbu tepla, které také není konstantní na celém průřezu, a to má za následek nerovnoměrnou tloušťku tepelně ovlivněné zóny. Tyto dvě nevýhody je možno při jiných metodách třecího svařování potlačit. [1; 2]

Vzhledem k rozdílům v přenosu energie a celkově větší energetické náročnosti se v leteckém průmyslu pro rotační svařování nejčastěji používá pohon pomocí setrvačnicku, který lépe splňuje podmínky nutné pro kvalitní spoj. V automobilovém průmyslu se vzhledem k nižší energetické náročnosti nejčastěji využívá přímý pohon, a to kvůli úspoře a menším ztrátám při pohonu stroje. [12]

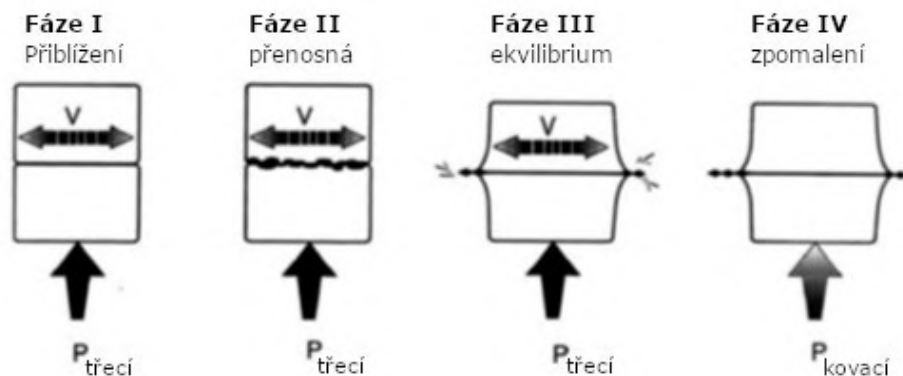


Obr. 17 Porovnání rychlostního gradientu pro rotační, lineární a orbitální svařování [10].

Od osmdesátých let se také používá lineární svařování třením, někdy také nazýváno svařování s kmitavým pohybem (anglicky: linear friction welding). Při tomto způsobu svařování se obě součástky pohybují relativně vůči sobě pod tlakem, nebo je jedna součást pevně uchycena a druhá se pohybuje relativně vůči ní také za působení tlaku. Při lineárním svařování se základní stádia tvorby svaru drobně liší od ostatních metod (obr. 18). Na začátku je prvotní fáze, během které dochází k přiblížení součástek. Následuje přenosná fáze, během ní dochází k vzájemnému orovnění spojovaných povrchů, zde se také začíná vytvářet třecí teplo. Třetí fáze je tzv. ekvilibrium, kde stále dochází k relativnímu pohybu, nerovnosti povrchů jsou zde však již vyrovnány, a tak dochází k vzájemnému promísení materiálů obou součástí a tvorbě výronku. V konečné fázi dochází ke zpomalení a následnému zamezení veškerého pohybu, tento děj však bývá velmi rychlý, Wena Li uvádí že trvá přibližně 0,1 s,

součástky jsou tak v klidu za působení pouze tlaku donuceny se spojit. Hodnoty pro nastavení správných parametrů během svařování byly experimentálně odvozeny pro slitinu Ti-6Al-4V a v praxi se předpokládá, že se jimi řídí všechny kovy podobných vlastností a jejich slitiny. [12; 13; 1]

Lineárně je také možno svařovat nekruhové průřezy, přičemž tvorba tepla je zde téměř rovnoměrná. To je způsobeno konstantní rychlostí v celém průřezu spojovaných součástek, viz obr. 17. Energetickou a technologickou náročností se lineární svařování téměř neliší od rotačního, potřebný krouticí moment a přítlačná síla bývají také téměř totožné [12].



Obr. 18 Grafické znázornění fází při lineárním svařování [13].

Kombinací lineárního a rotačního svařování vzniká orbitální svařování třením (anglicky: orbital friction welding). Tato metoda se obzvláště hodí pro spojování nekruhových průřezů. Během tohoto svařování se osa jednoho komponentu pohybuje relativně k druhému po kružnici, toto je však jediný pohyb, protože ani jeden ze svařovaných dílů nerotuje kolem své vlastní osy. To má za následek konstantní tečnou rychlost po celém průřezu obou součástek, a proto jsou svary vytvořené touto metodou velice kvalitní. Samotný svar se tvoří po ukončení pohybu obou součástí, předtím jsou však komponenty rychle osově zarovnané. Tento typ třecího svařování je možné použít pro mnoho typů průřezů a kvůli konstantní tečné rychlosti po celém průřezu je zde tvorba tepla nejrovnoměrnější, stejně tak tloušťka tepelně ovlivněné zóny. Vzájemné porovnání rychlostí pro doposud zmíněné metody svařování třením je znázorněno na obr. 17. [1; 10]

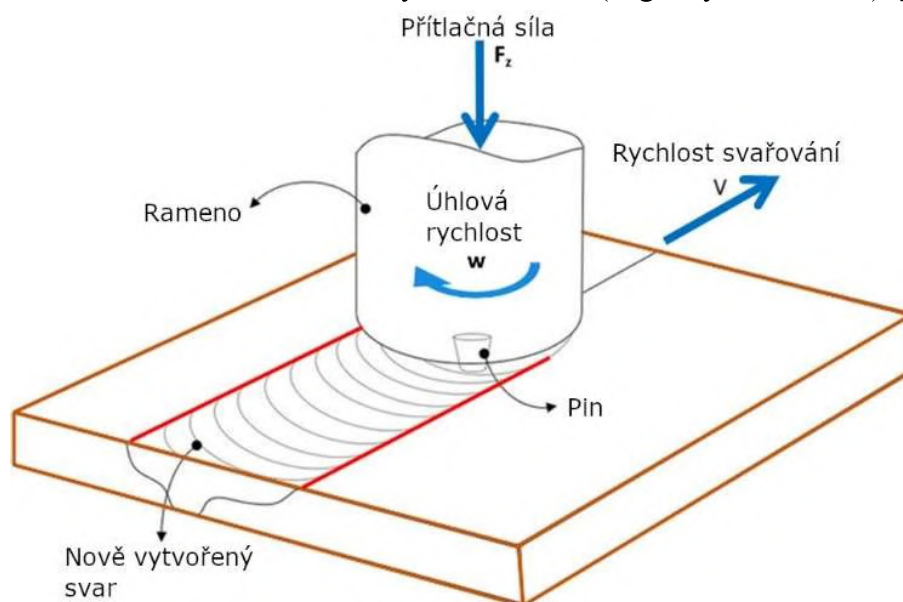
Nejnovější a nevíce specializovanou metodou svařování třením je třecí svařování s promíšením (anglicky: friction stir welding). Metoda byla patentována roku 1991 a největšího uplatnění se jí dostalo při svařování hliníku, a to nejčastěji na dílech, jejichž rozměry nedovolují po svaření provést žádné tepelné zpracování. Tato metoda se také používá pro svary, jejichž mechanické vlastnosti musejí být stejné nebo převyšovat vlastnosti materiálů použitých komponent. Největší rozdíl mezi svařováním s promíšením a jinými více tradičními metodami svařování třením spočívá v použití specializovaného nástroje. Zatímco například rotační svařování využívá vzájemný pohyb součástek pro tvoření tepla potřebného k zplastizování svařovaných materiálů, při svařování s promíšením se používá specializovaný, na rozdíl od elektrody při tavném svařování, znovu použitelný nástroj, viz obr. 19. Nástroj rotuje a zároveň je posouván na rozhraní svařovaných součástek, kombinace těchto pohybů vytváří prstenec zplastizovaného materiálu okolo centrálního kolíku nástroje, kterým je materiál následně přesouván od začátku nově tvořeného svaru ke konci aktivní zóny nástroje, tím vzniká spojený svar. Svařování třením s promíšením našlo nejvíce uplatnění v leteckém a lodním průmyslu, kde slouží například ke svařování palivových nádrží pro Boeing nebo nosných konstrukcí pro rakety série Delta. Současně s praktickým využitím při svařování hliníku se tato metoda rozvíjí pro svařování jiných materiálů, jako je např. měď, titan a ocel.



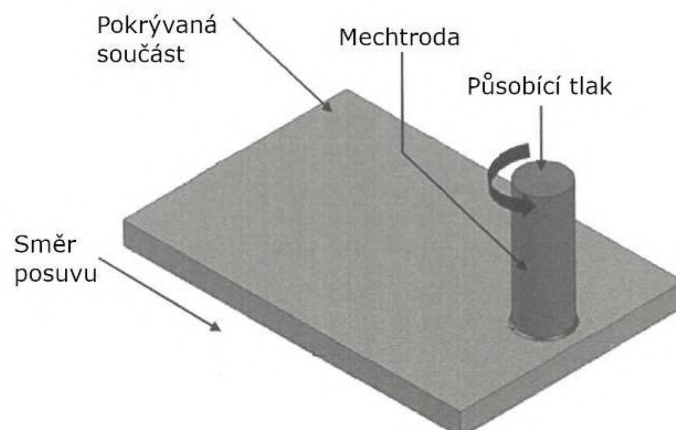
Pro oceli již bylo možné dosáhnout náležitých svarů až pro 25 mm tlusté součásti, stejně tak i kvalitních spojů pro materiály s rozdílnými vlastnostmi. [1; 10]

Vibrační svařování je dalším příkladem svařování třením, který se používá ke spojování rovných či jemně zakřivených povrchů. Během tohoto procesu jsou spojované materiály umístěny blízko k sobě a je na ně aplikován velký tlak. Poté na ně začne působit externí vibrační síla, která nutí povrchy obou součástí třít se o sebe a vytvářet tak tření a teplo na jejich rozhraní. Vytvořené teplo pak následně zplastizuje materiál v oblasti svaru a začne tak docházet k jejich vzájemnému míšení. Po následném zchlazení pod tlakem vzniká silný a odolný svarový spoj. Vibrační svařování lze rozdělit do dvou podkategorií: lineární vibrační svařování a orbitální vibrační svařování. Na rozdíl od klasických aplikací těchto dvou metod je při vibračním svařování hlavní pohyb oscilační, ostatní parametry jsou však téměř totožné. [14; 15]

Třecí navařování je proces využívající mnoha vlastností třecího svařování, při kterém se na součástku nanáší požadovaný povrchový materiál (obr. 20), a dochází tak ke zvýšení odolnosti vůči otěru, korozi, či zlepšení mnoha jiných vlastností v závislosti na nanášeném materiálu. Navařování je dosaženo rotací náterového materiálu pod tlakem na povrchu substrátu, ten se postupně posouvá proti rotujícímu dílu, zplastizovaný rotovaný materiál se poté usazuje na povrchu substrátu a vytváří tak jasně viditelnou trajektorii. Nanášený materiál je při tomto procesu spotřebováván a jeho délka se tak postupně zmenšuje, odborně se blok nanášeného materiálu nazývá mechtroda (anglicky: mechtrode). [14; 16]



Obr. 19 Grafické znázornění procesu svařování třením s promísením [43].



Obr. 20 Proces třecího navařování [14].

## 2.4 Mechanismus svařování třením

Zatímco specifické detaily procesu vzájemného spojení svařovaných součástek jsou nejisté, samotná tvorba svarového spoje je charakterizována dvěma hlavními fázemi, které byly již okrajově popsány při rozdělení metod. Jedná se o fázi tření a fázi kování. Teplo potřebné pro zplastizování materiálů je tvořeno při třecí fázi, konečné spojení komponent a ochlazení svaru nastává při kovací fázi. Množství vytvořeného tepla při svařovacím procesu jsme schopni vyjádřit následující rovnicí:

$$Q = \Delta T \cdot S' \cdot \delta \cdot c \cdot \rho \quad [J] \quad (2.1)$$

kde  $\Delta T$  je rozdíl teplot v místě rozhraní svařovaných materiálů [T],

$S'$  je plocha průřezu v místě svaru [m<sup>2</sup>],

$c$  je specifické teplo [kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>],

$\rho$  je hustota [kg · m<sup>-3</sup>],

$\delta$  je délka stlačení svařovaných dílů [m]. [1]

Fázi tření je pro identické součástky možno rozdělit na jednotlivé kroky. Když v důsledku přibližování poprvé dojde ke kontaktu jednotlivých materiálů, začne mezi jednotlivými povrchy vznikat tření, materiály se také začnou adhezně spojovat na místech, kde na sebe doléhají. Při zvyšování tlaku začnou adhezní síly převažovat nad soudržností svařovaných kovů, a začne tak docházet ke smýkání materiálu, který je následně přenášen z jednoho povrchu na druhý. Při dalším zvyšování tření dochází k značnému nárůstu teploty v místě styku a potřebného kroutícího momentu, během tohoto děje fragmenty přenášeného materiálu nabývají na velikosti, dokud z nich nevznikne jedna spojitá vrstva zplastizovaného materiálu. Po kompletním zplastizování v místě spoje se kroutící moment snížá a ustálí na rozumné hodnotě, během toho jsou součástky stále přibližovány k sobě. [1; 17]

Fáze kování začíná aplikací tvářecí síly na svařovaný materiál, to má za následek další axiální přiblížení. Toto zkrácení zapříčiní vznik klasického výronku v místě spoje obou součástí. Graficky je tento výronek znázorněn na obr. 13 a obr. 1. Následně dochází k postupnému snižování rychlosti a dále také k druhému špičkovému nárůstu kroutícího momentu, a to po vytvoření svaru a jeho dostatečnému ochlazení z maximální teploty. S dalším poklesem v rychlosti klesá i kroutící moment až na nulovou hodnotu. [1; 17; 3]

Mechanismus svařování rozdílných kovů je poněkud složitější. Je ovlivňován řadou faktorů, mezi které patří fyzikální a mechanické vlastnosti spojovaných materiálů, povrchová energie, krystalové mřížky, vzájemná rozpustnost kovů a jejich intermetalických složek. Je také možné, že zde dojde ke vzniku slitin na rozhraní obou kovů v důsledku mechanického promíšení a teplotní difúze. Všechny tyto nejistoty způsobují, že odhadování výsledků svařování rozlišných kovů je velmi obtížné, a proto by se možnost spojení dvou materiálů v tomto případě vždy měla nejdříve experimentálně ověřit sérií testů. Spojování dvou rozdílných kovů je zde však stále jednodušší než při tavném svařování, protože koeficienty teplotní roztažnosti a tepelná vodivost zde nehrají takovou roli, názorná ukázka spojení několika kovů je na obr. 29. [1; 17; 18]

Pro vývoj tepla v procesu platí následující vztahy [19]:

- Třecí moment:

$$M = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot p \cdot \frac{k}{n^2} \cdot R \quad [N \cdot mm] \quad (2.2)$$

- Tepelný výkon:

$$P' = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot p \cdot \frac{k}{n} \cdot R \cdot 10^{-6} \quad [kW] \quad (2.3)$$

- Měrný tepelný výkon:

$$P_m = \frac{2}{3} \cdot p \cdot \frac{k}{n \cdot R} \cdot 10^{-6} \text{ [kW} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (2.4)$$

kde  $p$  je svařovací tlak v MPa,

$n$  je rychlost otáčení [ $\text{min}^{-1}$ ],

$R$  je poloměr součásti v mm,

$k$  je konstanta, pro nízkouhlikovou ocel  $k = 1,6 \cdot 10^7 \text{ [mm}^2 \cdot \text{min}^{-2}]$ .

## 2.5 Parametry ovlivňující svarový spoj

Proces tvorby a celkovou kvalitu svarového spoje vytvořeného třením může ovlivnit velké množství parametrů a jejich vzájemných kombinací. Protože se kov při tomto typu sváření netaví, zachovává si tak své původní vlastnosti a tepelně ovlivněná zóna je výrazně menší než při konvenčních způsobech svařování. Nejdůležitější z těchto parametrů jsou [1]:

- Vzájemná rychlost jednotlivých bodů dotyku, ta je při rotačním svařování vždy vztažena na průměr spojovaných součástí v místě spoje a její změny mohou mít různé efekty na mechanické vlastnosti svaru. Její nárůst může vést k větší tvorbě třecího tepla na rozhraní spoje, to by mělo za následek přebytké měknutí materiálu a větší rozsah rekrystalizace. Dále také, s ohledem na rozsah spojovaných materiálů, či přesněji jejich fyzikálních a mechanických vlastností, má změna úhlové rychlosti vliv na kvalitu výsledného svarového spoje, je proto důležité použít správný rozsah rychlostí pro dosažení optimálního spojení komponent. Ten se pro nízkouhlikovou ocel pohybuje v rozmezí  $0,6 - 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; pro materiály s nízkou tepelnou vodivostí  $0,5 - 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a pro materiály s vysokou tepelnou vodivostí přibližně  $7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Rychlost relativního pohybu tak závisí na druhu svařovaného materiálu, obecně pro ně lze uvést tyto hodnoty:

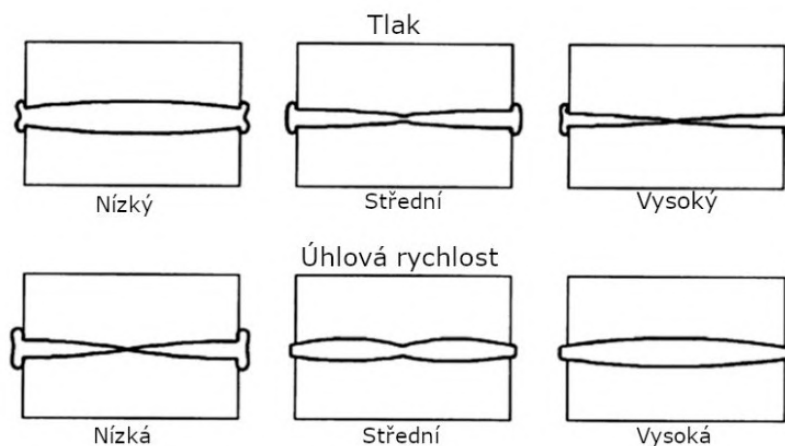
$$n \cdot D = < 1,2; 3 > \cdot 10^4 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \text{ pro ocel} \quad (2.5)$$

$$n \cdot D = < 4; 4,5 > \cdot 10^4 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \text{ pro měď} \quad (2.6)$$

$$n \cdot D = < 8; 10 > \cdot 10^4 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \text{ pro titan} \quad (2.7)$$

kde  $n$  jsou otáčky svařované součásti [ $\text{s}^{-1}$ ],

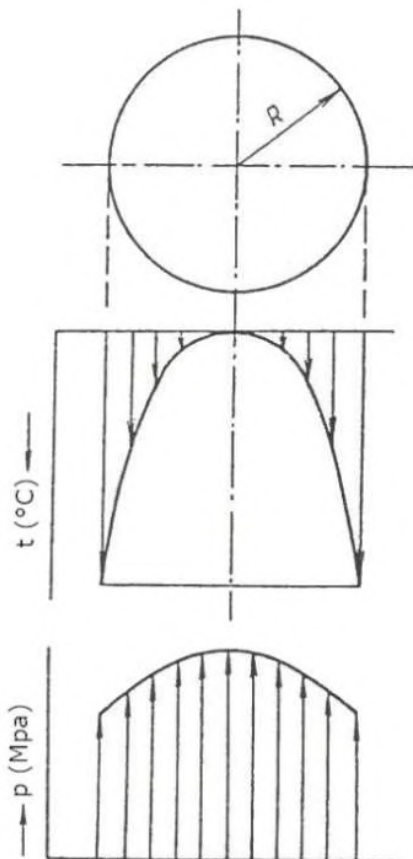
$D$  je průměr ve svařovaném průřezu [m]. [1; 20; 21]



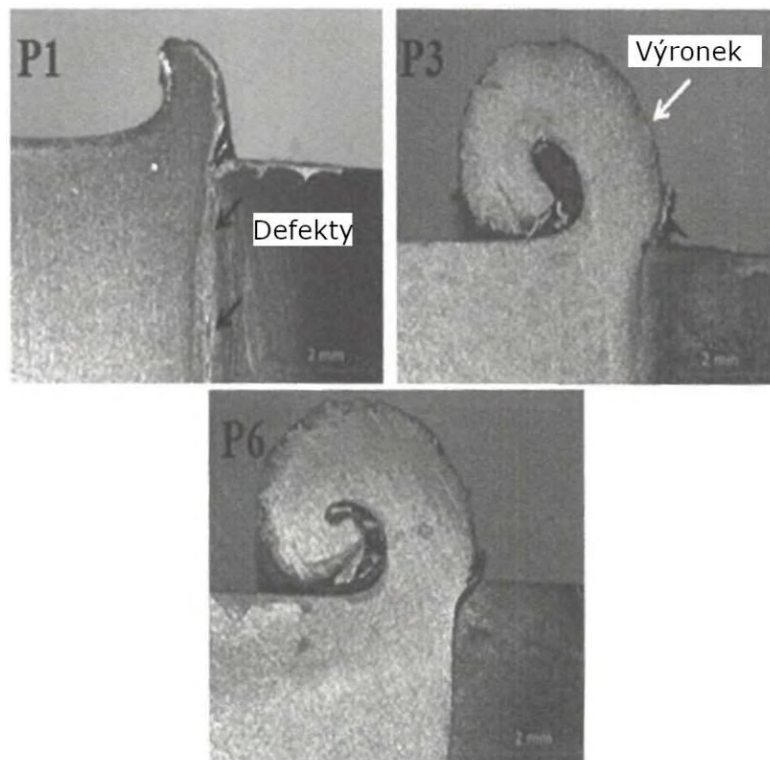
Obr. 21 Tvar svarového spoje v závislosti na změně tlaku a úhlové rychlosti [19].

- Rozsah tlaků pro dosažení dostatečné generace tepla a dostatečného přitlačení při kování je také velmi široký, obvykle se jeho hodnoty pohybují pro třecí tlak v rozmezí  $10 - 80 \text{ MPa}$  a pro kovací tlak  $20 - 150 \text{ MPa}$ , je zde však velmi důležité, aby byl vyvinutý tlak opakovatelný pro jakoukoliv specifickou operaci.

Je také důležité dodržovat optimální poměr mezi tlakem třecím a kovacím, ten se pohybuje okolo hodnoty 2, může však být až 3,5. Změnou tlaku jsme schopni ovládat teplotní gradient v oblasti svaru, kroutící moment, který musí pohonná jednotka svařecího stroje vytvořit, a axiální přetvoření svařovaných součástí. Pro ideální hodnotu tlaku je jeho průběh na průřezu svaru společně s průběhem teploty znázorněn na obr. 22. Změnou tlaku jsme tak schopni regulovat tepelnou ztrátu při svařování větších součástí, jako například trubka k plechu. Specifické hodnoty tlaku jsou vždy závislé na tvaru a materiálu spojovaných dílů. Tlak musí však být dostatečně velký na to, aby povrchy obou materiálů byly dostatečně přitlačeny k sobě a bylo tak zamezeno jejich oxidaci v důsledku atmosférických plynů. Malá hodnota tlaku při dané úhlové rychlosti může mít za následek nedostatečné zahřívání a následné minimální či neexistující spojení, naopak bude-li tlak příliš veliký, může docházet k nadbytečné generaci tepla spojené s nežádoucím příliš velkým axiálním zkrácením. U měkkých ocelí je míra axiálního zkrácení přibližně úměrná působícímu tlaku, lze také dokázat, že pro danou hodnotu tlaku je toto zkrácení větší při nižší úhlové rychlosti. Pro zkvalitnění svarového spoje u velkého množství kovů, včetně ocelí, je na konci třecí fáze aplikována větší kovací síla. [1; 3; 20]



Obr. 22 Rozložení teploty a tlaku ve svařovaném průřezu [19].



Obr. 23 Tvorba výronku ovlivněná změnou tlaku,  $p_1 = 130$  MPa,  $p_3 = 150$  MPa,  $p_6 = 180$  MPa [14].

- Doba jednotlivých dějů během procesu svařování je předem určena na základě měření či předchozích zkušeností. Přílišný čas zahřívání omezuje produktivitu a také plýtvá materiálem, na druhou stranu nedostatečné setrvání ve fázi zahřívání může mít za následek nerovnoměrné zahřátí, neschopnost eliminovat oxidy uvězněné ve spoji, nebo celkové nedosažení svarového spoje. Nerovnoměrné zahřívání je typické pro plně kruhové průřezy svařované rotačním svařováním třením. Ačkoliv na povrchu obou součástí může být rychlost dostatečná a doba setrvání v třecí fázi s generací tepla by tak mohla být poněkud malá, ve středu kruhového průřezu je rychlost blízká nule,

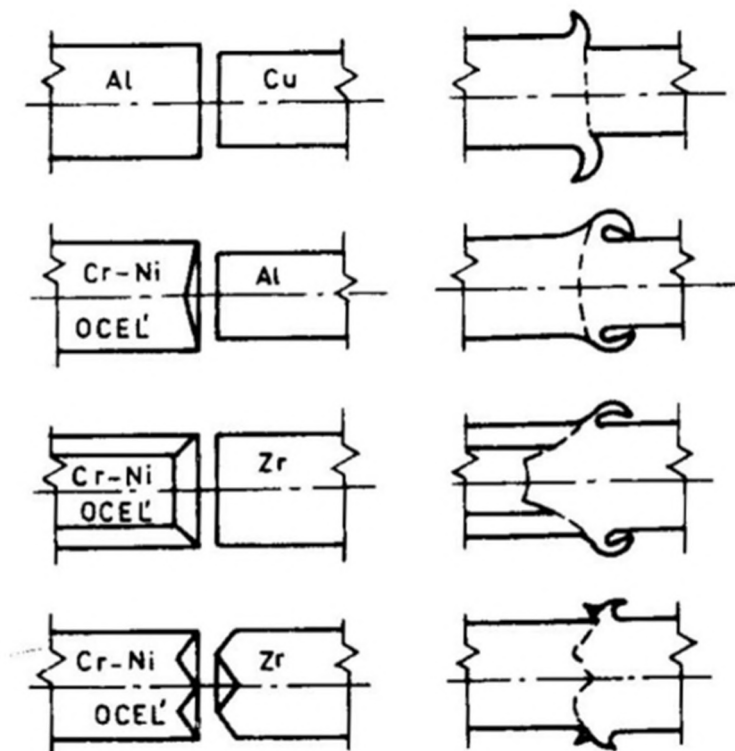


a je tak nutno setrvat ve fázi zahřívání díle, aby teplotní difuze zajistila dostatečné zahřátí celého průřezu materiálu v oblasti svaru. [1]

Kombinací různých hodnot těchto tří hlavních parametrů jsme schopni ovlivňovat výsledný tvar a tloušťku svarového spoje, společně s mnoha jeho vlastnostmi. Rozdílné působení tlaku a úhlové rychlosti v závislosti na tvaru svaru je znázorněno na obr. 21 a tvar výronku v závislosti na velikosti působícího tlaku při konstantních parametrech na obr. 23.

## 2.6 Svařitelnost kovů a jejich slitin při svařování třením

Svařitelnost dvou rozdílných kovů je závislá především na jejich chemickém složení, stavu svařovaných ploch, tvaru a velikosti průřezu obou součástí v místě svarového spoje. Stav povrchu spojovaných ploch může mít vliv na hodnoty parametrů během sváření, samotný průběh procesu však ovlivní pouze minimálně. Největší dopad špatné úpravy povrchu před svařením se projeví až na mechanických vlastnostech vyhotoveného svaru. Svařované plochy nesmí být pokryty okujemi, ty totiž při svařování třením slouží jako překážka pro vytvoření svarového spoje. Povrchy vývalků, výkovek a jiných součástí po tepelném zpracování je tak třeba řádně očistit. Počáteční stav spojovaných ploch, jejich znečištění mastnotami a schopnost tvořit na povrchu oxidy, může mít negativní vliv na průběh ohřevu a generaci třecího tepla. Přípravu kontaktních ploch je možné provádět mnoha způsoby, jako je například odpíchnutí, odstříhnutí, nebo uříznutí pilou, nedoporučuje se však řezání kyslíkem. [3]



Obr. 24 Úprava komponent a výsledný tvar svarového spoje při svařování kovů s rozdílnými vlastnostmi [42].



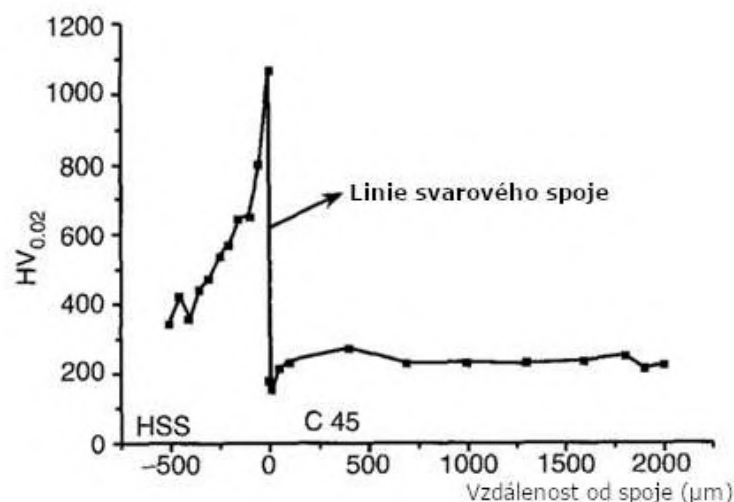
Obr. 25 Ventilky spalovacích motorů svařované třením.

Svařování třením jako proces s vysokou efektivitou svarového spoje našlo uplatnění v mnoha oblastech strojírenské produkce, od svařování nástrojů a součástí pro stavební stroje až po výrobu ventilů pro motory v automobilovém průmyslu (obr. 25). Jednou z nejdůležitějších vlastností této metody je možnost svařovat obrovské množství kombinací rozdílných kovů, v tomto ohledu svařování třením převyšuje veškeré ostatní svařovací metody, jak můžeme vidět na obr. 29. Při svařování třením jsme schopni dosáhnout dobrých vlastností

svarového spoje i pro materiály, které se ve svých chemických a mechanických vlastnostech velmi liší, například rozdíl v teplotách tavení u mědi a wolframu, a tuhost materiálu u svařování nerezové oceli s čistým hliníkem. Třecí svařování však nejvíce vyniká při svařování kovů, které spolu navzájem tvoří intermetalické sloučeniny, jako jsou například Fe-Al, Ti-Al, Fe-Ti, Fe-Cu, a Al-Cu, tvorba těchto sloučenin zapříčiní dokonalé spojení obou materiálů za cenu drobného poklesu sřížné síly potřebné k porušení svarového spoje [18; 12; 3; 1].

Problémy vznikají při svařování materiálů, které mají při vyšších teplotách rozdílnou teplotní vodivost, což způsobí rozdílné zahřívání ve spojovaných komponentech, a tím také různou úroveň zplastizování obou materiálů (patrné na obr. 24). Jeden z materiálů se tak při spojování začne deformovat více než druhý, a to může vést k mnoha problémům při vzniku svaru. Při procesu svařování je tak potřeba zabezpečit symetrické stlačení obou dílů, dále je také nutno zajistit dostatečnou plastickou deformaci materiálu s vyšší pevností za dané teploty. Tohoto jsme schopni dosáhnout několika různými způsoby, mezi nejčastěji využívané patří: volit průměr součástky z měkčího materiálu o 15 – 20 % větší; vhodná úprava tvaru svařovaných ploch (viz obr. 24); předežhřátí materiálu s vyšší teplotní pevností; použití přípravku na straně měkčího materiálu pro usměrnění jeho toku; a dostatečné regulování průběhu tlaku během fáze kování. Cílem všech těchto úprav je zpomalení deformace materiálu s nižší pevností při teplotě tvorby spoje. Dodatečné problémy při spojování různých kovů způsobují také jejich rozdílné teploty rekrystalizace a fázové přeměny, které negativně ovlivňují tvorbu svaru na kontaktních površích. [12; 22; 3].

Kvůli velkému uplatnění této svařovací technologie v leteckém průmyslu se naprostá většina výzkumu na svařitelnost rozdílných kovů soustředí na možnost svařit daný materiál s hliníkem a jeho slitinami. Hliník je touto metodou svařitelný s velkým množstvím kovů s naprosto jinými vlastnostmi, dokonce i s jinou krystalickou mřížkou, dostatečná pevnost spoje se však u hliníku vždy odvíjí od vlastností obou spojovaných materiálů. Možnost spojit materiály pomocí svařování třením vždy neznamená vznik dostatečně pevného svarového spoje, při svařování hliníku s kovy jiných krystalických mřížek dochází ke vzniku intermetalických sloučenin, které negativně ovlivňují pevnost vzniklého svaru, z tohoto důvodu se některé kombinace materiálů, i když teoreticky svařitelné, v praxi nevyužívají kvůli nízké pevnosti. [1; 23]



Obr. 26 Průběh tvrdosti v oblasti svaru při svařování vysokopevnostní oceli na uhlíkovou ocel [24].

Svařitelnost oceli v závislosti na změně parametrů procesu svařování a jejich optimalizaci se již věnovalo mnoho výzkumných studií, dokumentace pro svařování ocelí rozdílných vlastností je však nedostatečná a těžce dohledatelná. Okolo roku 2012 se tak pro zjišťování svařitelnosti rozdílných ocelí začaly využívat poměrně nekonvenční algoritmické metody

a také počítačové simulace. Na přelomu tisíciletí bylo publikováno několik krátkých studií věnujících se svařitelnosti uhlíkové a vysokopevnostní oceli. Zkoumání výsledné mikrostruktury svarových spojů vytvořené metodou svařování třením dokázalo, že tvorbu tepelně ovlivněné zóny a profilu tvrdosti ve spojovaných součástech lze vysvětlit pomocí rastrovacích elektronových mikroskopů ve spojení s energeticky disperzivní rentgenovou spektroskopií. Pomocí těchto metod bylo zjištěno, že uhlíkový a tvrdostní profil mají po průřezu svařených součástí v oblasti svaru téměř stejný průběh a byla tak odvozena závislost mezi procentuálním obsahem uhlíku ve svařovaných materiálech a výslednými mechanickými vlastnostmi spoje. Tvrdost svaru je tak určena především uhlíkem kvůli jeho přítomnosti při precipitačním vytvrzování karbidy (obr. 26). [1; 24; 12; 25]

Důležitým aspektem posouzení kompletní charakteristiky ocelí pro danou součást je tak určení uhlíkového ekvivalentu, tj. ekvivalentního procentuálního obsahu uhlíku. Pro oceli s obsahem uhlíku  $\leq 0,22$  hm. % lze provádět svařování bez zvláštních opatření, přičemž uhlíkový ekvivalent  $C_e \leq 0,50$  je počítán pro obloukové svařování podle rovnice [26]:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s \quad [\%] \quad (2.8)$$

kde  $s$  je tloušťka plechu v mm.

Tato rovnice platí pro materiály do obsahu jednotlivých prvků:  $C = 0,22$  hm. %;  $Mn = 1,6$  hm. %;  $Cr = 1,0$  hm. %;  $Ni = 3,0$  hm. %;  $V = 0,14$  hm. %;  $Cu = 0,30$  hm. %.

Pro oceli s obsahem uhlíku  $C > 0,18$  hm. % navrhl mezinárodní svářečský institut vzorec [26]:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (2.9)$$

Příkladem dalšího vzorce pro výpočet uhlíkového ekvivalentu je vzorec japonských autorů Ito-Bessyo pro ocel  $C < 0,16$  hm. % [26]:

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B \quad [\%] \quad (2.10)$$

Svařování třením nám umožňuje svařovat i kombinace kovů tavným způsobem nesvařitelné. Třením lze svařit většinu druhů ocelí, hliník, měď, nikl, molybden, titan, monel, nimonic a spoustu dalších kombinací různých kovů a jiných materiálů, keramické materiály, plasty, aj. Pro uhlíkové a nízkolegované oceli byl zkouškami určen pro hodnocení svařitelnosti při využití této technologie vztah pro uhlíkový ekvivalent [27; 28]:

$$C_e = C + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Mn}{6} \quad [\%] \quad (2.11)$$

Pro hodnoty ekvivalentního obsahu uhlíku počítané touto rovnicí platí [28]:

- Při  $C_e \leq 0,4$  % se dosáhne vyhovujících vlastností svarových spojů a není zapotřebí dalšího tepelného zpracování.
- V rozsahu 0,4 % až 0,5 % je doporučeno svar tepelně zpracovávat z důvodu zlepšení mechanických vlastností.
- Při  $0,5 \% \leq C_e \leq 0,8$  % je nutné tepelné zpracování, není ho však třeba provádět ihned po svaření.
- Pro  $C_e \geq 0,8$  % je nutno tepelně upravit ihned po svaření, než svar vychladne na teplotu okolí.

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu lze v literatuře najít mnoho jiných vztahů, které mohou být v závislosti na autorovi obecnější nebo určené pro specifickou skupinu ocelí, resp. její chemické složení [26; 25; 28].

Problém svařitelnosti dvou rozdílných ocelí či slitin je tak stále poměrně komplikovaný a finančně nákladný, v praxi se tak proto většinou vychází z dříve provedených experimentálních zkoušek či doporučení výrobců strojů pro svařování touto metodou. Jeden z takových výrobců je například KUKA, který pro svou novou řadu strojů pro třecí svařování zveřejnil tabulku porovnávající svařitelnosti různých kovů, se zaměřením na svařitelnost ocelí a litin: obr. 27. [29; 1]

	Wolfram-měď, pm	Wolfram, prášková metalurgie	Slitina titanu a hliníku	Titan a jeho slitiny	Volně řezaná ocel	Ocel, prášková metalurgie	Odlitá ocel	Vysokolegované oceli	Středně legované oceli	Nízkolegované oceli	Niob	Nikl, prášková metalurgie	Nikl a jeho slitiny	Molybden	Hořčík a jeho slitiny	Měď a její slitiny	Chrom	Rychlořezné oceli	Litiny	Hliník, prášková metalurgie	Hliník a jeho slitiny
Hliník a jeho slitiny	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					○	○	○		○	○	○
Hliník, prášková metalurgie								○	○	○										○	
Litiny								○	○	○										○	
Rychlořezné oceli								○	○	○											○
Chrom																					
Měď a její slitiny	○	○		○	○	○	○	○	○	○		○		○		○					
Hořčík a jeho slitiny										○					○						
Molybden								○						○							
Nikl a jeho slitiny			○	○				○	○	○		○	○								
Nikl, prášková metalurgie			○					○	○	○		○									
Niob				○				○			○										
Nízkolegované oceli		○	○	○	○	○	○	○	○	○											
Středně legované oceli		○	○	○	○	○	○	○	○	○											
Vysokolegované oceli		○	○	○	○	○	○	○	○	○											
Odlitá ocel					○	○	○														
Ocel, prášková metalurgie					○	○															
Volně řezaná ocel					○																
Titan a jeho slitiny				○																	
Slitina titanu a hliníku																					
Wolfram, prášková metalurgie	○	○																			
Wolfram-měď, pm	○																				

○ Svařitelnost potvrzena (pro specifické tvary)  
 □ Svařitelnost nepotvrzena

Obr. 27 Svařitelnost kovových materiálů [29].

## 2.7 Vlastnosti svarového spoje

Mezi hlavní důvody rozšíření uplatnění této technologie v praxi je zaručena kvalita svarového spoje a lepší možnost jeho kontroly. Mechanické vlastnosti svaru, při správném navržení a dodržení základních parametrů, bývají dobré a jednoduše replikovatelné. Při provádění statických trhacích a kroutících zkoušek dojde k poruše u většiny případů mimo svarový spoj, ten je totiž při svařování tepelně zpracován za působení třecího tepla a tvářecího tlaku, a jeho mechanické vlastnosti tak často bývají lepší než okolních svařovaných materiálů. Svar vytvořený třením má v porovnání s tavným svařováním rozdílnou strukturu, dochází zde k 10násobnému až 30násobnému zjemnění zrna, v přechodových oblastech nenastává



žádný markantní nárůst zrna, a ve spoji samotném se nevyskytují bubliny ani póry. Přítomnost následku fázové přeměny je v oblasti svaru zcela zanedbatelná. [3]

Tyto destruktivní a metalografické metody zkoumání svaru se v praxi používají pro ověřování technologie svařování třením, zjištění svařitelnosti navrhovaných materiálů nebo vlivu tvaru kontaktních ploch pro konkrétní díly. Při sériové výrobě je však vhodnější adoptovat nedestruktivní metody ověření kvality, jako je například využití ultrazvuku či magnetických zkoušek, to je však, podobně jako při odporovém sváření, pro tuto metodu využitelné pouze zřídka. [3]

## 2.8 Srovnání metod třecího a tavného svařování

Mezi hlavní výhody svařování třením v porovnání s více konvenční metodou tavného svařování patří například [3]:

- K ohřevu dochází jen ve velice malé části materiálu okolo svaru.
- Veškeré legury zůstávají přítomné, nedochází k jejich propalu.
- Původní materiály se netaví, nenastává tak fázová přeměna a zamezuje se vzniku trhlin za tepla.
- Zrno se v oblasti svaru zpravidla zjemňuje, na rozdíl od hrubnutí při tavném svařování.
- Je možno svařit extrémní množství rozdílných materiálů, které nejsou svařitelné konvenčními metodami.
- Vlivem tepelného zpracování během procesu sváření vykazuje svar vynikající mechanické vlastnosti, které mohou převyšovat vlastnosti takto svařovaných materiálů.
- Metoda svařování třením, ačkoliv energeticky velmi náročná, stále spotřebuje méně elektrické energie než například elektrické odporové svařování.

Nevýhod třecího svařování neexistuje mnoho, mezi hlavní však patří:

- Je nutné ověřovat parametry svařovacího procesu a svařitelnost pro nové kombinace spojovaných materiálů a jejich rozměrů.
- Finančně se využití této metody vyplatí pouze pro velkosériové výroby.



Obr. 28 Táhlo po svaření.



Obr. 29 Svařitelnost rozdílných kovů na strojích KUKA [44].

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKA SVAROVÉHO SPOJE

Pro ověření mechanických vlastností svaru bylo v experimentální části využito makroskopického pozorování, měření tvrdosti a tahové zkoušky. Makroskopické pozorování umožní lepší prozkoumání svarové plochy a její struktury, měření tvrdosti poskytne přehled o termomechanických dějích ve svaru a jejich vlivu na finální tvrdost, a výsledky tahové zkoušky budou využity k definování základních materiálových vlastností svaru, jako je například mez pevnosti. Teoretická část experimentu je tvořena výpočtem ověření vlastností svařovaných materiálů a určení hodnot důležitých parametrů svařovacího procesu. Takto získané informace následně umožní porovnání experimentu v této práci s dalšími experimenty prováděnými firmou THK, a diskusi o případném uplatnění těchto údajů pro optimalizaci výroby a provozu táhel.

#### 3.1 Parametry materiálů a svařovacího procesu

Při procesu svařování se třením vytváří velké množství tepla, které následně zplastizuje materiál v okolí kontaktní zóny, hodnotu takto vytvořeného tepla je možno pro táhlo  $\phi 58 \text{ mm} - \phi 80 \text{ mm}$  aproximovat pomocí rovnice (2.1) jako [3]:

$$Q = \Delta T \cdot S' \cdot \delta \cdot c \cdot \rho \quad [\text{J}] \quad (2.1)$$

$$Q = 980 \text{ [K]} \cdot 9,55 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]} \cdot 6,786 \cdot 10^{-4} \text{ [m]} \cdot 0,460 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]} \cdot 7850 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]} \cong 22,934 \text{ kJ} \quad (3.12)$$

kde 980 [K] je rozdíl teplot před a po svaření dle:  $\Delta T = [20^\circ - 1000^\circ]$ , 1000 °C je konečná teplota v oblasti svaru [4],

$6,786 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$  je plocha kontaktních ploch, při vnějším průměru trubky 58 mm a tloušťce stěny 5 mm,

$9,5 \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$  je průměrná délka axiálního posuvu [4],

$0,460 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$  je specifické teplo pro danou ocel [30; 31],

$7850 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$  je hustota oceli.

S ohledem na posouzení svařitelnosti vzhledem k uhlíkovému ekvivalentu lze využít rovnici (2.11) ze které dostáváme pro materiál trubky [28]:

$$C_e = C + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{Mn}}{6} \quad [\%] \quad (2.11)$$

$$C_{e\_TRUBKA} = 0,15 + \frac{0,19}{24} + \frac{0,027}{40} + \frac{0,014}{5} + \frac{0,01}{4} + \frac{1,43}{6} = 0,402 \quad [\%] \quad (3.13)$$

kde obsahy jednotlivých materiálů vychází z materiálového listu dle normy ČSN EN 10305-3 a jsou uvedeny v tab. 2. [32; 33; 34]

Pro uhlíkový ekvivalent materiálu hlavy pak platí [28]:

$$C_e = C + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{Mn}}{6} \quad [\%] \quad (2.11)$$

$$C_{e\_HLAVA} = 0,21 + \frac{0,37}{24} + \frac{0,03}{40} + \frac{0,07}{5} + \frac{0,01}{4} + \frac{1,23}{6} = 0,225 \quad [\%] \quad (3.14)$$

kde hodnoty jednotlivých materiálů vychází z materiálového listu dle normy ČSN EN 10025-2: 2005 a jsou uvedeny v tab. 3. [35; 36]

Materiál trubky tak svým uhlíkovým ekvivalentem spadá do rozsahu  $0,4 \% < C_e > 0,5 \%$ , pro který není nutné tepelné zpracování po svaření, je zde však doporučováno za cílem zlepšení mechanických vlastností. [28]

Tab. 2 Výběr z certifikátu EN 10204-3.1 pro trubku.

Inspekční certifikát EN 10204-3.1 pro trubku							No.:	41-1370395/001/E			
Obsahy prvků [%]	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	
	0,15	1,43	0,18	0,013	0,03	0,014	0,19	0,01	/	/	
Materiál:	E355					Číslo šarže:	205704				
Datum:	13.04.2022					Mez kluzu:	366 MPa				
Výrobce:	Warmrohrwerk/Zieherei					Úprava:	+N				

Tab. 3 Výběr z certifikátu EN 10204-3.1 pro hlavu.

Inspekční certifikát EN 10204-3.1 pro hlavu							No.:	856/23			
Obsahy prvků [%]	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	
	0,21	1,23	0,37	0,02	0,03	0,07	0,03	0,01	0,04	0,024	
Materiál:	S355J2					Číslo šarže:	T19352/1				
Datum:	09.02.2023					Tvrдост:	166-175 HBW				
Výrobce:	Moravia Tech, a. s.					Úprava:	Normalizováno				

Podrobnější vlastnosti obou materiálů lze nalézt v inspekčních certifikátech uvedených v přílohách 1 a 2.

Pro proces lze dále určit další charakteristické hodnoty jako je například [19]:

- Třecí moment:

$$M = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot p \cdot \frac{k}{n^2} \cdot R \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (2.2)$$

$$M = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot 23 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^7}{1400^2} \cdot 58 \cong 22\,808 \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (3.15)$$

Tepelný výkon:

$$P' = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot p \cdot \frac{k}{n} \cdot R \cdot 10^{-6} \text{ [kW]} \quad (2.3)$$

$$P' = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot 23 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^7}{1400} \cdot 58 \cdot 10^{-6} = 31,93 \text{ [kW]} \quad (3.16)$$

- Měrný tepelný výkon:

$$P_m = \frac{2}{3} \cdot p \cdot \frac{k}{n \cdot R} \cdot 10^{-6} \text{ [kW} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (2.4)$$

$$P_m = \frac{2}{3} \cdot 23 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^7}{1400 \cdot 58} \cdot 10^{-6} = 3,021 \text{ [W} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (3.17)$$

kde 23 je hodnota třecího tlaku v MPa,

$1,6 \cdot 10^7$  je konstanta pro nízkouhlíkové oceli [ $\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-2}$ ],

1400 jsou otáčky vřetena [ $\text{min}^{-1}$ ],

58 je vnější průměr trubky v mm.

## 3.2 Představení zkušebních metod

Bezpečný a spolehlivý provoz strojních součástí a celých strojů je pevně svázán s užitnými vlastnostmi použitých materiálů a jejich svarových spojů. Ověřením těchto vlastností a z nich plynoucí garanci odolnosti vůči vnějším vlivům došlo v průběhu průmyslového rozvoje ke standardizaci mnoha testů, zajišťujících přesnost a opakovatelnost výsledků za předem určených podmínek. Mezi základní destruktivní zkoušky patří:

- zkouška tahem,
- zkouška vrubové houževnatosti,
- zkouška tvrdosti,
- zkouška v ohybu,
- zkouška únavové pevnosti,
- další speciální zkoušky, jako například makroskopické a mikroskopické pozorování. [26]

Pro experimentální posouzení vlastností svarového spoje na táhle jsou v této práci využity dále představené zkoušky tahem, zkoušky tvrdosti a makroskopické pozorování.

### 3.2.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem představuje základní metodu používanou k ověření pevnostních a plastických charakteristik materiálu. Její princip spočívá v použití tyče normalizovaného kruhového průřezu, ploché tyče či jiného standardizovaného tvaru zkoušené součásti. Ve zkušebním stroji dochází za předem definovaných podmínek (obvykle zahrnujících teplotu a rychlost deformace) k natahování vzorku mezi dvěma příčnickými od nulového zatížení až do porušení jeho celistvosti. Naměřený záznam zatížení ku napětí (ten odpovídá diagramu napětí ku deformaci) představuje takzvaný klasický tahový diagram a z jeho průběhu je možno definovat následující charakteristické údaje [26; 3]:

- Platnost Hookova zákona, tzn. lineární závislost deformace na napětí podle vzorce (3.18):

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \text{ [MPa]} \quad (3.18)$$

kde  $\sigma$  je napětí v MPa,

$\varepsilon$  je deformace zkušebního tělesa v %,

$E$  je Youngův modul pružnosti v tahu [MPa].

- Zatížení na mezi kluzu  $R_e$ , kde dochází k prudkému nárůstu deformace bez dalšího zvyšování napětí. Mez kluzu lze definovat jako:

$$R_e = \frac{L_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3.19)$$

kde  $R_e$  je mez kluzu v MPa,

$L_e$  je zatížení na mezi kluzu v N,

$S_0$  je výchozí plocha zkušebního vzorku v  $\text{mm}^2$ .

- Mez pevnosti materiálu  $R_m$ , která u tahového diagramu představuje dosažení maximálního zatížení a následné porušení celistvosti vzorku. Její hodnota je dána vztahem:

$$R_m = \frac{L_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3.20)$$

kde  $R_m$  je mez pevnosti materiálu v MPa,

$L_m$  je maximální zatížení před porušením vzorku v N.

- Tažnost  $A$ , ta představuje základní plastickou vlastnost materiálu a lze ji stanovit jako:

$$A = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3.21)$$

kde  $A$  je tažnost materiálu v %,

$l$  je měrná délka vzorku po přetržení v m,

$l_0$  je výchozí měrná délka vzorku v m.

- Kontrakce či také zúžení  $Z$ , je další důležitou plastickou vlastností materiálu definovanou jako:

$$Z = \frac{S_0 - S'}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3.22)$$

kde  $Z$  je kontrakce v %.

### 3.2.2 Zkouška tvrdosti

Zkoušky tvrdosti jsou společně s tahovou zkouškou a zkouškou vrubové houževnatosti v ohybu základními metodami ověřování mechanických vlastností. Jejich principem je zaznamenávání odporu materiálu vůči statickému nebo dynamickému vniku indentoru. [26]

Statické zkoušky tvrdosti lze podle typu použitého indentoru a kritérií hodnocení odporu rozdělit na:

- Brinellovu zkoušku HB, kde je do materiálu vtlačována zakalená ocelová kulička, nejčastěji o průměru  $\phi$  10 mm silou 29 430 N. Kritériem pro tvrdost je pak opticky měřená plocha vtisku, vypočítaným jako:

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102}{\frac{\pi \cdot D}{2} \cdot [D_k - \sqrt{(D_k^2 - d^2)}]} \quad (3.23)$$

kde  $F$  je zatěžující síla v N,

$D_k$  je průměr kuličky v mm,

$d$  je průměr vtisku v mm. [26]

- Tvrdost podle Vickerse HV, která se určuje pomocí diamantového indentoru ve tvaru čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu  $136^\circ$ . Často se využívá k hodnocení materiálů o vyšších pevnostech a její hodnota je určena podle střední úhlopříčky vzniklého obrazce:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (3.24)$$

kde  $u$  je střední úhlopříčka vtisku v mm. [26]



- Tvrdost dle Rockwella se používá ve dvou variantách, pro materiály o vysoké tvrdosti s využitím diamantového kužele mající vrcholový úhel  $120^\circ$  označenou HRC, a pro měkčí materiály indentor z kalené kuličky o průměru  $\frac{1}{16}$ '' označovaná jako HRB. Tvrdost se v obou případech určuje z míry proniknutí tělesa do materiálu opět měřena opticky pomocí mikroskopu.

Alternativními metodami měření jsou dynamické zkoušky tvrdosti. Mezi ně patří například Poldi kladívko, kde je tvrdost měřena vtiskem kuličky v porovnání s vnikem úderníku do srovnávacího tělesa, nebo Shoreho odrazová zkouška, která tvrdost určuje pomocí skleroskopu. [26]

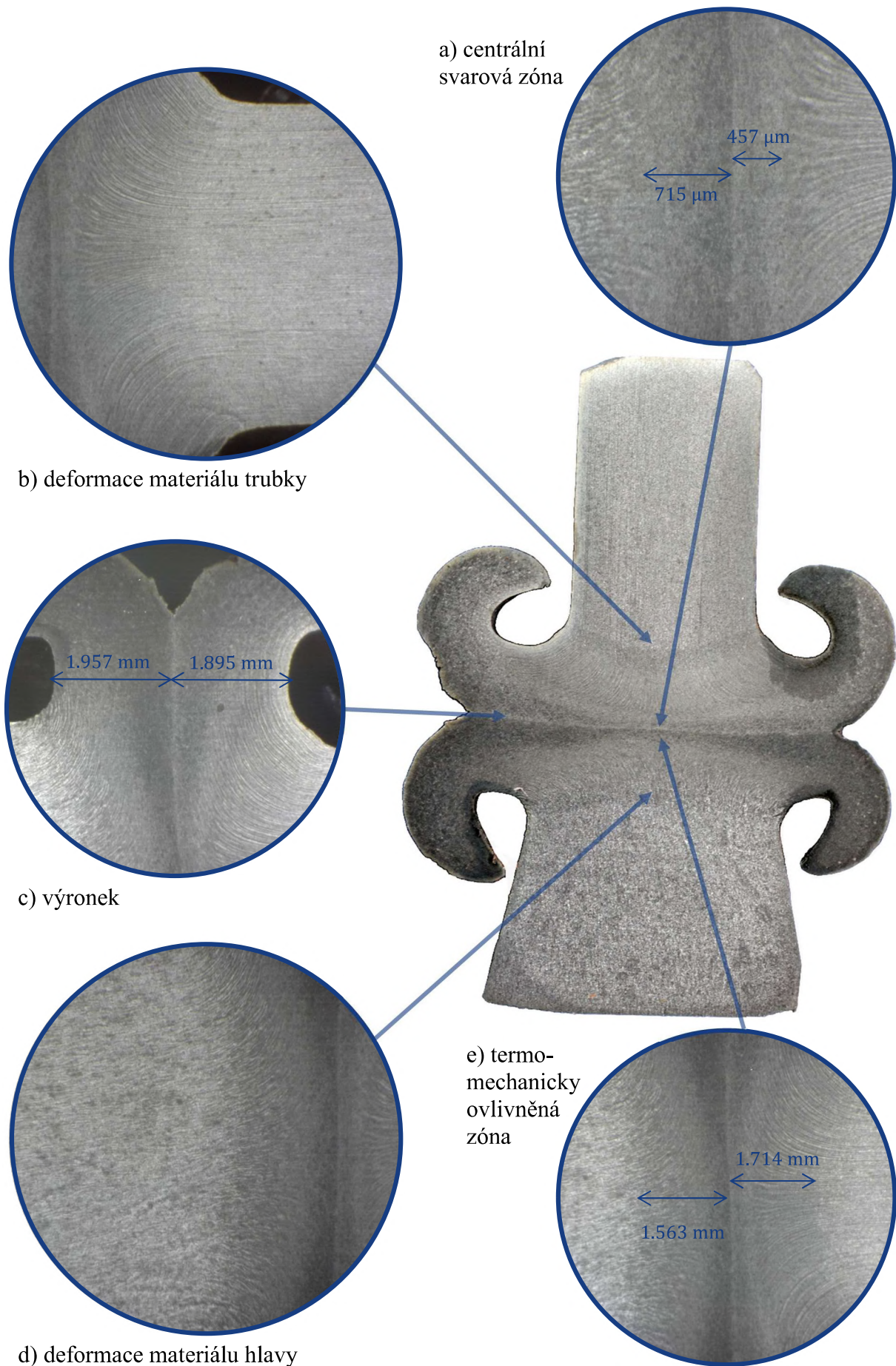
### 3.3 Makroskopické pozorování

Na obr. 30 jsou makroskopické snímky svarového spoje pořízeny pomocí fotoaparátu a mikroskopu při různých zvětšeních. V nadhledu jsou jasně viditelné zóny typické pro spoj vytvořený třecím rotačním svařováním. Centrální zóna svaru je obklopena termomechanicky ovlivněnou zónou, ze které postupně přechází do původního materiálu komponent, snadno pozorovatelné v detailu e) společně s rozměry termomechanicky ovlivněné zóny. Ten lze jednoduše odlišit od materiálu ovlivněného svařovacím procesem díky jeho jedinečné orientaci zrn paralelně k ose svaru. Ta je lépe pozorovatelná na detailu b), kde byla původním materiálem ocel válcovaná za studena, tento proces tvorby polotovaru v komponentě vytvoří jasně viditelná vlákna, která jsou při svařování postupně vtahována a přetvářena. Z levé strany je přivařena hlava, která byla kována, vlákna zde nejsou tak prominentní, jejich orientace je však také jednoznačně viditelná v detailu d). V celé oblasti svaru vytváří plastická deformace a teplotní cykly při procesu zbytkové napětí. [37; 38]

Kvůli jejich odlišné mikrostruktuře bývají centrální svarová a termomechanicky ovlivněná zóna uvažovány separátně, přestože v obou oblastech dochází k termomechanickému ovlivnění materiálu. Pásmo skládající se z centrální zóny svaru a dvou termomechanicky ovlivněných zón na obou stranách se nazývá plasticky ovlivněná zóna. V podrobnější fotografii na obr. 30 a) je jasněji vidět přechod mezi centrální a termomechanicky ovlivněnou zónou, společně s rozměry centrální zóny. Již zde není viditelná struktura základního materiálu, jeho zrna jsou přeorientovaná ve směru tvorby výronku. Jsou také deformovaná, protáhlá a pozicovaná blíže k sobě v důsledku svařování. V centrální svarové zóně je původní struktura materiálu zcela ztracena kvůli markantní dynamické rekystalizaci a intenzivnímu plastickému přetvoření. V této oblasti je vinou tření materiál ohřátý na austenitickou teplotu a při jeho ochlazení tak vzniká velmi jemná rekystalizovaná mikrostruktura. [37; 38]

V detailech a) c) a e) jsou zakresleny rozměry centrální svarové zóny, výronku a termomechanicky ovlivněné zóny. Šířky těchto zón jsou poměrně malé, to je způsobeno krátkými svařovacími časy při procesu a optimálním nastavením jiných svarových parametrů. Teplo je ze svaru rychle expelováno a nedochází tak k růstu tepelně ovlivněné zóny.

Vzorek pro makroskopické pozorování byl připraven z přímého táhla svařeného z obou stran. Nejprve byla na pásové pila odříznuta trubka a hlava za účelem snadnější manipulace a přepravy. Následně byl na metalografické pile vyříznut přibližně centimetr tlustý vzorek, který byl zakrácen na 2 cm kvůli snažšímu výbrusu. Metalografická pila společně s chlazením chladicí kapalinou zaručí, že při řezání nedojde k tepelnému ovlivnění zkoumaného povrchu. Takto připravený vzorek byl poté vybroušen na vodou chlazené brusce pomocí série výměných disků, z nichž nejjemnější měl hrubost  $1200 \text{ zrn} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Po vybroušení a vysušení byl vzorek naleptán kvůli snadnějšímu pozorování makrostruktury.



Obr. 30 Makroskopické snímky svarového spoje.



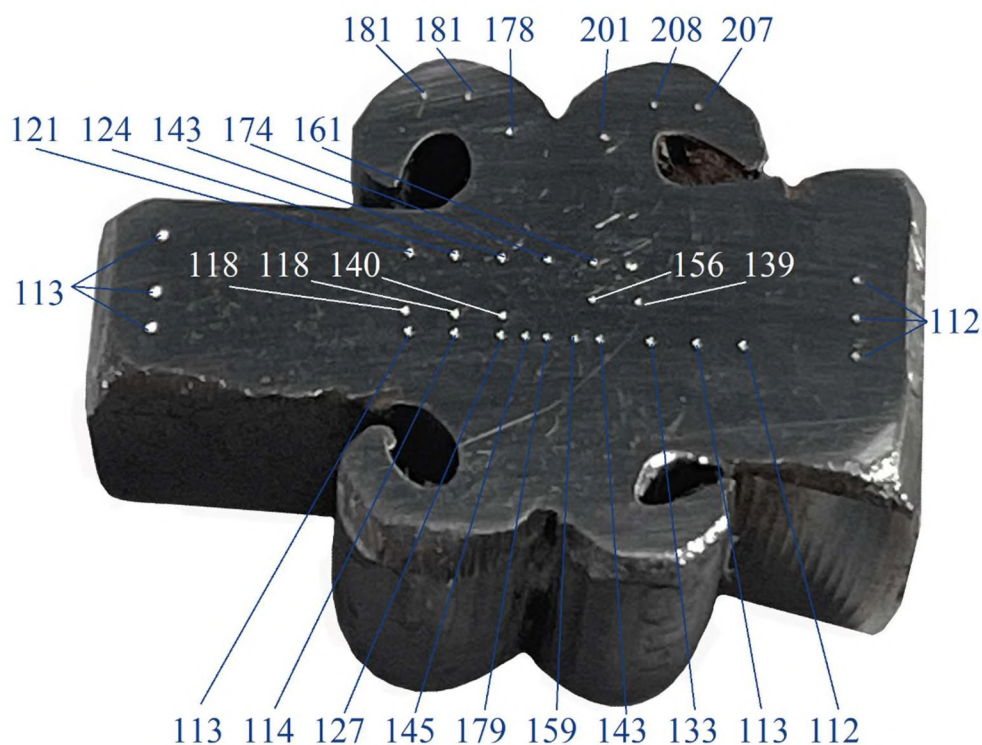
### 3.4 Zkouška tvrdosti

Pro zjištění tvrdosti byl použit test podle Vickerse popsany v kapitole 3.2.2, přesněji HV5, kde je diamantový indentor ve tvaru čtyřboké pyramidy zatížen 5 kg po předem specifikovanou dobu. Měřené byly průběhy tvrdostních profilů axiálně po ose součásti, a zároveň jejich variace vertikálně v ose svaru s rozstupem  $\pm 1$  mm. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4 a průběh tvrdosti v ose součásti je graficky znázorněn v grafu (viz obr. 32). Tvrdost byla měřena také ve výronku vzniklém při svařování, jak je viditelné na obr. 31.

Ve vertikálním směru je tvrdost poměrně konstantní, to je způsobeno podobnými podmínkami při svařování, tepelný gradient i ochlazování je uvnitř svaru totiž téměř totožné. K odchylce dochází až při výstupu zplastizovaného materiálu z centrální zóny svaru mimo svařovanou součástku ve formě výronku, kde dochází k rychlejšímu ochlazení a výsledná tvrdost je zde tak o poznání větší. Tento dodatečný nárůst tvrdosti a s ním spojený pokles houževnatosti ve výronku však výslednou součástku negativně ovlivní pouze minimálně.

V axiálním směru dochází s přechodem z původního materiálu do termomechanicky ovlivněné zóny k nárůstu v tvrdosti. Toto způsobuje tepelné ovlivnění v celé oblasti a částečná rekrytalizace materiálu v centrální zóně svaru. Tvrdost se v obou směrech po přibližně 4 mm dostává relativně blízko tvrdosti původních komponent před svařením, to signalizuje konec tepelně ovlivněné oblasti, která je tak přibližně dvakrát větší než termomechanicky ovlivněná zóna změřená na obr. 30. Maximální tvrdost byla naměřena v ose svaru, způsobena je největší teplotou v dotykové oblasti součástek, kde se tvoří převážné množství třecího tepla, a největším podílem rekrytalizace zplastizovaného materiálu právě v ose svaru, dodatečným parametrem pro nárůst tvrdosti může být také částečná oxidace v této oblasti při svařování. [39; 40]

Snížení tvrdosti a s ní spojené zvýšení houževnatosti lze dosáhnout tepelnou úpravou po svaření, či snížením tlaků při svařovacím procesu. Ani jedné z možností se však při výrobě zkoumané součásti nevyužívá, výsledný svar je totiž pevnější než trubka, tvořící převážnou část táhla, a k porušení tak při tahové zkoušce bez úpravy tvaru svarového spoje dojde vždy v ní. Toto tvrzení je dále potvrzeno v následující experimentální části. [39; 41; 5]

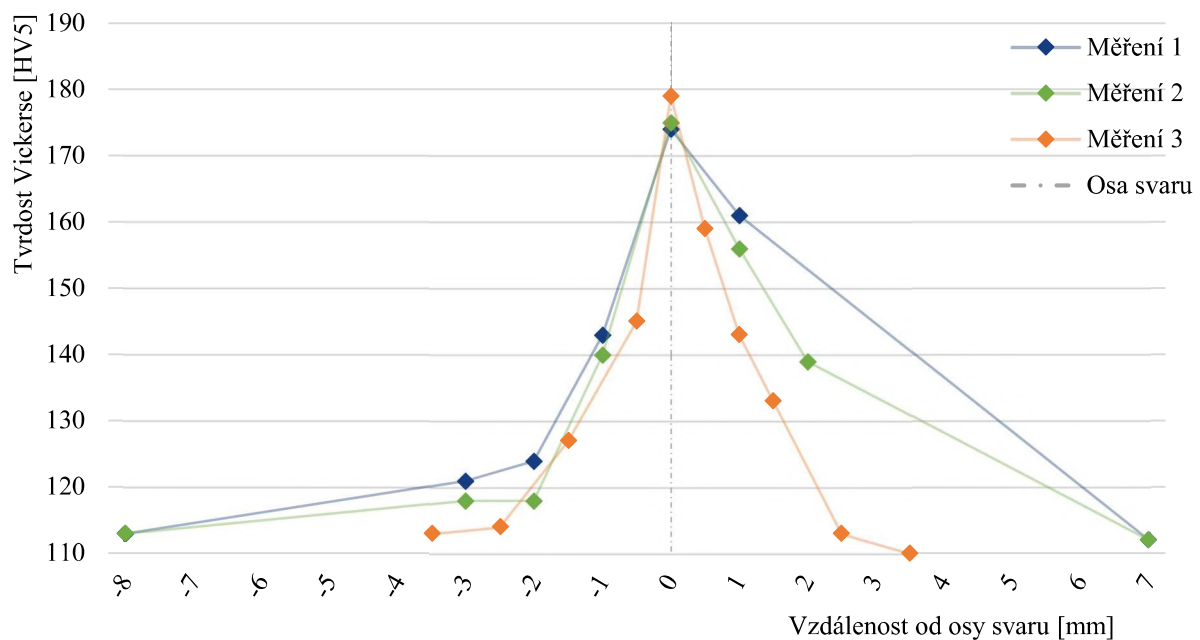


Obr. 31 Tvrdost ve svaru (HV5).



Tab. 4 Měření tvrdosti.

Hodnoty měřeny v ose				Hodnoty měřeny ve výronku			
Tvrđost [HV5]	Vzdálenost [mm]	Tvrđost [HV5]	Vzdálenost [mm]	Tvrđost [HV5]	Vzdálenost [mm]	Tvrđost [HV5]	Vzdálenost [mm]
113	-8	113	-8	-	-8	-	-
-	-3.5	-	-3.5	113	-3.5	-	-
121	-3	118	-3	-	-3	181	-3
-	-2.5	-	-2.5	114	-2.5	-	-2.5
124	-2	118	-2	-	-2	181	-2
-	-1.5	-	-1.5	127	-1.5	-	-1.5
143	-1	140	-1	-	-1	178	-1
-	-0.5	-	-0.5	145	-0.5	-	-0.5
174	0	-	0	179	0	-	0
-	0.5	-	0.5	159	0.5	-	0.5
161	1	156	1	143	1	201	1
-	1.5	-	1.5	133	1.5	-	1.5
-	2	139	2	-	2	208	2
-	2.5	-	2.5	113	2.5	-	2.5
-	3	-	3	-	3	207	3
-	3.5	-	3.5	110	3.5	-	-
112	7	112	7	-	7	-	-



Obr. 32 Průběh tvrdosti v ose součásti.

Vzorek pro pozorování tvrdosti byl připraven ze stejného svaru jako vzorek pro makroskopické pozorování. Na pásové pile byla opět odříznuta trubka a hlava za účelem snadnější manipulace a přepravy. Následně byl na metalografické pile vyříznut přibližně centimetr tlustý vozek, který byl zkrácen na 2 cm. Takto připravený vzorek byl poté opět vybroušen na vodou chlazené brusce pomocí série výměných disků.

### 3.5 Tahová zkouška

Vzorky pro tahovou zkoušky byly zhotoveny ze dvou táhel, v první sérii testů se jedná o stejný svar zkoumaný makroskopickým pozorováním, u druhé série byly využity oba svary jiného přímého táhla, svarové parametry, rozměry a chemické složení původních materiálů jsou však pro všechny svary totožné a výsledky jsou tak vzájemně porovnatelné.

Oblast svaru byla znovu na pásové pile oddělena od převážné části trubky a hlavy, tentokrát kvůli snadnějšímu upínání. První dvojice vzorků byla připravena na metalografické pile, jejich rozměry jsou uvedeny v tab. 5. Druhá série byla připravována na pásové pile, kde byly z každého svaru vyhotoveny čtyři vzorky. Svar byl nejdříve přeříznut na dva velké vzorky tvaru U (obr. 33), každý vyhotoven na jednu stranu od středu součásti o rozměrech v rozmezí od 4,42 cm do 6,10 cm, podrobněji uvedených v tab. 5. Za využití ruční pilky byl pak odebrán přebytečný materiál, který by mohl způsobit problémy při upínání do testovacího stroje, každý vzorek ve tvaru U byl tak rozdělen na dva vzorky vhodné k testování (obr. 34).

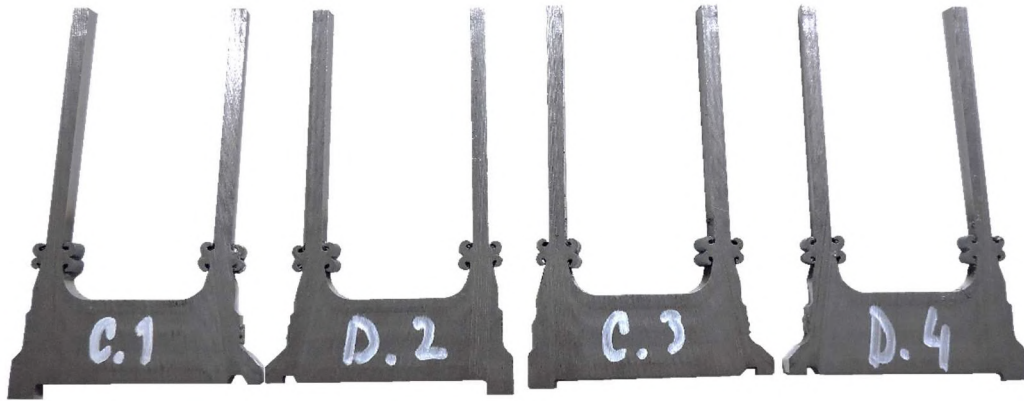
Všechny vzorky byly po vyříznutí dále upraveny tak, aby k porušení došlo v oblasti svarového spoje, a ne původního materiálu. Ze svaru byl poté pomocí ruční pilky a pilníku z obou stran odebrán materiál, cílem tohoto bylo dostatečně zúžit průřez a zajistit tak porušení ve zkoumané oblasti. Hodnoty průřezů jsou uvedeny v tab. 5.

Samotný experiment byl proveden v laboratořích Ústavu Strojírenských technologií na hydraulickém zkušebním stroji ZD40, jehož přesné parametry jsou uvedeny v příloze 5.

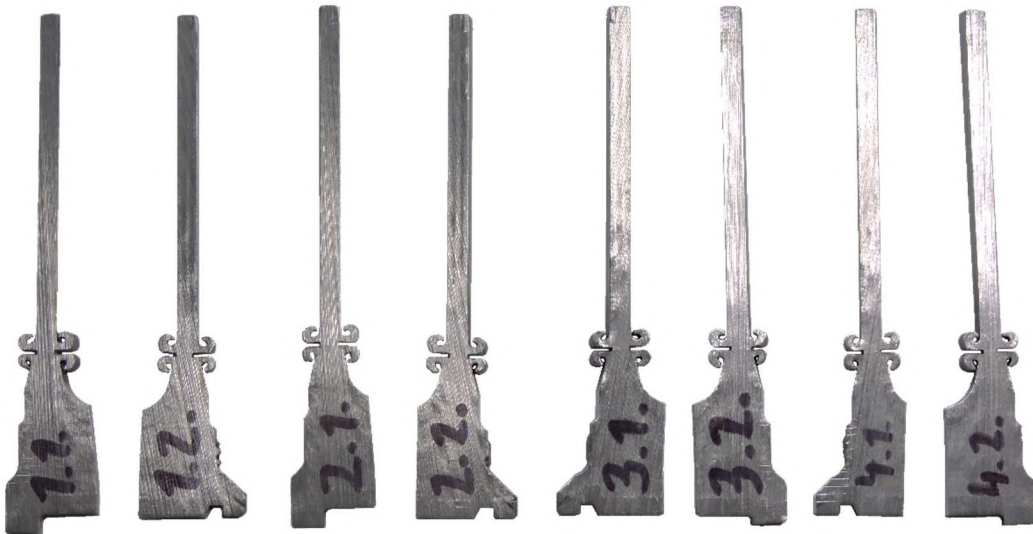
Testování první série vzorků bohužel nepřineslo žádné konstruktivní výsledky. První ze vzorků byl nedostatečně naříznut, v důsledku čehož došlo k porušení v původním materiálu (viz obr. 36). K porušení druhého vzorku došlo téměř okamžitě po zahájení testu, při napětí několikanásobně nižším, než bylo očekáváno, nejspíše v důsledku trhlinky vzniklé při výrobě vzorku, a tedy ani toto měření nebylo použitelné pro vyhodnocení svarového spoje.

V druhé sérii bylo testováno celkem osm vzorků, z nichž u tří nastalo porušení v původním materiálu trubky, tyto testy tak byly využity pro ověření vlastností materiálu uvedených v atestu, zbytek vzorků se však přetrhl ve svarové zóně. Hodnoty naměřené během těchto testů byly použity k sestavení grafů uvedených níže, přičemž graf na obr. 39 znázorňuje průběhy testu pro vzorky přetržené ve svaru, a graf na obr. 38 pro vzorky u nichž došlo k porušení v původním materiálu. Pro vypracování těchto grafů nebylo využito dvou testů, a to druhého vzorku z první série, a vzorku 4.2 ze série druhé. U obou z nich došlo k porušení okamžitě po zahájení testu, nejspíše v důsledku vady vnesené do svaru při jejich přípravě, průběh napětí během zkoušky je tak nestandardní a nepřinesl žádné užitečné informace. V přílohách 3 a 4 jsou však uvedeny naměřené hodnoty pro všechny tahové zkoušky společně s rozsáhlou fotodokumentací.

Na obr. 35 a obr. 37 jsou vidět místa přetržení vzorků, jak ve svarových spojích, tak v základním materiálu trubky. Všechny takto vzniklé lomy jsou tvárné a provází je tak výrazná plastická deformace. Dalším důležitým aspektem viditelným na fotografiích je zúžení, potřebné pro přetrhnutí vzorku ve svaru. Materiál zde musel být odebrán na cca 25 % původní tloušťky (zahrnující výronek), u vzorků porušených v oblasti trubky bylo odebráno průměrně 70 % a nebylo tak dosaženo potřebného zúžení.



Obr. 33 Velké vzorky tvaru U.



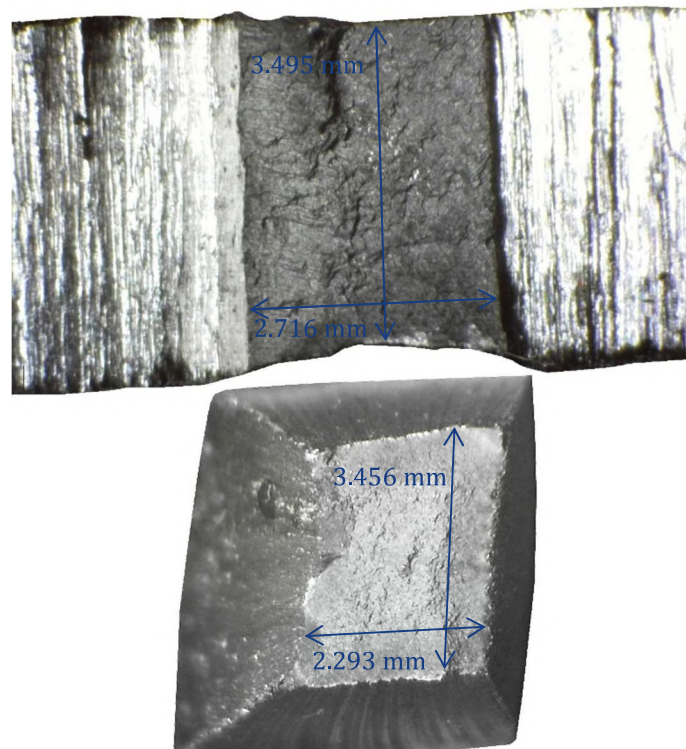
Obr. 34 Vzorky před tahovou zkouškou, druhá série testů.



Obr. 35 Vzorky po tahové zkoušce, druhá série testů.



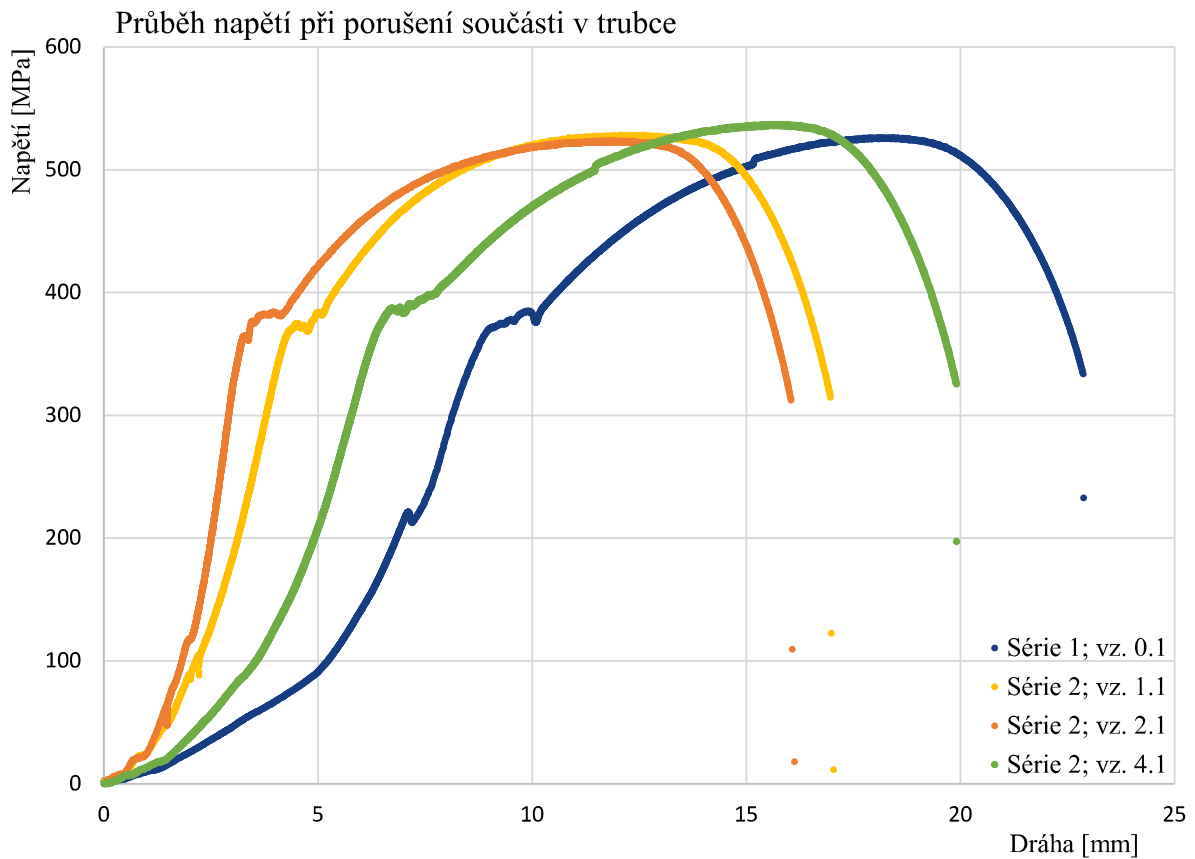
Obr. 36 Vzorky po tahové zkoušce, první série testů.



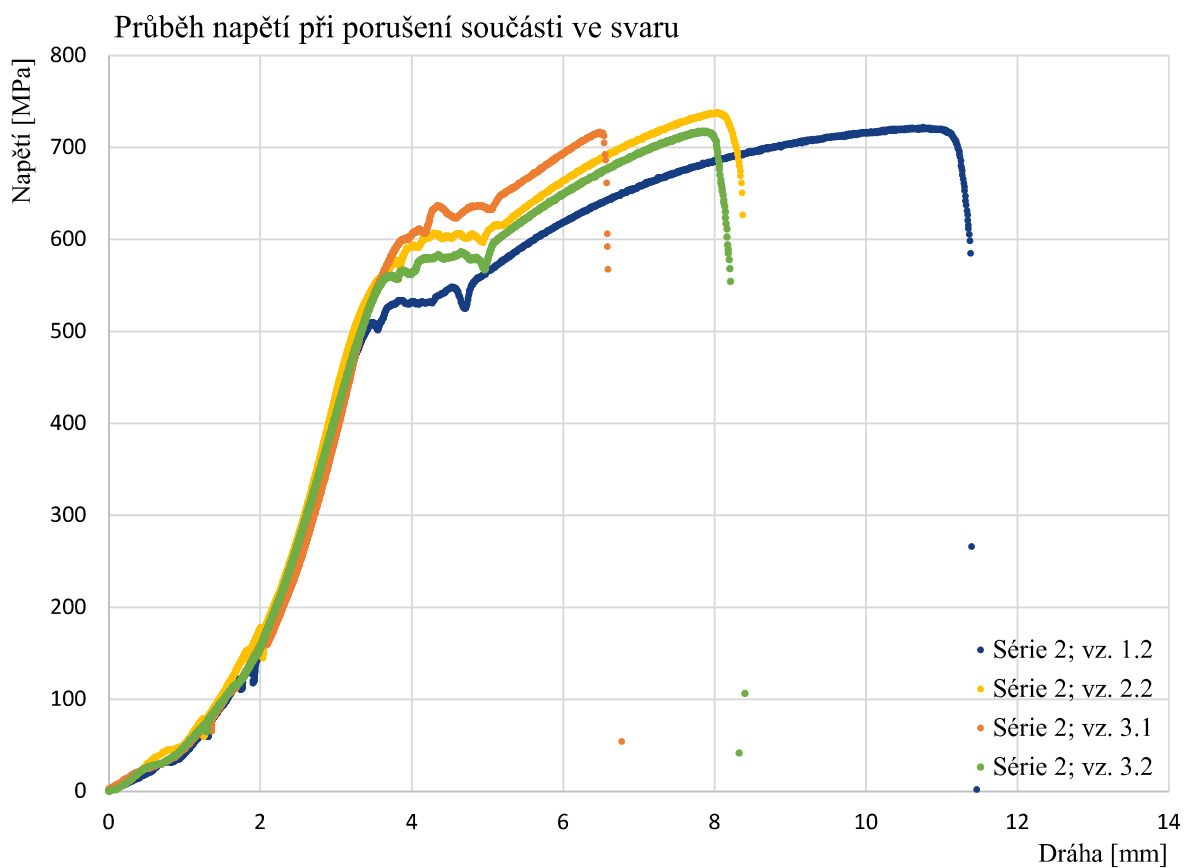
Obr. 37 Detaily přetržené svarové plochy a původního materiálu (vzorky 4.2 a 4.1).

Tab. 5 Hodnoty získané tahovou zkouškou.

Série	Vzorek	Místo porušení	Šířka	Tloušťka	Počáteční plocha	$F_m$	$R_{p0,2}$	$R_m$
[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[MPa]	[MPa]
1.	0.1	trubka	8,44	5,00	42,2	22205,6	350,1	526,2
1.	0.2	svar	9,80	1,92	18,8	1429,6	38,0	76,0
2.	1.1	trubka	5,06	5,00	25,3	13365,2	374,9	528,3
2.	1.2	svar	5,21	3,57	18,6	13431,2	509,7	722,1
2.	2.1	trubka	4,58	5,00	22,9	11992,0	365,1	523,7
2.	2.2	svar	4,75	3,24	15,4	11362,0	577,7	738,3
2.	3.1	svar	5,95	3,06	18,2	13054,8	611,2	717,0
2.	3.2	svar	6,10	3,36	20,5	14710,0	560,7	717,8
2.	4.1	trubka	6,00	5,00	30,0	16102,0	388,8	536,7
2.	4.2	svar	4,42	3,01	13,3	5671,6	426,0	426,0
Průměrné hodnoty		trubka	5,88	5,00	30,1	15916,2	376,8	528,7
Průměrné hodnoty		svar	5,50	3,31	18,2	13139,5	569,3	723,8



Obr. 38 Průběh napětí v trubce při tahové zkoušce.



Obr. 39 Průběh napětí ve svaru při tahové zkoušce.



### 3.6 Zhodnocení a porovnání výsledků experimentu

Provedené testy umožňují poměrně objektivní zhodnocení vlastností svaru. U všech testů byl vyhotoven široký rozsah měření a jejich výsledky jsou tak statisticky relativní. Všechny závěry vyvozené z experimentů jsou provedené na základě odborných znalostí a informací reflektující postupy a procesy při výrobě.

Při makroskopickém pozorování nebyly zjištěny žádné chyby ve spojení původních komponent. Svar je celkově velmi symetrický jak ve své ose, tak v ose součásti. V celé šířce svaru se nenachází žádné vady či iregularity, přechody mezi jednotlivými zónami jsou taktéž velmi pravidelné a mají očekávatelný tvar odpovídající svařování trubka na trubku. Celkové rozměry svaru jsou nepatrně menší, než by podle dimenzí svařovaných součástí bylo očekávatelné, toto však není negativum. Zmenšení rozměrů tepelně ovlivněných zón je způsobeno ideálním nastavením svařovacích parametrů a s ním spojené velice krátké doby ohřevu. Celý svar, ačkoliv pouze na vzduchu, poměrně rychle vychladne a teplo se tak nemůže šířit dál do součásti. Toto také napomáhá jednodušší manipulaci se svařenými díly, kdy obsluha může táhlo zavařené na obou stranách ze stroje pohodlně vyjímat za pomoci obyčejné rukavice, prostředek trubky totiž po celou dobu zůstává na teplotě okolí, lépe představitelné na obr. 40.

Zkouška tvrdosti měla také poměrně očekávatelné výsledky, vzhledem k dlouhodobému využívání takto svařených táhel v každodenním provozu nemohla být v procesu svařování žádná markantní chyba. Průběh tvrdosti v ose součásti téměř přesně replikuje profil očekávatelný u třetího svařování ostatních konstrukčních ocelí. Nárůst tvrdosti ve výronku o cca 70 % (v porovnání s cca 55 % v ose svaru) je způsoben rychlejším ochlazením v této oblasti. Výronek tvoří zcela zplastizovaný materiál vystupující z osy svaru ohřátý na austenitickou teplotu, který se v důsledku větší kontaktní plochy s pohybujícím se okolním vzduchem, a menší hmotou takto ohřátého materiálu v této oblasti rychle ochlazuje a na povrchu oxiduje. Důkazem tohoto děje jsou opalky oxidovaného materiálu, které lze z povrchu výronku odstranit, viditelné například na obr. 11.

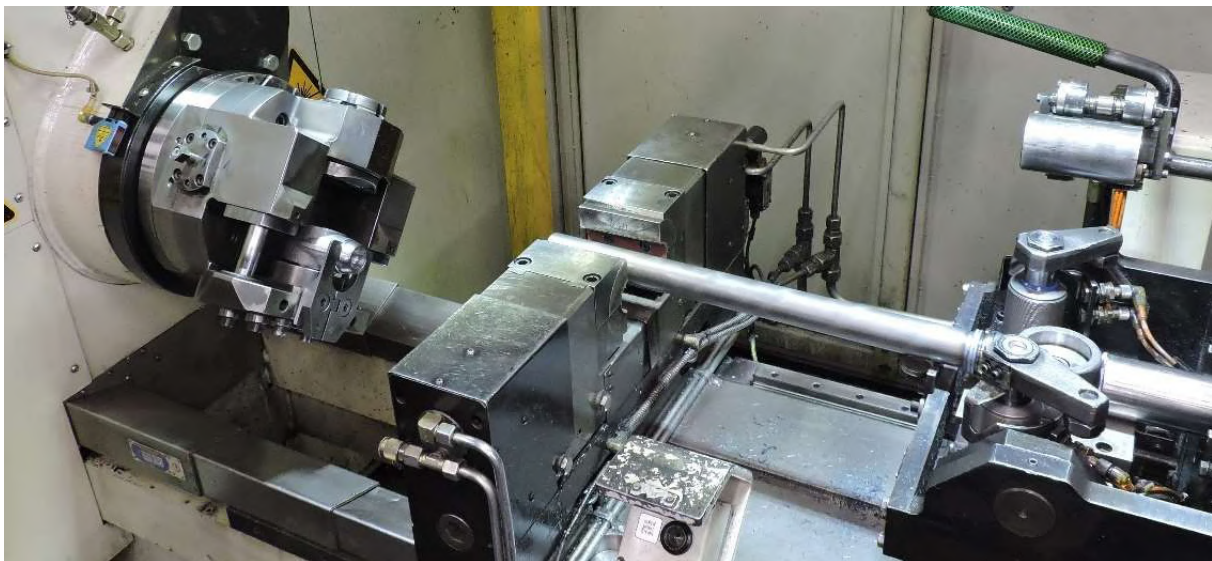
Tab. 6 Hodnoty z tahové zkoušky provedené ve firmě THK [4].

Série	Vzorek	Místo porušení	Vnější průměr	Tloušťka trubky	Počáteční plocha	$F_m$	$R_{p0,2}$	$R_m$
[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[MPa]	[MPa]
THK	0-16	trubka	50	6	829,4	433,24	-	522,4
THK	0-17	trubka	50	6	829,4	432,49	-	521,5
THK	0-18	trubka	50	6	829,4	431,53	-	520,3
Průměrné hodnoty		trubka	50	6	829,4	432,42	-	521,4

Při vykonávání tahové zkoušky se naskytlo několik problémů, žádný z nich však nebyl způsoben špatným svarem či jinými negativními vlastnostmi táhla. U vzorků 0.2 a 4.2 došlo k rychlému přetržení, stále se však jednalo o houževnatý lom, tuto poruchu tak nejspíše způsobila vada vnesená do svaru při výrobě vzorku. Takováto vada by v novém povrchu svaru sloužila jako velký koncentrátor napětí a zapříčinila tak téměř okamžité porušení. U průběhu síly a napětí viditelných v příloze 3 je pro tyto dva vzorky patrné, že nepřipomínají žádný očekávatelný tvar, jak pro houževnaté, tak pro křehké materiály, což jen dále potvrzuje vliv povrchové vady při těchto tahových zkouškách. Vzorky 0.1; 1.1; 2.1 a 4.1, které se přetrhly v původním materiálu trubky ve vzdálenosti 15 cm a více od svaru, byly nedostatečně zúžené. Nárůst pevnosti ve svaru je sice očekávatelný, byl jsem však překvapen, jak velký tento nárůst ve finálních vzorcích byl. Materiál se zde dostal z průměrné meze pevnosti 528 MPa až na hodnotu 738 MPa, nárůst o cca 38 %, v průběhu testování druhé série muselo

tak být několik vzorků dodatečně ztenčeno pro zaručení dostatečného počtu měření ve svarové zóně. Změření vlastností základního materiálu však umožňuje ověřit správnost naměřených hodnot pomocí certifikátu k trubce a hodnot naměřených na podobném táhle ve firmě THK. Z testů v laboratoři VUT vyšla průměrná hodnota meze pevnosti pro ocel E355+N jako 528,7 MPa, téměř totožná je mez pevnosti v atestu, 529 MPa. Test prováděný ve firmě zahrnoval tři táhla s rozměrem trubky 50 x 6 mm, u nichž byla trubka na hlavu nalisována přes vlnovec. Takto získané hodnoty jsou však stále porovnatelné, k porušení zde totiž vždy došlo uprostřed trubky a měřené parametry tak musejí být totožné, naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 6. Průměrná hodnota meze pevnosti získaná během těchto testů je 521 MPa, je tak nepatrně odlišná od ostatních hodnot, stále však dokonale spadá do rozsahu uvedeného v materiálovém listu. [4]

Všechny provedené testy ukazují na to, že kritickým místem táhla není svar, ale trubka tvořící jeho převážnou část. Bez úpravy plochy svaru při tahové zkoušce by k porušení vždy došlo v ní, makroskopické pozorování ukazuje že svar samotný je zcela bez závad a ze zkoušky tvrdosti lze usoudit, že v oblasti svaru materiál sice ztvrdne, nezačne však ještě výrazněji křehnout. Toto podporuje také celá řada testů prováděných firmou THK, mezi nimi testy únavové či zátěžové, kde k porušení dochází výhradně v trubce. Životnost táhla a jeho odolnost vůči přetržení, vyžadována od každého zadavatele jinak, obecně lze říct že  $\geq 300$  kN, závisí právě na volbě trubky [4]. Dále pak lze s jistotou tvrdit, že i přes hraniční hodnotu uhlíkového ekvivalentu, není svar potřeba jakkoliv tepelně upravovat. Jak bylo již řečeno v kapitole 3.1, pro materiály s rozsahem  $0,4\% < C_e > 0,5\%$  je tepelné zpracování po svaření doporučováno za účelem zlepšení mechanických vlastností. Vzhledem k tomu, že táhlo z tohoto hlediska omezuje trubka, mechanické vlastnosti svaru není třeba jakkoliv vylepšovat. Absence tepelné úpravy také ušetří výrobní čas, dodatečné náklady na tepelnou úpravu velké série rozměrných výrobků a náklady na další logistiku. Celkově tak lze tvrdit, že nechat svar tepelně neupravený je výborný ekonomický krok který kvalitu finálního výrobku nikterak neovlivní.



Obr. 40 Založení přímého táhla uvnitř stroje KUKA RS-30 pro vyhotovení druhého svaru.

## ZÁVĚR

Předložená práce, s tématem Rozbor svařování třením v automobilovém průmyslu, se ve své úvodní části zabývá rozбором součásti, přesněji táhla nákladního automobilu svařeného třením. Pojednává o jeho uplatnění, možnostech výroby, chemickém složení obou vstupních polotovarů a jejich rozměrech. Dále následuje stručné představení firmy THK RYTHM AUTOMOTIVE CZECH, a.s., ve spolupráci s kterou vznikala tato práce. Uvedený je také postup a bližší specifikace pro výrobu hlavy, čepu a trubky, samotný proces svaření, a následné dokončovací operace na již svařeném táhlu, jako je například zalisování čepu či lakování.

Součástí práce je také podrobná literární rešerše na svařování třením. V ní je uveden základní přehled o problematice, rozdělení svařovacích strojů dle způsobu přenosu energie na svařované součástky a rozdělení typů svařování dle hlavních pohybů při svařovacím procesu. Následuje také rozbor mechanismů a procesů při svařování, společně s bližším rozpravou nad parametry, které mohou proces spojování komponent ovlivnit. Mezi ně patří také svařitelnost základních materiálů, o které je pojednáno v následující kapitole. Je zde uveden stručný přehled možných úprav pro zlepšení svarového spoje a také porovnání s konvenčními metodami svařování, společně s tabulkou materiálů, u kterých již byla potvrzena svařitelnost. Dále je pak uvedena stručná diskuse na vlastnosti svarového spoje společně s porovnáním metody svařování třením s ostatními metodami svařování.

Experimentem jsou ověřovány základní mechanické vlastnosti svaru. Nejprve byly provedeny výpočty popisující svařovací proces, mezi nimi například hodnota vytvořeného tepla, uhlíkové ekvivalenty pro hlavu i trubku, třecí moment, tepelný a měrný tepelný výkon. Následuje stručné představení zkušebních metod, kterých bylo následně využito při praktické části experimentu. Ta začíná makroskopickým pozorováním svarového spoje, při které bylo za pomoci fotoaparátu a mikroskopu vyhodnoceny a změřeny jeho rozměry, tvar a charakteristiky. Ve svaru nebyly nalezeny žádné vady, nespojená místa či jiné nedostatky. Svar je také poměrně úzký, to ukazuje na krátké svařovací časy a ideální nastavení svařovacího procesu. Ten byl nastavován iteračně na několika testovacích vzorcích, výsledné hodnoty se již několik let prakticky využívají v provozu. Na výbrusech je také velmi dobře pozorovatelná struktura obou základních materiálů a následné plastické přetvoření v termomechanicky ovlivněné zóně. Následovalo měření tvrdosti jak v ose součásti, tak ve výroncích. Zde byly výsledky poměrně předvídatelné, v důsledku plastické deformace materiálu a jeho ohřátí na austenitickou teplotu v centrální zóně svaru došlo ke ztvrdnutí materiálu na cirká 175 HV5. Ve výroncích bylo následkem rychlejšího ochlazení zplastizovaného materiálu naměřena tvrdost přes 200 HV5. Všechny změřené hodnoty zhruba odpovídají očekávaným hodnotám pro dané materiály a parametry svařovacího procesu. Posledním experimentem byla tahová zkouška, zde bylo testováno celkem deset vzorků po dvou sériích. V první sérii byly přetrženy dva vzorky ze stejného svaru, pro který bylo vyhodnoceno makroskopické pozorování a tvrdost, bohužel ani jeden z vzorků nepřinesl žádné užitečné informace. Druhá série byla úspěšnější, pomocí čtyř měření bylo možno vykreslit křivky pro materiál svaru, další čtyři pomohly ověřit vlastnosti materiálu trubky.

Výsledky experimentů dokonale potvrdily výsledky z praxe: k porušení táhla dojde vždy v trubce, svar či hlava jsou tak na táhlu nejbezpečnější částí. Celkově bylo experimentální částí ověřeno vhodné nastavení svařovacích parametrů a nebyly nalezeny žádné chyby v procesu svařování, či při návrhu rozměrů nebo materiálů táhla. To se tak jeví dobře optimalizované pro svou funkci v provozu.



## BIBLIOGRAFIE

- [1] UDAY, M., M. AHMAD FAUZI, H. ZUHAILAWATI a A. ISMAIL. Advances in friction welding process: a review. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013, **15**(7), 534-558. ISSN 1362-1718. Dostupné z: doi:10.1179/136217110X12785889550064
- [2] NICHOLAS, E. D. Friction Processing Technologies. *Welding in the World*. 2003, **47**(11-12), 2-9. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/BF03266402
- [3] TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvarovania: Edícia strojárскеj literatúry*. 1. Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 80-05-00097-9.
- [4] BESEDA, Vojtěch. *Interní dokumenty firmy THK RYTHM AUTOMOTIVE CZECH, a.s.: sbírka elektronické komunikace* [elektronická pošta]. Message to: 228825@vutbr.cz. [cit. 2023-02-15].
- [5] ERDOGAN, C., E. KIZAN, ed. THK RHYTHM AUTOMOTIVE GMBH TECH CENTER DÜSSELDORF, ENGINEERING INFRASTRUCTURE. *Generic Product Specification for Commercial Vehicles: Rear axle products: Radius rods, V-links*. Düsseldorf, 2017, , 1-27 s. Interní dokument firmy THK Rhythm Automotive Czech, a.s.
- [6] TUPÁ, Radka. *Analýza trhu práce v okrese Jindřichův Hradec*. České Budějovice, 2021. Bakalářská práce. Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Lukáš Polanecký.
- [7] O nás: Historie - THK. In: *THK Dačice: dceřiná společnost THK Co. Ltd.* [online]. Dačice: THK CO., LTD., 2023 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <http://thkdacice.cz/o-nas/historie/>
- [8] *PROVOZNÍ NÁVOD: Zařízení pro svařování třením RS-30*. KUKA Schweissanlagen GmbH. Blücherstrasse 144, D-86165 Augsburg, 2002. Dostupné také z: Návod pro obsluhu a seřizování stroje KUKA RS-30 poskytnutý k nastudování firmou THK RHYTHM AUTOMOTIVE CZECH, as
- [9] *TWI: What is Friction Welding?* [online]. Granta Park, Great Abington, Cambridge: TWI Ltd (Head Office), 2023 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-friction-welding>
- [10] MAALEKIAN, M. Friction welding – critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013, **12**(8), 738-759. ISSN 1362-1718. Dostupné z: doi:10.1179/174329307X249333
- [11] NGUYEN, T. a D. WECKMAN. A thermal and microstructure evolution model of direct-drive friction welding of plain carbon steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006, **37**(2), 275-292. ISSN 1073-5615. Dostupné z: doi:10.1007/BF02693157
- [12] LI, Wenya, Achilles VAIRIS, Michael PREUSS a Tiejun MA. Linear and rotary friction welding review. *International Materials Reviews*. 2016, **61**(2), 71-100. ISSN 0950-6608. Dostupné z: doi:10.1080/09506608.2015.1109214
- [13] VAIRIS, A a M FROST. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti 6Al 4V. *Materials Science and Engineering: A*. 1999, **271**(1-2), 477-484. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/S0921-5093(99)00449-9
- [14] AKINLABI, Esther a Rasheedat MAHAMOOD. *Solid-state welding: friction and friction stir welding processes*. Elektronické. Cham: Springer, 2020. Mechanical Engineering Series. ISBN 978-3-030-37015-2.

- [15 IBRAHIM, Isam a GuneY YAPICI. Application of a novel friction stir spot welding process on dissimilar aluminum joints. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018, **35**, 282-288. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2018.08.018
- [16 HSIEH, Ming-Jer, Rong-Tsong LEE a Yuang-Cherng CHIOU. Friction stir spot fusion welding of low-carbon steel to aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017, **240**, 118-125. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.08.034
- [17 KIMURA, Masaaki, Kenji SEO, Masahiro KUSAKA a Akiyoshi FUJI. Observation of Joining Phenomena in Friction Stage and Improving Friction Welding Method. *JSME International Journal Series A*. 2003, **46**(3), 384-390. ISSN 1344-7912. Dostupné z: doi:10.1299/jsmea.46.384
- [18 FUKUMOTO, S., T. INOUE, S. MIZUNO, K. OKITA, T. TOMITA a A. YAMAMOTO. Friction welding of TiNi alloy to stainless steel using Ni interlayer. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013, **15**(2), 124-130. ISSN 1362-1718. Dostupné z: doi:10.1179/136217109X12577814486692
- [19 *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [20 KUBÍČEK, Jaroslav. Studijní opora - část 2 - PDF. In: *Odboru svařování a povrchových úprav FSI VUT v Brně: Studijní opory* [online]. Brno: ÚST o. TSPÚ, Ing. Josef Řídký, 2023 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te\\_technologie\\_II\\_opora\\_svarovani\\_2018\\_II\\_kubicek.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_II_opora_svarovani_2018_II_kubicek.pdf)
- [21 YEOH, Cheow, Shamsul JAMALUDIN a Zainal AHMAD. The Effect of Varying Process Parameters on the Microhardness and Microstructure of Cu-Steel and Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Friction Joints. *Jurnal Teknologi*. 2004. ISSN 2180-3722. Dostupné z: doi:10.11113/jt.v41.693
- [22 TURNER, R., R. WARD, R. MARCH a R. REED. The Magnitude and Origin of Residual Stress in Ti-6Al-4V Linear Friction Welds: An Investigation by Validated Numerical Modeling. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2012, **43**(1), 186-197. ISSN 1073-5615. Dostupné z: doi:10.1007/s11663-011-9563-9
- [23 KIMURA, M., M. CHOJI, M. KUSAKA, K. SEO a A. FUJI. Effect of friction welding conditions on mechanical properties of A5052 aluminium alloy friction welded joint. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013, **11**(2), 209-215. ISSN 1362-1718. Dostupné z: doi:10.1179/174329306X89242
- [24 YILMAZ, M., E. KALUC, K. TULBENTCI a S. KARAGOZ. Investigation into the weld zone of friction welded C45/HS6-5-2 dissimilar steel joints. *Journal of Materials Science Letters*. 1996, **15**(4), 360-362. ISSN 0261-8028. Dostupné z: doi:10.1007/BF00591663
- [25 HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vyd. Bratislava: Veda, 1989. ISBN 80-224-0016-5.
- [26 *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-857-7185-3.
- [27 KUBÍČEK, Jaroslav. Technologie svařování. In: *Odboru svařování a povrchových úprav FSI VUT v Brně: Studijní opory* [online]. Brno: ÚST o. TSPÚ, Ing. Josef Řídký, 2023 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie\\_svarovani\\_5te\\_etv\\_etv-k\\_kubicek.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf)



- [28 KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984. ISBN 04-245-84.
- [29 KUKA: *Technology Rotary friction welding* [online]. Augsburg, Německo: Zugspitzstrasse 140, 2018 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: [https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka\\_brochure\\_friction-welding.pdf?rev=211f8c43853a49ffb5211363254dbe39&hash=6F7748C8D3D241771571777D16782859](https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka_brochure_friction-welding.pdf?rev=211f8c43853a49ffb5211363254dbe39&hash=6F7748C8D3D241771571777D16782859)
- [30 MAALEKIAN, M., E. KOZESCHNIK, H.P. BRANTNER a H. CERJAK. Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars. *Acta Materialia*. 2008, **56**(12), 2843-2855. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2008.02.016
- [31 Hodnoty fyzikálních veličin kovů. In: *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo s.r.o, 2001 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/37-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-kovu>
- [32 ČSN EN 10305-3 *Chemické složení* [online]. Napajedla: czferrosteel, 2003 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/trubky2-E355.pdf>
- [33 EN 10305-1 E355N *Za Studena Tažené Bezešvé Přesné Ocelové Trubky* [online]. Baqiao, Čína: Shaanxi svět Iron & Steel Co, Ltd, 2022 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <http://cz.worldironsteel.com/news/en-10305-1-e355n-cold-drawn-seamless-precision-4895809.html>
- [34 *INSPECTION CERTIFICATE EN 10204-3.1*. Postfach 13 40 33043 Paderborn Deutschland, 2023. Interní dokument firmy THK Rhythm Automotive Czech, a.s.
- [35 *Dspace.cvut* [online]. Praha: Spernak Michal, 2019 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84823/F2-BP-2019-Spernak-Michal-priloha-Priloha%201.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [36 *INSPECTION CERTIFICATE ABNAHMEPRÜFZEUGNIS ŚWIADECTWO ODBIORU 3.1 EN10204*. KUŹNIA POLSKA S.A.,uL. Górecka 32 43-430 SKOCZÓW, 2023. Interní dokument firmy THK Rhythm Automotive Czech, a.s.
- [37 SCHERILLO, Fabio, Antonello ASTARITA, Luigi CARRINO, Carmine PIROZZI, Umberto PRISCO a Antonino SQUILLACE. Linear friction welding of Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018, **34**(2), 201-207. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426914.2018.1532086
- [38 REHMAN, Ateekh, Nagumothu BABU, Mahesh TALARI, Yusuf USMANI a Hisham AL-KHALEFAH. Microstructure and Mechanical Property Correlation Between Rotary Friction Welded Nitinol–Nitinol Joints. *Frontiers in Materials*. 2021, **8**. ISSN 2296-8016. Dostupné z: doi:10.3389/fmats.2021.726383
- [39 ARIVAZHAGAN, N., Surendra SINGH, Satya PRAKASH a G.M. REDDY. *Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding*. 2011, **32**(5), 3036-3050. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2011.01.037
- [40 HANDA, Amit a Vikas CHAWLA. Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Friction Welded Dissimilar Steels under Varying Axial Pressures. *Strojnický časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2016, **66**(1), 27-36. ISSN 2450-5471. Dostupné z: doi:10.1515/scjme-2016-0008
- [41 XU, Yaxin, Wenya LI, Xiawei YANG a Yuefeng GU. Evolution of grain structure,  $\gamma'$  precipitate and hardness in friction welding and post weld heat treatment of a new Ni-Fe

- 
- based superalloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2020, **788**. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2020.139596
- [42] MRŇA, Libor. Svařování třením - PDF. In: *Odbor svařování a povrchových úprav FSI VUT v Brně: Studijní opory* [online]. Brno: © ÚST o. TSPÚ, Ing. Josef Řídký, 2023 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_svarovani\\_trenim\\_mrna.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_trenim_mrna.pdf)
- [43] EREN, Berkay, Mehmet GUVENC a Selcuk MISTIKOGLU. Artificial Intelligence Applications for Friction Stir Welding: A Review. *Metals and Materials International*. 2021, **27**(2), 193-219. ISSN 1598-9623. Dostupné z: doi:10.1007/s12540-020-00854-y
- [44] KUKA: *Svařování třením* [online]. Česká republika: © KUKA AG, 2023 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/procesn%C3%AD-technologie/sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-t%C5%99en%C3%ADm>
- [45] ROSECKÝ, Jan. Modely kamionů. In: *Nedtrans* [online]. 2011 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <http://www.liaznavzdy.cz/nedtrans/konstrukce1.php>
- [46] FACT SHEET Rear axle lift: LIFT-BAS. In: *Volvo Trucks* [online]. AB Volvo [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: [https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/FactSheet/LIFT-BAS\\_Eng\\_01\\_305608734.pdf](https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/FactSheet/LIFT-BAS_Eng_01_305608734.pdf)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	%
c	Specifické teplo	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$C_e$	Uhlíkový ekvivalent	%
ČSN	Česká státní norma	-
D	Průměr svařovaného průřezu	mm
$D_k$	Průměr kuličky	mm
d	Průměr vtisku	mm
E	Youngův modul pružnosti	MPa
EN	Evropská norma	-
F	Síla	N
$F_z$	Přítlačná síla	N
HAZ	Tepelně ovlivněná zóna	-
HB	Tvrдость dle Brinella	-
HBW	Tvrдость dle Brinella měřena pomocí kuličky ze slinutých karbidů	-
HRB	Tvrдость dle Rockwella měřena pomocí kuličky o průměru $\frac{1}{16}$ palce	-
HRC	Tvrдость dle Rockwella měřena pomocí diamantového kužele	-
HSS	Rychlořezná ocel	-
HV	Tvrдость dle Vickerse	-
k	Konstanta v rovnici pro vývoj tepla	$\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-2}$
l	Měrná délka vzorku	m
$l_0$	Výchozí měrná délka vzorku	m
$L_e$	Zatížení na mezi kluzu	N
$L_m$	Maximální zatížení před porušením vzorku	N

Označení	Legenda	Jednotka
M	Třecí moment	Nm
n	Otáčky	min <sup>-1</sup>
P'	Tepelný výkon	W
p	Svařovací tlak	Pa
P <sub>CM</sub>	Uhlíkový ekvivalent	-
P <sub>m</sub>	Měrný tepelný výkon	W
Q	Teplo	J
R	Poloměr součásti	mm
Re	Mez kluzu	MPa
Rm	Mez pevnosti	MPa
Rp <sub>0,2</sub>	Mez kluzu určená z trvalé deformace	MPa
S'	Plocha	mm <sup>2</sup>
S <sub>0</sub>	Výchozí rozměr zkušebního vzorku	mm <sup>2</sup>
TSCD	Technické a vývojové centrum	-
u	Střední uhlopříčka vtisku	mm
v	Rychlost svařování	m · s <sup>-1</sup>
w	Úhlová rychlost	rad · s <sup>-1</sup>
Z	Kontrakce	%
δ	Délka stlačení svařovaných dílů	m
ΔT	Rozdíl teplot v místě svaru	K
ε	Deformace zkušebního tělesa	%
ρ	Hustota	kg · m <sup>-3</sup>
σ	Napětí	Pa
ω	Úhlová rychlost	rad · s <sup>-1</sup>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 Inspekční certifikát 3.2 pro hlavu

Příloha 2 Inspekční certifikát 3.2 pro trubku

Příloha 3 Kompletní přehled naměřených hodnot při tahové zkoušce

Příloha 4 Dodatečná fotodokumentace

Příloha 5 Hydraulický stroj

Příloha 6 Vizitka firmy THK