

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**Návrh optimalizace technologie svařování
železničních cisternových vozů**

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Pavel Papcun**
Osobní číslo: **D22238**
Studijní program: **B0788A040001 Dopravní technika**
Specializace: **Provoz a údržba vozidel**
Téma práce: **Návrh optimalizace technologie svařování železničních cisternových vozů**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování

- Přehled konstrukčních typů železničních cisternových vozů.
- Popis výrobního procesu cisternových vozů se zaměřením na technologii svařování včetně představení typů vad a jejich vzniku.
- Návrh experimentu pro ověření vlivu zvolených parametrů na vznik pórovitosti u konkrétního typu svarového spoje.
- Experimentální ověření vlivu testovaných parametrů svařování na statickou pevnost svarů, analýzy se zaměřením na kvantifikaci úrovně pórovitosti svarů.
- Souhrnné vyhodnocení vlivu testovaných parametrů na pórovitost.

Rozsah pracovní zprávy: **35 stran**
Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T.: *Svařování I, II*. VŠB – TU Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0870-6.
- [2] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu I.-II*. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-7204-193-2.
- [3] *ASM Handbook, Volume 6 Welding, Brazing, and Soldering*. ASM International, 2000.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Filip Klejch**
Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **7. února 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. května 2025**

L.S.

doc. Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.
děkan

Ing. Jakub Vágner, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Práci s názvem Návrh optimalizace technologie svařování železničních cisternových vozů jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě (VVCD).

V Pardubicích dne 9.5. 2025

Pavel Papcun

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Filipu Klejchovi, Ph.D. a paní prof. Ing. Evě Schmidové, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a čas věnovaný konzultacím při zpracování této práce. Velké poděkování dále patří společnosti Nymwag CS, která umožnila realizaci praktické části experimentu a poskytla potřebné technické zázemí a materiál. V neposlední řadě děkuji své rodině a blízkým za podporu po dobu celého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením kvality svarových spojů realizovaných metodou svařování pod tavidlem (SAW), která je využívána při výrobě kotlů železničních cisternových vozů. Experimentální část je zaměřena na posouzení vlivu technologických parametrů na vznik vnitřních vad, zejména pórovitosti, a na následné vyhodnocení mechanických vlastností pomocí tahových zkoušek, metalografických rozborů a měření tvrdosti. Na základě provedených analýz je diskutován vliv pórovitosti na pevnost svarového spoje.

Výsledky experimentu ukazují, že správná příprava svarových ploch, vhodný stav tavidla a optimalizace parametrů svařování významně přispívají ke snížení výskytu vnitřních vad a ke zvýšení mechanických vlastností svaru.

Klíčová slova

Cisternový železniční vůz, svařování pod tavidlem, svarový spoj, pórovitost, tahové zkoušky, tvrdost materiálu, mikrostruktura, zjemnění zrna

Title

Optimization of Welding Technology for Railway Tank Wagons

Abstract

This bachelor thesis deals with the evaluation of the quality of welded joints realized by the submerged arc welding (SAW) method, which is used in the production of rail tank car boilers. The experimental part is focused on the assessment of the influence of technological parameters on the formation of internal defects, especially porosity, and on the subsequent evaluation of mechanical properties by tensile tests, metallographic analyses and hardness measurements. Based on the analyses performed, the influence of porosity on the strength of the welded joint is discussed.

The experimental results show that proper preparation of weld surfaces, appropriate flux condition and optimization of welding parameters contribute significantly to the reduction of internal defects and to the increase of mechanical properties of the weld.

Keywords

Rail tank car, submerged arc welding, weld joint, porosity, tensile testing, material hardness, microstructure, grain refinement

Obsah

Seznam obrázků.....	9
Seznam grafů a tabulek.....	11
Seznam zkratk.....	12
1 Úvod.....	13
2 Železniční cisternová doprava.....	14
2.1 Cisternový (kotlový) vůz.....	14
2.2 Nádržkové kontejnery.....	15
3 Přehled konstrukčních typů.....	16
3.1 Nápis a značky na kotlových vozech.....	16
3.1.1 Řadové označení vozu.....	16
3.1.2 Nejvyšší přípustná hmotnost nákladu a rychlost vozu.....	17
3.1.3 Další důležité symboly.....	17
3.2 Konstrukční provedení kotlového vozu.....	18
3.2.1 Spodek vozu.....	19
3.2.2 Kotel.....	21
3.3 Provedení kotle dle druhu přepravované látky.....	22
3.4 Popis výrobního procesu kotle.....	24
4 Svařování kotle cisternového vozu.....	28
4.1 Používané metody svařování.....	28
4.1.1 MAG – svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu (135).....	28
4.1.2 WIG – svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (141).....	29
4.1.3 SAW – svařování pod tavidlem (121).....	30
4.2 Druhy svarových spojů a jejich použití.....	33
5 Vady.....	34
6 Návrh experimentu.....	36
6.1 Konkrétní svarový spoj.....	36
6.2 Cíl experimentu.....	36

6.2.1	Identifikace pórovitosti ve svarovém kovu	37
6.2.2	Plán experimentu	37
6.2.3	Výroba vzorků.....	37
6.2.4	Zkušební podmínky	39
6.2.5	Omezení a předpoklady experimentu	39
7	Experimentální ověření.....	40
7.1	První fáze tahových zkoušek	40
7.1.1	Vyhodnocení první fáze tahových zkoušek	40
7.2	Druhá fáze tahových zkoušek.....	42
7.2.1	Vyhodnocení druhé fáze tahových zkoušek.....	42
7.3	Metalografická analýza mikrostruktury v TOO	46
7.4	Měření tvrdosti svarového spoje	50
7.4.1	Cíl měření.....	50
7.4.2	Popis vzorku a měřených linií	50
7.4.3	Výsledky a vyhodnocení	51
8	Souhrnné vyhodnocení.....	53
9	Závěr	55
	Literatura	56
	Seznam příloh.....	59

Seznam obrázků

Obr. 1 Cisternový vůz produkce firmy Nymwag CS.....	15
Obr. 2 Kódové označení vozů typu Z (kotlových vozů) dle UIC [9]	16
Obr. 3 Technického značení ne cisternovém voze Zacns dle předpisů RID a TSI	17
Obr. 4 Cisternový vůz s vnějším rámem.....	19
Obr. 5 Cisternový vůz s vnitřním rámem.....	20
Obr. 6 Nákres cisternového vozu bez hlavního rámu [16].....	20
Obr. 7 Příklady značení cisternových kotlů v souladu s předpisem RID.....	22
Obr. 8 Výrobní linka společnosti Nymwag CS na přípravu lubů.....	24
Obr. 9 Spojení dna s lubem v přípravku, pracoviště společnosti Nymwag CS.....	25
Obr. 10 Montáž přírub, průlezu a dalšího příslušenství	26
Obr. 11 Kompletní kotel po výstupní kontrole a tlakové zkoušce	27
Obr. 12 Tupý svar (vlevo) a koutový svar (vpravo) [37].....	33
Obr. 13 Rozdělení vad ve svaru podle tvaru (vlevo) a podle umístění (vpravo) [38].....	34
Obr. 14 Svar s výraznou pórovitostí [39].....	35
Obr. 15 Tvar a postup svařování tupého svarového spoje.....	36
Obr. 16 Navržená geometrie zkušební vzorku pro tahové zkoušky	38
Obr. 17 Upravená geometrie zkušební vzorku se zúžením v oblasti svaru.....	39
Obr. 18 Zkušební vzorek skupiny A1 vyfocený před provedením takové zkoušky	40
Obr. 19 Zkušební vzorky po provedení tahových zkoušek.....	41
Obr. 20 Zkušební vzorek skupiny B2 s upravenou geometrií ve svarovém spoji	42
Obr. 21 Vnitřní vady v podobě póru	43
Obr. 22 Detail póru na zkušebním vzorku A2-V7 (127)	44
Obr. 23 Makroskopický výbrus vzorků 115 (vlevo), 125 (uprostřed) a 312 (vpravo).....	47
Obr. 24 Mikrostruktura základního materiálu a přechodové oblasti (500× a 32×).....	48
Obr. 25 Struktura kořenové a krycí housenky (125× a 64×).	48
Obr. 26 Vměstek ve svarovém kovu a EDS analýza složení.....	49
Obr. 27 Mikrostruktura svaru oblasti kořenové (vlevo) a krycí housenky (vpravo)	49

Obr. 28 Elektronová mikroskopie vzorků A2 a C2 (srovnání čistoty svarového kovu) ...	50
Obr. 29 Makrofotografie výbrusu se zvýrazněnými liniemi měření tvrdosti.	51
Obr. 30 Podvozek Y25 Lsd vyráběný firmou Nymwag CS.....	62
Obr. 31 Vybrané cisternové vozy Nymwag CS [23]	64
Obr. 32 Vybrané cisternové vozy Tatravagónka Poprad [24]	65
Obr. 33 Vybrané cisternové vozy Duro Dakovič [26].....	66
Obr. 34 Vybrané cisternové vozy Greenbrier Europe [27]	67
Obr. 35 Ilustrace svařovacích poloh [35].....	68

Seznam grafů a tabulek

Graf 1 Závislost napětí na deformaci u vybraných vzorků z první fáze zkoušek	41
Graf 2 Tahové křivky vzorků skupiny A1 ve druhé fázi tahových zkoušek.....	43
Graf 3 Tahové křivky vzorků skupiny A2 ve druhé fázi tahových zkoušek.....	44
Graf 4 Tahové křivky vzorků skupiny B1 ve druhé fázi tahových zkoušek.....	45
Graf 5 Tahové křivky vzorků skupiny B2 ve druhé fázi tahových zkoušek.....	45
Graf 6 Tahové křivky vzorků skupiny C1 ve druhé fázi tahových zkoušek.....	46
Graf 7 Průběh tvrdosti (HV2) ve třech liniích napříč svarovým spojem	51
Tabulka 1 Přehled zkoušených zkušebních skupin dle stavu plechu a tavidla.....	37

Seznam zkratek

CNC	Computer Numerical Control (číselně řízené obrábění)
DT	Destructive Testing (destruktivní zkoušení)
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy (energiově-dispersní spektroskopie)
EN	Evropská norma
MAG	Metal Active Gas (obloukové svařování v aktivním plynu)
NDT	Non-Destructive Testing (nedestruktivní zkoušení)
RID	Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí
RT	Radiografická zkouška
SAW	Submerged Arc Welding (svařování pod tavidlem)
SK	Svarový kov
TK	Temeno kolejnice
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
TSI	Technické specifikace pro interoperabilitu
UIC	Union Internationale des Chemins de fer (Mezinárodní železniční unie)
UT	Ultrazvuková zkouška
VÚZ	Výzkumný ústav železniční
WIG	Wolfram Inert Gas
WPS	Welding Procedure Specification

1 Úvod

V oblasti železniční dopravy představují cisternové vozy důležitý prostředek pro přepravu kapalin a plynů. Konstrukce těchto vozů musí splňovat vysoké nároky na bezpečnost, těsnost a mechanickou odolnost, protože porucha v provozu může vést k závažným haváriím. S postupným zpřísněním legislativních požadavků na bezpečnost dopravy roste i důraz na kvalitu výrobních procesů, zejména svařování, které je klíčovou technologií při výrobě tlakových nádob a obvodových svarů cisternových kotlů.

Výrobní proces kotlů cisternových vozů zahrnuje mimo jiné i spojování jednotlivých dílů pomocí technologie svařování pod tavidlem (SAW). Tato technologie umožňuje vysokou produktivitu, stabilní kvalitu svarů a je vhodné pro tlustostěnné ocelové konstrukce. Přesto se i při této metodě mohou vyskytnout vady, jako jsou póry, vměstky, trhliny nebo jiné vady, které ovlivňují mechanické vlastnosti svarových spojů. Zejména pórovitost svarového kovu může zásadně snížit pevnost spoje a stát se iniciačním místem pro vznik trhlin při zatížení.

Tato bakalářská práce, realizovaná ve spolupráci se společností Nymwag CS, se proto zaměřuje na hodnocení vybraných parametrů svarového spoje u cisternových kotlů a zejména na vznik pórovitosti. V teoretické části je podán přehled konstrukčních typů železničních cisternových vozů, popsán výrobní proces se zaměřením na technologii svařování a uvedeny základní typy vad, které mohou při svařování vzniknout.

Experimentální část je zaměřena na ověření vlivu vstupních parametrů, zejména přípravy svarových ploch a stavu tavidla, na vznik pórovitosti v konkrétním typu tupého svarového spoje. Byly vyrobeny zkušební vzorky, které byly podrobeny tahovým zkouškám, metalografickým analýzám, pozorování pod optickým a elektronovým mikroskopem a liniovému měření tvrdosti.

Výsledky experimentu jsou následně vyhodnoceny z hlediska vlivu jednotlivých parametrů na úroveň pórovitosti a mechanickou pevnost svaru. Cílem práce je na základě analýzy výsledků navrhnout opatření pro snížení výskytu pórovitosti.

2 Železniční cisternová doprava

Železniční cisternová doprava je specifickým typem nákladní železniční dopravy, který se zaměřuje na přepravu kapalných látek, jako jsou ropné produkty, chemikálie nebo potraviny. Tato doprava využívá speciální železniční vozy, které jsou konstrukčně přizpůsobeny pro bezpečnou přepravu těchto látek.

Technologie železniční cisternové dopravy zahrnuje výhradně použití cisternových (kotlových) vozů a nádržkových kontejnerů. Kotlové vozy jsou speciálně navrženy pro přepravu kapalných látek a jsou vybaveny bezpečnostními prvky, jako jsou pojistné ventily a systémy pro detekci úniku. Nádržkové kontejnery jsou používány v kombinované dopravě, kde jsou překládány mezi železničními a silničními vozidly. [1]

Pro přepravu nebezpečných věcí po železnici byl schválen Řád pro mezinárodní přepravu nebezpečných věcí (RID – Regulation Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail). [2] Více informací o řádu RID je uvedeno v příloze A.1.

2.1 Cisternový (kotlový) vůz

Mezinárodní předpis RID popisuje cisternový (kotlový) vůz jako vůz sloužící k přepravě kapalin, plynů, práškových nebo zrnitých látek. Cisternový vůz sestává ze skříně, kterou tvoří nástavba zpravidla o jednom kotli a příslušné výstroji. Dále je jeho částí pojezd ostatní části výstroje (dvojkolí, vypružení, tažné a narážecí ústrojí, brzdy aj.). [3]

Podle charakteru přepravovaných látek se cisternové vozy dělí na tlakové a beztlakové. Tlakové cisternové vozy jsou konstruovány pro přepravu látek, které vyžadují udržování určitého tlaku, například LPG nebo chloru. Mají zesílenou konstrukci nádrže a speciální armatury, které zajišťují bezpečnost při přepravě. Naproti tomu beztlakové cisternové vozy jsou určeny pro kapaliny, které nevyžadují tlakové podmínky, jako jsou potraviny, nafta nebo některé chemikálie.

Výbava cisternových vozů se liší v závislosti na jejich účelu a přepravovaném materiálu. Některé vozy mají vnitřní ochranné nátěry nebo jsou vyrobeny z nerezové oceli či pogumované, pro přepravu specifických komodit, například potravin. Dále se odlišují typem vypouštěcích a napouštěcích ventilů, přičemž některé vozy jsou vybaveny i izolační vrstvou, která udržuje teplotu přepravované látky a usnadňuje její vykládku.

Bezpečnost při přepravě kapalných komodit je klíčovým aspektem konstrukce cisternových vozů. Vozy mohou být vybaveny bezpečnostními ventily (např. přetlakovými) nebo zesílenými plášti kotle. Moderní technologie umožňují sledování stavu vozu i trati, čímž se minimalizuje riziko havárií, zejména při přepravě nebezpečných materiálů. [4, 5] Více o cisternovém voze, například o historii je uvedeno v příloze A.2.



Obr. 1 Cisternový vůz produkce firmy Nymwag CS

2.2 Nádržkové kontejnery

Nádržkový kontejner (jinak také tank) je složen z rámové konstrukce a samotné tlakové nádoby. Rámová konstrukce, někdy nazývána jen rám má v každém rohu tzv. rohové prvky, někdy také rohové kostky. To jsou standardizované komponenty, které jsou součástí rámové konstrukce. Jsou navrženy, aby poskytovaly pevný bod pro usazení celého prvku na kontejnerový vůz a pro manipulaci s ním.

Rámová konstrukce je svařena z ocelových trubek různých průřezů, nebo z ocelových profilů a je navržena tak, aby byla stabilní a nedocházelo k výrazným deformacím.

Uvnitř rámové konstrukce se nachází samotná tlaková nádoba (nádržka) válcovitého tvaru. Horizontálně položená nádržka je pevně spojená s rámovou konstrukcí. Technické parametry nádržkových kontejnerů se liší podle výrobce.

Výhodou těchto kontejnerů je oproti klasickým cisternovým vozům snadná a efektivní manipulace a poskytují možnost krátkodobého skladování přepravovaných substrátů. [8]

3 Přehled konstrukčních typů

3.1 Nápis a značky na kotlových vozech

Podle Vyhlášky UIC 438-2 „Označení železničních nákladních vozů“, je označení nákladních vozů součástí systému registrace a certifikace. Tento systém značení používá řetězec čísel a písmen, který nejen identifikuje samotný vůz, ale také popisuje jeho přepravně-provozní a technické parametry, konstrukční detaily a určuje, zda je vůz určen pro národní nebo mezinárodní provoz.

Tato značení jsou na železničním nákladním voze umístěna v levé polovině nástavby, případně na zvláštní nápisové tabuli připevněné ve stejném místě. [9]

3.1.1 Řadové označení vozu

Písemné značení označující řadu daného nákladního vozu je kombinací dvou systémů značení. První, velké písmeno tzv. „základní řadové označení“ definuje druh a stavbu vozu. Zbýlá kombinace malých písmen, tzv. „vedlejší řadové označení“ doplňuje základní označení vozu a udává detailnější informace o konkrétních provozních vlastnostech vozu.

Vztahuje se např. ke konkrétnímu typu konstrukce, specifikace pro určité přepravované materiály, počtu náprav nebo dalších technických parametrů apod. [10]

Cisternové (kotlové) vozy jsou označovány prvním velkým písmenem „Z“. Další označení udává např. počet náprav, typu konstrukce nebo typ přepravované látky. [9]

Článekové vozy a vozové jednotky

Z **KOTLOVÝ VŮZ (CISTERNA)**
s kovovou nádrží, pro přepravu tekutých nebo plyných produktů, článekový vůz nebo vozová jednotka s nápravami, ze 2 částí

22 m ≤ ložná délka < 27 m

as podvozky
cs vykládáním tlakem¹⁾
es topným zařízením
fzpůsobilý pro přepravu tunelem a pro prámovou přepravu (trajekt) s Velkou Británií
ffzpůsobilý pouze pro přepravu tunelem s Velkou Británií
fffzpůsobilý pouze pro prámovou přepravu (trajekt) s Velkou Británií
gpro přepravu stlačených, zkapalněných a pod tlakem rozpuštěných plynů¹⁾
is nekovovou nádrží
jse zařízením na tlumení nárazů
mložná délka vozu (jednotky) ze 2 částí: ložná délka ≥ 27 m
mmložná délka vozu (jednotky) ze 2 částí: ložná délka < 22 m
oze 3 částí
ooze 4 nebo více částí
rčlánekový vůz
rrvozová jednotka

Obr. 2 Kódové označení vozů typu Z (kotlových vozů) dle UIC [9]

3.1.2 Nejvyšší přípustná hmotnost nákladu a rychlost vozu

Každý nákladní železniční vůz má stanovenou nejvyšší přípustnou hmotnost nákladu a maximální provozní rychlost, která závisí na konstrukci vozu, typu podvozku a technických parametrech.

Nejvyšší přípustná hmotnost nákladu

Nejvyšší přípustná hmotnost nákladu je udávána v tunách a závisí na traťové třídě, na které je daný vůz provozován. Traťové třídy jsou rozděleny do čtyř základních skupin A, B, C a D podle nejvyšší přípustné hmotnosti na nápravu (do tohoto výpočtu se zahrnuje i vlastní hmotnost vozu). Třídy A, B, C a D odpovídají maximálnímu zatížení 16, 18, 20 a 22,5 tuny na nápravu. Na každém voze se nachází tabulka s hodnotami maximální hmotnosti nákladu pro jednotlivé kategorie tratí a nejvyšší povolenou rychlost vozu. Kapacitu loženého vozu ovlivňuje také konstrukční uspořádání vozu, jako je typ dvojkolí nebo podvozků (čtyřnápravové vozy mají vyšší kapacitu než dvounápravové). [9]

Nejvyšší povolená rychlost

Nejvyšší povolená rychlost železničního vozu je dána jeho konstrukcí a technickými charakteristiky. Nákladní vozy podle nejvyšší povolené rychlosti rozděluje do dvou kategorií:

- S - rychlost do 100 km/h
- SS - rychlost do 120 km/h



Obr. 3 Technického značení ne cisternovém voze Zacns dle předpisů RID a TSI

3.1.3 Další důležité symboly

Vedle identifikace nákladního vozu nalezneme na povrchu skříně další důležité značky a symboly, které poskytují informace o provozně-technických parametrech dané řady vozu.

Z hlediska kotlového vozu může k nejdůležitějším patřit:

- **Ložný objem vozů s nádržemi**
Udává užitečný objem nádrže v litrech.
- **Vlastní hmotnost prázdného vozu**
Udává vlastní hmotnost vozu v kilogramech. Pokud je vůz vybaven ruční brzdou, je tento údaj v tabulce doplněn hodnotou brzdící hmotnosti v tunách.
- **Délka vozu přes nárazníky**
Udává celkovou délku vozu v metrech, včetně nestlačených nárazníků.
- **Vnitřní průměr nádrže kotlových vozů**
Udává hodnotu vnitřního průměru nádrže v milimetrech. Tato značka je umístěna na volném čele kotle.
- **Zkouška kotle**
Tento údaj vyjadřuje datum (měsíc a rok) budoucí zkoušky kotle. Vztahuje se k cisternovým vozům pro přepravu nebezpečného zboží podle RID. Tato značka je umístěna v tabulce vpravo na nádrži. [9]
- **Účinek ruční brzdy**
Účinek ruční brzdy je značka na železničním voze, která informuje o tom, jak velkou brzdící sílu ruční brzda vyvíjí a na kolik náprav působí. Brzdový účinek je udáván v kN a slouží k rychlému posouzení, zda je vůz při odstavení dostatečně zajištěn proti pohybu. [9]
- **Vozidlový obrys**
Vozidlový obrys je standardizovaný geometrický profil podle UIC a TSI WAG, ke kterému se vozidlo porovnává, aby se ověřilo, že nepřekračuje stanovené rozměry a může bezpečně jezdit po určité infrastruktuře. [10, 11]

Na boku každého železničního nákladního vozu je uvedeno mezinárodní číselné označení vozu pro rychlou identifikaci. Podrobnější popis tohoto kódu je uveden v příloze A.3.

3.2 Konstrukční provedení kotlového vozu

Cisternové železniční vozy se dají rozdělit podle několika hledisek, zejména podle konstrukce, druhu přepravovaného média nebo technických parametrů.

Jedním z hledisek rozdělení kotlových vozů jsou bezpodvozkové a vozy s podvozký. Koncepte bezpodvozkových vozů je již zastaralá. Vzhledem k tomu, že tyto vozy mají pouze dvě (některé typy tři) nápravy, je hmotnost vozu i nákladu rozložena na menší počet dvojkolí. To omezuje jejich celkovou i ložnou hmotnost. Protože se přepravuje menší hmotnost nákladu, postačuje menší objem cisterny, která je tedy kratší a má nižší kapacitu.

V současnosti na trhu převládá koncepce čtyřnápravových vozů, které jsou vybaveny dvěma dvounápravovými podvozky, nejčastěji typu Y25. Tyto vozy umožňují přepravu většího množství nákladu, což má vliv na nižší provozní náklady.

Mezi hlavní konstrukční prvky čtyřnápravových kotlových vozů patří pojezdy a skříň, která se skládá z nástavby a spodku vozu. Kapitola o pojezdech je uvedena v příloze A.4.

3.2.1 Spodek vozu

Konstrukce nástavby skříně nákladních vozů se přizpůsobuje druhu přepravovaného nákladu, zatímco spodní část skříně zůstává jednotná, s výjimkou specializovaných typů vozů, jako jsou výsypané nebo hlubinové. [13]

Kostry, nebo také rámy kotlových vozů zajišťují nosnou funkci pro náklad i všechny připojené části, jako jsou kotel, nárazníky, spráhla či pochozí plošiny. Přenášejí podélné síly vznikající během jízdy, a to jak tlakové, tak tahové. Zároveň rozkládají svislé zatížení do představek a následně do podvozků. V Evropě jejich konstrukce podléhá normám ČSN EN 12663-1 a ČSN EN 12663-2. Nejčastěji se vyrábějí svařováním z ocelových profilů. [14]

Konstrukční řešení rámu se dělí do tří skupin:

- Vnější rám
- Vnitřní páteřový rám s představky
- Představky bez hlavního rámu

Vnější rám

Cisternové vozy s vnějším rámem mají podélníky vedené po stranách vozu. Výškovou polohu kotle neurčuje umístění podélníků, ale konstrukce hlavních příčníků, které slouží k uložení na podvozek a jsou nejvíce zatíženy ve střední části s tornou. Tyto příčníky nelze upravovat pro snížení kotle. Nižší poloha kotle je dosažena jeho zalomením a vyspádováním ke středu, kde je umístěna výpust' pro snadnější vyprázdnění. [14]



Obr. 4 Cisternový vůz s vnějším rámem

Vnitřní páteřový rám s představky

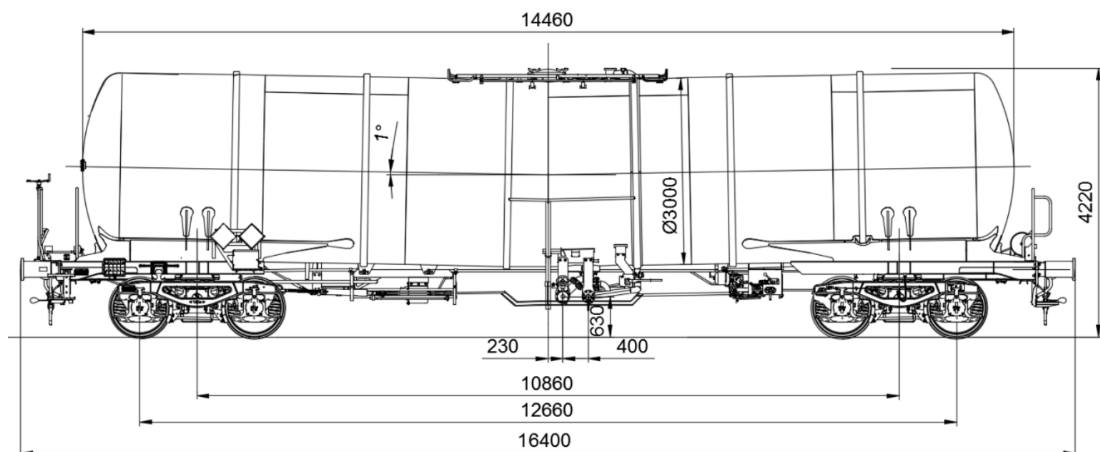
Vnitřní páteřový rám cisternového vozu sestává z dvou podélníků umístěných přímo ve středu šířky vozu, mezi kterými je mezera. Kotel je pak upevněn na tomto rámu např. pomocí sedel. [14]



Obr. 5 Cisternový vůz s vnitřním rámem

Představky bez hlavního rámu

Cisternové vozy bez hlavního rámu jsou vybaveny pouze představky umístěnými nad podvozky, čímž se snižuje jejich celková hmotnost. Chybějící rám však znamená, že veškeré tahové a tlakové síly jsou přenášeny přes tělo kotle. Při dimenzování je proto nutné zohlednit, že kotel musí přenášet podélné síly působící na celý vůz, což může vést k zesílení jeho stěn nebo doplnění obvodového žebrování, a tím i k mírnému zvýšení hmotnosti. [15]



Obr. 6 Náčres cisternového vozu bez hlavního rámu [16]

3.2.2 Kotel

Kotel cisternového železničního vozu představuje základní konstrukční prvek určený k přepravě kapalných nebo plyných látek. Tvarově se jedná nejčastěji o horizontálně uložený válcový plášť s vypouklými dny, jehož konstrukce musí odolávat vnitřnímu přetlaku, dynamickému namáhání během jízdy i účinkům přepravované látky. Spoje jednotlivých částí kotle, tvořené podélnými a obvodovými svary mezi luby (stočenými plechy), bývají vysoce namáhané a jejich kvalita je zásadní pro bezpečnost a těsnost celého systému. Podle normy EN 14025, musí být podélné svary jednotlivých lubů vůči sobě pootočený, aby se snížilo soustředění napětí v místě křížení. [17]

Z hlediska funkčnosti bývají kotle často navrhovány s tzv. prolomením. Jednotlivé poloviny válcové části kotle jsou vůči sobě svařeny pod mírným úhlem sklonu směrem ke středu vozu. Tento konstrukční prvek, obvykle v rozsahu 1° až 2° , usnadňuje gravitační vyprazdňování přepravovaného média a zajišťuje efektivnější provoz zejména při přepravě hustších kapalin nebo v zimních podmínkách. [18]

U některých vozů se navíc využívá konstrukce tzv. topného kotle, vybaveného vnějšími nebo vnitřními topnými hady. [19]

Vývoj konstrukcí prošel zásadní změnou ve 30. letech 20. století, kdy došlo k přechodu od nýtovaných spojů k tavnému obloukovému svařování. Tato inovace znamenala nejen odstranění nutnosti kovářského nebo ručního spojování, ale především významně zlepšila spolehlivost kotlů, snížila riziko úniků a přispěla k celkové standardizaci výroby.

Zásadním přínosem pro moderní konstrukci bylo také zlepšení kvality ocelí. Současné materiály umožňují vyšší lomovou houževnatost, lepší odolnost vůči korozi i lepší svařitelnost. Díky těmto vlastnostem je možné používat tenčí plechy pro výrobu kotlů, a přitom je zachována mechanická pevnost, což přispívá ke snížení hmotnosti a tím i k vyšší efektivitě přepravy. Přesto se při návrhu kotle musí zohlednit kompromis mezi bezpečností a provozní kapacitou. Zvyšování bezpečnostních prvků, jako jsou zesílené pláště, ochranné obruče nebo dodatečné výztuhy, totiž vede ke zvýšení hmotnosti vozu, a tím ke snížení ložné kapacity. Z ekonomického hlediska je tento přístup výhodný zejména při přepravě vysoce nebezpečných látek, u nichž lze vyšší náklady ospravedlnit nižším rizikem havárie. [20]

Svařování kotlů se v současnosti provádí především automatizovanými metodami jako SAW (svařování pod tavidlem) nebo MAG, a to buď v ochranné atmosféře, nebo s použitím aktivních plynů. Kritické spoje procházejí nedestruktivním testováním, především ultrazvukovou (UT) a radiografickou (RT) kontrolou. Významná pozornost je věnována jak vstupní přípravě materiálu, tak i následné kontrole geometrie, napětí a těsnosti, obvykle pomocí tlakových zkoušek. [21]

3.3 Provedení kotle dle druhu přepravované látky

Cisternové vozy se dělí nejen podle své konstrukce, objemu nebo technického vybavení, ale také podle druhu přepravované látky, která významně ovlivňuje požadavky na materiály, bezpečnostní prvky, tlakové zatížení a vnitřní úpravu kotle. Klíčovým předpisem, který stanovuje pravidla pro konstrukci a provoz těchto vozů, je RID. Tento předpis definuje třídy nebezpečnosti přepravovaných látek a s nimi spojené konstrukční kódy cisterny, které určují technické parametry cisterny, jako je tlaková odolnost, chemická ochrana a bezpečnostní vybavení.

Kód cisterny podle předpisu RID slouží k rychlé identifikaci konstrukčních a bezpečnostních vlastností vozu. Tento kód se skládá z několika částí, které mají přesně stanovený význam. Toto označení se vždy umísťuje do pravé poloviny kotle. Kód (např. L10CH) bývá často doplněn údaji o povoleném pracovním tlaku a datu platnosti tlakové zkoušky, jak je možné vidět na obr. 7. [3, 5]



Obr. 7 Příklady značení cisternových kotlů v souladu s předpisem RID

První písmeno „L“

Každý cisternový vůz určený pro přepravu nebezpečných kapalin a plynů podle předpisu RID je označen počátečním písmenem „L“, které standardně označuje cisternový vůz. Toto označení je jednotné a neměnné napříč všemi typy vozů určených k přepravě kapalin.

Kromě značení začínajícího písmenem „L“, které se vztahuje ke kapalinám, se lze v praxi setkat také se značením cisternových vozů počátečním písmenem „P“. Toto označení se používá pro tlakové cisterny určené k přepravě zkapalněných nebo stlačených plynů, které spadají do třídy 2 dle RID.

Číslo

Číslo, které následuje za písmenem L, vyjadřuje minimální konstrukční tlak (v barech), který musí kotel vozu bezpečně odolat. Tato hodnota přímo souvisí s fyzikálními vlastnostmi přepravované látky jako je např. těkavost, tlak par nebo teplota. Čím vyšší je tlaková odolnost, tím náročnější konstrukční řešení je potřeba.

- **1.5** 1,5 bar Méně rizikové kapaliny, nízký tlak
- **4** 4 bary Běžné nebezpečné kapaliny (ropné látky)
- **6** 6 barů Vyšší tlak, přeprava některých kyselin nebo chemikálií
- **10** 10 barů Chemikálie s vyššími nároky na bezpečnost a viskozitu
- **21** 21 barů Vysoce rizikové látky, např. zkapalněné plyny (LPG, amoniak)

Druhé písmeno

Toto písmeno označuje konstrukční a bezpečnostní úroveň cisterny. Čím „vyšší“ písmeno v abecedním pořadí, tím přísnější jsou požadavky na pevnost a bezpečnost. V praxi RID využívá pouze písmena B, C a D.

- **B** Základní úroveň konstrukce – kapaliny s nižšími nároky (ropné produkty)
- **C** Zesílená konstrukce – chemikálie a kapaliny pod tlakem
- **D** Vysoce odolná konstrukce – plynné látky pod vysokým tlakem (LPG)

Třetí písmeno „N“ nebo „H“

Toto písmeno se týká hlavně výběru materiálů a povrchových úprav kotle. Udává, zda cisterna vyžaduje vnitřní ochranu proti chemickému působení nebo nikoli. Využívá se tedy pouze dvou písmen N (Normal) a H (Hermetic). [3, 5]

- **N** Běžná konstrukce bez požadavků na speciální chemickou odolnost
- **H** Cisterna vybavena vnitřní ochranou proti agresivním chemikáliím

Současně vyráběné cisternové vozy předních evropských výrobců představují široké spektrum konstrukčních řešení a objemových variant přizpůsobených různým druhům přepravovaných kapalin. Přehled vybraných typů, jejich technických parametrů a oblastí použití je uveden v příloze A.5.

3.4 Popis výrobního procesu kotle

Výroba kotle cisternového vozu je technologicky náročný proces, jehož klíčovým prvkem je svařování. Postup zahrnuje přípravu materiálu, zakružování, jednotlivé etapy svařování, montáž příslušenství i finální kontroly kvality. Celý proces podléhá přísným technologickým i bezpečnostním předpisům a vše probíhá v souladu s výrobní dokumentací a svařovacího postupu WPS (Welding Procedure Specification).

Příprava materiálu

Na začátku se plechové tabule určené pro výrobu lubů kotle vypálí do přesných tvarů podle výkresové dokumentace. Následně probíhá mechanické očištění hran od okují, mastnoty a jiných nečistot, čímž se připravují pro kvalitní svařování. V případě potřeby se hrany úkosují, aby bylo možné vytvořit kořenovou mezeru dle specifikace svařovacího postupu (WPS). Lubové plechy, které se nacházejí na krajích polovin kotle, mohou specifickou geometrii z důvodu tzv. prolomení konstrukce, jež umožňuje lepší gravitační vyprazdňování kotle. [22]

Zakružování lubových plechů

Před samotným svařováním je nutné zkružit lubové plechy na požadovaný průměr. Zakružování probíhá na tříválcové zakružovačce, kde se pomocí šablon a přípravků průběžně kontroluje vnitřní i vnější rádius. Po zakružení plechů se provádí kalibrace, která slouží ke kontrole a případné korekci tvaru. Cílem je dosáhnout požadované geometrie bez tzv. stříškovitosti, tedy deformace, při níž nejsou konce plechu v jedné ose a vytvářejí nežádoucí úhel (připomínající špičku střechy). Tento nedostatek vzniká vlivem nerovnoměrného zakružení a mohl by negativně ovlivnit kvalitu a přesnost následného podélného svaru. Kalibrace proto zajišťuje, že oba konce lubového plechu budou přesně zarovnané a připravené ke svaření v odpovídající pozici. [22]



Obr. 8 Výrobní linka společnosti Nymwag CS na přípravu lubů

Svařování podélných svarů

Lubové plechy se následně upnou do přípravku, kde se provádí svařování podélných svarů metodou SAW (svařování pod tavidlem). Vnitřní svar se obvykle provádí jako první, poté následuje vnější svar. Před svařením se kontroluje čistota spáry a správné rozložení tavidla. Po svaření se odstraní tavidlo a provede se vizuální kontrola svaru. [22]

Spojení dna a lubu

Dna se spojují s luby v přípravku, který zajišťuje přesné vystředění. To je možné vidět na obr. 9. Spojované plochy se pečlivě očistí a následně se provedou stehovací svary z vnější strany. Následně se provádí svar z obou stran pro zajištění těsnosti a pevnosti spoje. [22]



Obr. 9 Spojení dna s lubem v přípravku, pracoviště společnosti Nymwag CS

Spojení jednotlivých lubů

Spojení jednotlivých lubů se provádí pomocí rozpěrných šroubů a šablon. Důležitá je kontrola vzdálenosti podélných svarů sousedních lubů, aby nedošlo k jejich překřížení (tzv. křížovému svaru), které by mohlo vést k lokálnímu oslabení konstrukce. Spoje jsou zajištěny stehovacími svary a následně svařeny. [22]

Svařování obvodových svarů a spojení polovin kotle

Poloviny kotle se umístí do polohovadel, kde se provádí svařování obvodových svarů. Nejprve se provede vnitřní svar, poté vnější, a to metodou SAW, která zajišťuje vysokou kvalitu a hloubku provaření. Po dokončení svarů následuje jejich kontrola, případné opravy a broušení. Následně jsou obě poloviny kotle spojeny v přípravku. Pomocí hydraulického pístu a vymežovacích tyčí se vyrovnají a ustaví do přesné polohy. Po zajištění správné polohy se provede závěrečný svar podle WPS. [22]

Finální úpravy a dokončení

Po svaření se svarové spoje očistí od zbytků tavidla a povrch se připravuje na další operace. Vypalují se otvory pro průlezy, příruby, ventily a montují se výztuhy, T-profilů a sedla. Všechny montážní operace jsou prováděny dle výkresové dokumentace s použitím přesných šablon. [22]

Přípevnění obručí a příslušenství

Obruče se ustavují pomocí napínáků a šablon a svařují se metodou MAG (135). Jejich poloha musí odpovídat přesně výkresům. Následně se montují kalníky, příruby, víka a další příslušenství kotle, jak je patrné z Obr. 10. [22]



Obr. 10 Montáž přírub, průlezu a dalšího příslušenství

Kontrola kvality a testování

Závěrečným krokem celého procesu je komplexní kontrola kvality, která zahrnuje:

- Vizuální kontrolu svarů zaměřenou na detekci povrchových vad
- Ultrazvukovou a radiografickou kontrolu (NDT) pro ověření vnitřní integrity svarových spojů
- Kontrolu rozměrů a ovality, důležitou pro dodržení přesných geometrických parametrů
- Tlakovou zkoušku kotle dle normy EN 14025, která ověřuje jeho těsnost a odolnost proti provoznímu zatížení

Po splnění všech požadavků a úspěšném provedení zkoušek je kotel připraven k dalším technologickým operacím, jako je lakování nebo montáž příslušenství. Celý proces probíhá v souladu s výkresovou dokumentací a příslušnými technickými normami, přičemž se přihlíží ke specifikům jednotlivých konstrukčních řešení. [22]



Obr. 11 Kompletní kotel po výstupní kontrole a tlakové zkoušce

Povrchové úpravy a finální kompletace kotle

Po úspěšném provedení všech kontrolních a zkušebních operací následuje závěrečná fáze výroby cisternového kotle, která zahrnuje povrchové úpravy, montáž příslušenství a aplikaci nápisů a značení. Tyto operace zajišťují nejen požadovanou funkčnost, ale i odpovídající vzhled a splnění legislativních požadavků pro provoz vozidla.

Nejprve je vnější i vnitřní povrch kotle mechanicky očištěn metodou tryskání, která zajišťuje odstranění okují, nečistot a zbytků tavidla. Cílem je dosažení dostatečné povrchové drsnosti pro optimální přilnavost nátěrové hmoty.

Na očištěný povrch se následně nanáší nátěr, který obvykle tvoří základní antikoroziční nátěr a jedna nebo více vrstev vrchního laku. Barva a typ použitého nátěru odpovídají požadavkům zákazníka nebo normám dopravce.

Po provedení nátěru následuje montáž technického a bezpečnostního příslušenství, jako jsou příruby, průlezy, víka, ventily, schůdky, plošiny, madla nebo topné hady. Montáž probíhá dle výkresové dokumentace, často za použití přesných montážních šablon, které zajišťují správné umístění jednotlivých komponent.

Závěrečnou operací je aplikace provozních a bezpečnostních nápisů a značení. Na povrch vozu se nanášejí nebo lepí údaje o typu vozu, jeho číslo, hmotnostní a objemové hodnoty, provozní tlak, datum tlakové zkoušky a další provozní parametry. V případě přepravy nebezpečných látek se přidávají piktogramy, výstražné značky a značení dle RID. Popisy mohou být provedeny šablonovým nátěrem nebo průmyslovými samolepicími štítky odolnými vůči UV záření, chemikáliím a povětrnostním vlivům.

Po těchto operacích je kotel považován za kompletně připravený pro uvedení do provozu nebo další sestavení s rámem, podvozkem a výstrojí. [22]

4 Svařování kotle cisternového vozu

Svařování hraje zásadní roli v konstrukci tlakových nádob, jako je kotel cisternového vozu. Nachází široké uplatnění při výrobě ocelových konstrukcí, tlakových zařízení a dopravních prostředků, kde je kladen důraz na vysokou pevnost, těsnost a spolehlivost spojů. Výběr svařovací metody, nastavení parametrů a volba vhodné technologie má přímý vliv na výsledné mechanické vlastnosti svaru i celého svařovaného celku.

Konečné vlastnosti svarového spoje jsou dále ovlivněny kvalitou základního materiálu, přípravou svařovaných ploch, polohou svaru a v také správným řízením tepelného cyklu, který ovlivňuje mikrostrukturu nejen samotného svarového kovu, ale i přilehlé tepelně ovlivněné oblasti. Důležitou roli hraje rovněž kontrola kvality během i po svařování, která zajišťuje požadovanou úroveň bezpečnosti a životnosti konstrukce. [28]

Podle mezinárodní normy ČSN EN ISO 4063 se metody svařování číslují a systematicky rozdělují. V případě výroby kotle cisternového vozu jsou využívány především metody tavného svařování, konkrétně:

- SAW (121) – obloukové svařování pod tavidlem
- MAG (135) – obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
- WIG (141) – svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu [28]

Svařování jednotlivých konstrukčních celků probíhá podle schváleného postupu WPS (Welding Procedure Specification), který je vypracován na základě kvalifikovaného postupu WPQR (Welding Procedure Qualification Record). Podrobnější informace k použitým dokumentům a svařovacím parametrům jsou uvedeny v příloze B.1.

4.1 Používané metody svařování

Při výrobě kotle cisternového vozu jsou využívány převážně metody tavného svařování, u kterých je spoj vytvořen natavením základního a přídavného materiálu. Konkrétní metoda je volena podle požadavků na mechanické vlastnosti spoje, přístupnost svarového místa a efektivitu výrobního procesu. Nejčastěji se používají metody MAG (135), WIG (141) a SAW (121), z nichž každá má v konstrukci kotle své specifické využití. [28] Při svařování se uplatňují pracovní polohy, jejichž přehled je uveden v příloze B.2.

4.1.1 MAG – svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu (135)

MAG (Metal Active Gas) je metoda obloukového svařování tavící se elektrodou, při které hoří elektrický oblouk mezi kontinuálně podávanou elektrodou v podobě drátu a základním materiálem. Tavná lázeň je chráněna aktivní atmosférou, tvořenou nejčastěji oxidem uhličitým (CO₂) nebo jeho směsí s argonem (Ar + CO₂).

Použitá atmosféra nejen chrání svarovou lázeň před přístupem okolního vzduchu, ale zároveň ovlivňuje její metalurgické vlastnosti, jako je stabilita oblouku, hloubka průvaru, tvar svarové housenky a množství rozstříku. Díky tomu je MAG vhodný pro konstrukční a výrobní aplikace, kde je potřeba rychlé a účinné spojování ocelových materiálů.

Jako elektroda slouží plný nebo plněný drát, který je veden z cívky a automaticky podáván do hořáku. Drát zároveň představuje přídatný materiál. Svařovací oblouk má teplotu až 2500 °C, přičemž samotná tavná lázeň dosahuje teplot kolem 1600 až 2100 °C, což umožňuje spolehlivé natavení u běžně používaných svařitelných konstrukčních ocelí.

Metoda MAG je díky své univerzálnosti, vysoké produktivitě a možnosti robotizace velmi vhodná pro nízkolegované a nelegované uhlíkové oceli. V konstrukci cisternových kotlů se tato technologie využívá zejména při dílčích montážních operacích, kde není možné nebo výhodné nasazení automatizovaných metod, jako je SAW. Typickými příklady jsou přivařování výztuh a přírub nebo stehování.

Významnou výhodou MAG je vysoká rychlost svařování, která může dosahovat až 150 cm/min, nízký rozstřík, a také dobrá přizpůsobivost různým svařovacím polohám, včetně koutových nebo poloh nad hlavou. Metoda je navíc dobře kontrolovatelná a vhodná pro nasazení mechanizace, což umožňuje efektivní využití v sériové i kusové výrobě.

Díky těmto přednostem patří MAG k nejrozšířenějším metodám tavného svařování v oblasti strojírenství, výroby tlakových zařízení, ocelových konstrukcí i dopravní techniky. V kombinaci s vhodnou přípravou svarových hran a kontrolou procesu lze pomocí MAG dosáhnout svarů s dobrými mechanickými vlastnostmi a vysokou provozní spolehlivostí, což je klíčové i pro aplikace v železničním průmyslu. [28]

4.1.2 WIG – svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (141)

Metoda WIG (Wolfram Inert Gas) je proces obloukového svařování, při kterém hoří elektrický oblouk mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Svarová lázeň je chráněna inertním plynem, nejčastěji argonem, případně směsí argonu a helia. Plyny musí být vysoce čisté, s minimální čistotou 99,995 %, aby se zabránilo kontaminaci svaru a zajistila se stabilita oblouku.

Na rozdíl od metody MAG se elektroda při WIG svařování netaví. Přídatný materiál se přivádí zvlášť, buď ručně, nebo automaticky pomocí podavače s proměnnou rychlostí podávání. Tento způsob umožňuje velmi přesné řízení tavné lázně, což přispívá k vysoké kvalitě a estetice výsledného svaru. Oblouk je stabilní, svar je bez strusky a rozstříku, a jeho geometrie je snadno ovladatelná, což je výhodné zejména u polohových svarů.

Metoda WIG velmi vhodná pro svařování tenkostěnných dílců, opravné svařování, kde je nutná vysoká přesnost a minimální tepelný příkon nebo pro materiály s vysokou afinitou

ke kyslíku. Mezi ty patří například titan, zirkon nebo hliník, které by byly při jiných metodách náchylné k oxidaci.

Z hlediska elektrického zapojení se metoda WIG dělí na dva hlavní režimy:

- **Stejnoseměrné svařování s přímou polaritou**

Stejnoseměrné svařování s přímou polaritou (elektroda na záporném pólu) se využívá se pro většinu ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin. Tento režim zajišťuje hluboký závar, protože přibližně dvě třetiny tepla jsou přenášeny do základního materiálu. Elektroda se zároveň méně zahřívá, čímž se prodlužuje její životnost.

- **Střídavé svařování**

Využívá se pro hliník, hořčík a jejich slitiny, které jsou pokryty tvrdou vrstvou oxidů. Při kladné polaritě elektrody vzniká tzv. čisticí efekt, kdy ionty působí mechanicky na oxidační vrstvu a stahují ji z povrchu svaru. Tento režim je nepostradatelný pro spolehlivé svařování těchto materiálů, protože oxidy by jinak bránily vzniku kvalitního metalurgického spoje.

Metoda WIG je rovněž dostupná v impulsním režimu, kdy se svařovací proud střídá mezi základním a impulsním proudem. Tento režim je výhodný pro svařování tenkých materiálů, náchylných slitin a při polohovém svařování, protože umožňuje lepší kontrolu vneseného tepla, tvaru svarové lázně i výsledné struktury svarového kovu.

Díky své univerzálnosti a kvalitě je metoda WIG běžně používána v energetice, chemickém a farmaceutickém průmyslu, výrobě tlakových nádob i v oblasti oprav a renovací. Její využití při stavbě a opravách cisternových kotlů je opodstatněné tam, kde je požadována maximální těsnost, přesnost a spolehlivost spojů, typicky při opravě vad. [28]

4.1.3 SAW – svařování pod tavidlem (121)

Princip metody

Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem SAW (Submerged Arc Welding) je plně mechanizovaný nebo automatizovaný proces, při kterém elektrický oblouk hoří mezi nepřetržitě podávaným tavicím drátem a základním materiálem. Oblouk a celá svarová lázeň jsou zakryty vrstvou granulovaného tavidla. Tavidlo nejen chrání roztavený kov před vzdušným kyslíkem a dusíkem, ale zároveň ovlivňuje průběh metalurgických reakcí ve svarovém kovu. Tavidlo se během procesu částečně natavuje a vytváří strusku, která je po vychladnutí mechanicky odstraněna [28].

Používaný svařovací drát má obvykle průměr 2 až 5 mm a slouží zároveň jako přídavný materiál. Jako zdroj se používá střídavý nebo stejnosměrný proud s vysokými proudovými hodnotami, běžně od 100 do 2000 A a napětím mezi 20 a 60 V. Zapojení DCSP (elektroda na záporném pólu) bývá preferováno pro dosažení hlubokého průvaru a stabilního oblouku [28], [30].

Technologický průběh

Proces SAW začíná přípravou svarových hran, které musí být opracovány, očištěny a ustaveny. Materiál je upevněn do polohovadel a mezi svařovanými díly je důležité dodržet svarovou mezeru dle WPS. Místo, kde bude proveden svar je zasypáno tavidlem. Po zapálení oblouku dochází k roztavení základního kovu, přídavného drátu i části tavidla. Tavná lázeň je zcela překryta, čímž se zamezí oxidaci a vzniká tzv. kaverna. To je oblast hoření oblouku. Během svařování jsou drát i tavidlo plynule dodávány. Po ukončení svaru se struska nechá ztuhnout a poté se mechanicky odstraní. Konečná kontrola svaru zahrnuje vizuální zkoušku, ultrazvukové nebo radiografické testy [28].

Přídavné materiály

Při svařování metodou SAW se používají různé typy přídavných materiálů v závislosti na konkrétní aplikaci, druhu základního materiálu a požadovaných vlastnostech svaru. Mezi nejčastější patří:

- **Plné dráty**

Základní a nejběžněji používaný přídavný materiál tvoří nelegované nebo nízkolegované ocelové dráty dle normy ČSN EN 756. Jsou určeny pro svařování konstrukčních a jemnozrnných ocelí. Mají obvykle průměr v rozmezí 2 až 5 mm. Pro zajištění dobrého elektrického kontaktu a ochranu před oxidací bývají tyto dráty často potaženy tenkou vrstvou mědi, která zároveň snižuje opotřebení podávacích komponent a zlepšuje stabilitu elektrického oblouku.

- **Páskové elektrody**

Pro specifické účely, jako je navařování funkčních vrstev nebo tvrdonávary, se používají páskové elektrody dle normy ČSN EN 12072, běžně v rozměru např. 0,5 × 60 mm. Tyto elektrody umožňují nanášet materiál s požadovaným chemickým složením v širším profilu a s vyšší efektivitou. Jejich výhodou je větší plocha kontaktu a kontrolovanější přenos tepla do svarové lázně.

- **Plněné elektrody a pásy**

Další alternativou jsou plněné elektrody podle normy ČSN EN 12073 nebo plněné pásy (např. 2–3 × 40 mm). Tyto materiály umožňují přesné cílené legování svarového kovu, což je důležité především při navařování povrchů vystavených opotřebení, korozi nebo jinému agresivnímu namáhání. [28], [32]

Tavidla

Tavidlo je zásadní složkou metody SAW, která plní nejen ochrannou funkci, ale zároveň významně ovlivňuje metalurgii svarové lázně, stabilitu oblouku, vzhled svaru i jeho výsledné vlastnosti. Správná volba typu tavidla je proto klíčová pro dosažení požadované kvality a mechanických parametrů spoje.

Z hlediska technologie výroby se tavidla rozdělují do tří skupin:

- **Tavená tavidla**

Ta se vyrábějí tavením ve speciálních elektrických pecích a následným drcením na požadovanou granulaci. Tato tavidla vynikají vysokou vlhkostní stabilitou, což je výhodné z hlediska skladování a manipulace. Používají se především pro svařování nelegovaných ocelí a v méně náročných aplikacích.

- **Aglomerovaná tavidla**

Aglomerovaná (keramická) tavidla, se vyrábějí lisováním práškových složek spojených anorganickými pojivy (např. vodním sklem). Jejich předností je možnost přesně upravit chemické složení podle požadavků svarového kovu. Bazická aglomerovaná tavidla poskytují vysokou houževnatost a umožňují účinné odsiřování a deoxidaci, což zlepšuje odolnost svaru v namáhaných konstrukcích. Naopak kyselá tavidla mají nižší metalurgickou aktivitu. Využívají se spíše u běžných konstrukcí, kde nejsou kladeny zvýšené nároky na houževnatost svaru.

- **Sintrovaná tavidla**

Tato tavidla se vyrábějí spékáním práškových komponent pod tlakem. Jejich hlavní výhodou je vysoká schopnost odstraňování strusky, což je cenné při svařování v úzkých spárách nebo u vícevrstevných svarů. Využívají se zejména v náročných podmínkách, např. v chemickém průmyslu, energetice nebo při svařování tlustostěnných komponent, kde je kladen důraz na čistotu svarové lázně a dobrou odstranitelnost strusky. [28, 31]

Výhody metody SAW

Svařování pod tavidlem nabízí velmi vysokou produktivitu a oproti jiným metodám má velmi nízký vliv na chybu lidského faktoru. Dále má metoda výborný poměr mezi rychlostí svařování a kvalitou výsledného spoje. Svar je homogenní, bez rozstříku, s vysokou pevností a dobrými mechanickými vlastnostmi. Významnou výhodou je také schopnost automatizace, která zajišťuje opakovatelnost, stabilitu procesu a vysokou kvalitu. Díky těmto vlastnostem je SAW hojně využíváno například při výrobě mostních konstrukcí, tlakových nádob, lodních trupů: Při výrobě kotlů železničních vozů je tato metoda výhodná zejména pro podélné a obvodové svary lubů. [28, 30, 33]

Nevýhody a omezení

Navzdory mnoha výhodám má metoda SAW i svá omezení. Vzhledem k nutnosti souvislé vrstvy tavidla je proces prakticky omezen pouze na vodorovné nebo mírně šikmé polohy. Metoda není vhodná pro tenké materiály, protože vysoké tepelné zatížení může způsobit propaly nebo deformace. Dále je nutné po svařování mechanicky odstranit strusku, což prodlužuje časovou náročnost výroby. Proces je rovněž citlivý na správné nastavení parametrů. Chybná kombinace proudu, napětí nebo rychlosti posuvu může vést ke vzniku vnitřních vad, jako jsou trhliny nebo vměstky. [30, 33]

4.2 Druhy svarových spojů a jejich použití

Druhy svarů se rozlišují zejména na základě vzájemné polohy spojovaných dílů a podle tvaru a úpravy svarových ploch. Tyto typy svarů jsou normalizovány a jejich výběr je uveden např. ve strojnických tabulkách, které se v praxi běžně využívají při návrhu a výrobě svařovaných konstrukcí. Při výrobě kotle železničního vozu jsou nejčastěji používány svary tupé a koutové.

Tupý svar

Tupý svar vzniká natavením stykových ploch dvou spojovaných součástí, které jsou umístěny v jedné rovině. Tento typ spoje je nejčastější u tlakových nádob a kotlů, kde je požadována vysoká pevnost a těsnost.

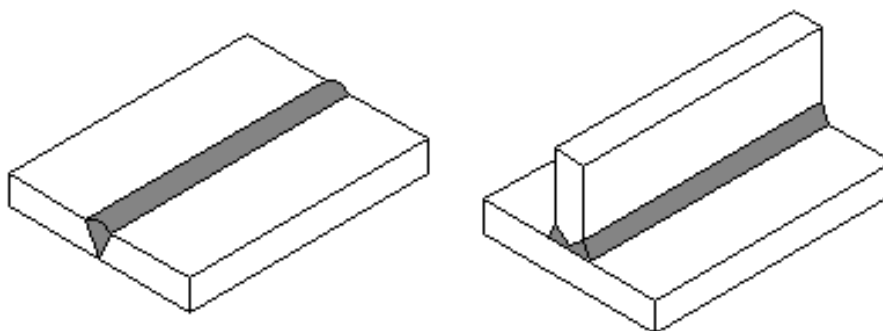
Při svařování se nejprve vytvoří kořen svaru, na který se postupně kladou další housenky až do vyplnění celé spáry. Výsledný svarový kov je tvořen převážně přídavným materiálem, který se smísí se základním kovem a vytvoří tzv. závar. Hloubka závaru ovlivňuje pevnost spoje a závisí na množství vneseného tepla.

Koutový svar

Koutové svary jsou velmi rozšířeným typem svarových spojů. Vznikají v místě, kde se dva materiály setkávají nejčastěji ve tvaru „L“ nebo „T“.

Koutové svary se provádějí na styčných nebo překrývajících se plochách, aniž by bylo nutné jejich složité úkosování, jako je tomu u některých tupých svarů. To je činí technologicky jednoduššími a méně náročnými na přípravu. Výhodou je tedy nižší časová i materiálová náročnost výroby. Naopak nevýhodou může být zhoršený přístup ke kořeni svaru, který bývá často obtížně dostupný pro svařovací hořák nebo elektrody, což zvyšuje riziko neprovaření nebo tvorby vnitřních vad.

Napětí v koutových svarech je obvykle méně rovnoměrně rozloženo než u svarů tupých, proto je důležité správné dimenzování, vhodná poloha a kvalitní provedení, zejména v kořenu svaru. [34, 36]



Obr. 12 Tupý svar (vlevo) a koutový svar (vpravo) [37]

5 Vady

Vady svarových spojů představují kritická místa z hlediska pevnosti a spolehlivosti konstrukce, protože se chovají jako koncentrátory napětí. Výrazně snižují únavovou životnost materiálu a v některých případech mohou být i iniciátorem křehkého lomu. Za vadu výrobku se považuje každá odchylka od požadovaných vlastností předepsaných technickými normami, výrobními podmínkami nebo smluvním vzorkem.

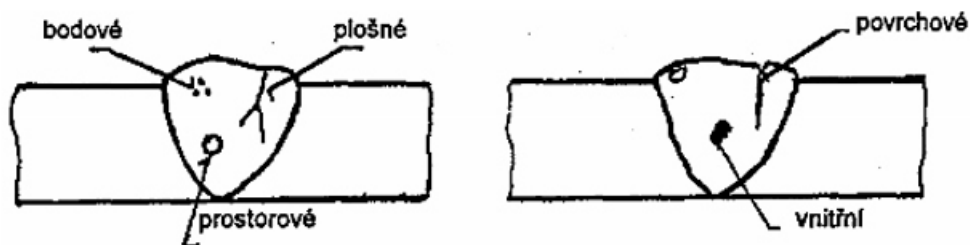
Vady mohou být zjevné nebo skryté. Zjevné vady jsou odhalitelné vizuální kontrolou a skryté jsou detekovatelné pouze pomocí nedestruktivních metod nebo laboratorních zkoušek. Podle jejich přípustnosti rozlišujeme vady přípustné, nepřípustné, opravitelné a neopravitelné. Do provozu mohou být uvolněny pouze takové svary, u nichž prokazatelně nehrozí ohrožení bezpečnosti při známém provozním zatížení.

Druhy vad podle tvaru a objemu

Vady ve svarech se klasifikují podle normy ČSN ISO 6520 do tří hlavních skupin:

- Bodové vady (mikropóry, sférické vměstky)
- Plošné vady (trhliny, neprůvary, studené spoje)
- Objemové vady (plynové dutiny, vměstky, staženiny, nepravidelný povrch svaru)

Z hlediska umístění se vady dělí na povrchové (trhliny, póry, zápaly) a vnitřní (plynové dutiny, vměstky, bubliny, staženiny). Schéma druhů vad je zobrazen na obr. 13.



Obr. 13 Rozdělení vad ve svaru podle tvaru (vlevo) a podle umístění (vpravo) [38]

Pórovitost – póry a bubliny ve svaru

Jednou z nejčastějších vad v oblasti objemových defektů je pórovitost, tedy výskyt pórů a bublin, které vznikají uzavřením plynu ve svarovém kovu. Jde o vady kulového nebo oválného tvaru, které se mohou nacházet na povrchu i uvnitř svaru. Typický příklad výskytu pórovitosti ve svarovém kovu je znázorněn na obr. 14, kde jsou patrné četné póry vzniklé v důsledku technologických nedostatků.

Příčiny vzniku pórovitosti:

- Vlhkost v elektrodách nebo ochranném plynu
- Nečistoty nebo mastnoty na svarových hranách
- Příliš dlouhý oblouk
- Nedostatečný přísun ochranného plynu
- Vysoká rychlost svařování
- Nízký svařovací proud, vedoucí k rychlému tuhnutí svarové lázně



Obr. 14 Svar s výraznou pórovitostí [39]

Pórovitost zhoršuje mechanické vlastnosti spoje, zejména pevnost v tahu, vrubovou houževnatost a odolnost proti únavě. U zatížených konstrukcí může být tato vada kritická, zejména pokud je lokalizována v kořenové oblasti svaru, nebo pokud je výskyt pórů četný a seskupený. [38]

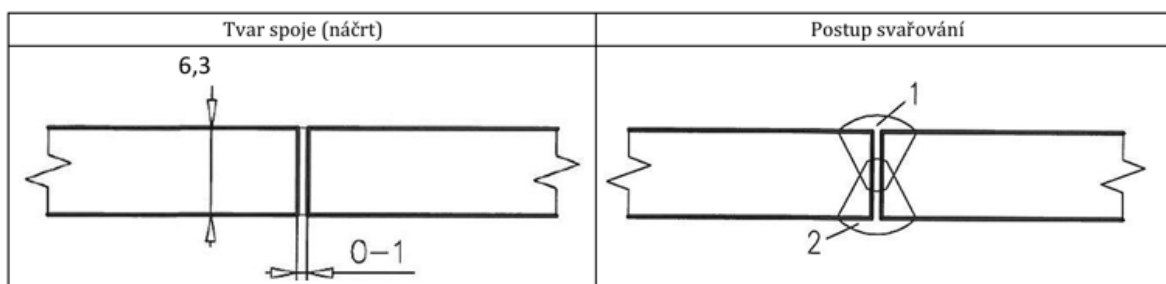
6 Návrh experimentu

Experimentální část bakalářské práce byla zaměřena na analýzy vlivu pórovitosti u konkrétního typu svaru běžně používaného v praxi. Ve spolupráci se společností Nymwag CS byly připraveny tahové vzorky obsahující svarové spoje. Tyto spoje byly vytvořeny s různými vstupními parametry, jejichž specifikace je podrobněji představena v následující části.

6.1 Konkrétní svarový spoj

Experiment byl zaměřen na posouzení kvality tupého svarového spoje provedeného metodou svařování pod tavidlem (SAW), který je běžný při spojování jednotlivých dílů tlakových nádob (kotlů) železničních cisternových vozů. Svařovaným materiálem byla konstrukční tlaková ocel P355N s minimální mezí kluzu 355 MPa, pevností v tahu 490 – 630 MPa, tažností minimálně 22 % a tloušťkou plechu 6,3 mm. Tento typ spoje je klíčový z hlediska těsnosti, mechanické pevnosti a spolehlivosti.

Na obr. 15 je znázorněn tvar spoje a průběh svařování. Levá část obrázku představuje výchozí tvar spoje s mezerou 0–1 mm a tloušťkou plechu 6,3 mm. Pravá část ukazuje uspořádání svarových vrstev, (1) kořenová vrstva a (2) krycí vrstva.



Obr. 15 Tvar a postup svařování tupého svarového spoje.

Spoj byl zhotoven v souladu se schválenou specifikací WPS. Použitá byla metoda 121 (SAW) v poloze PA, s přídatným drátem o průměru 3 mm. Svařovací proud se pohyboval v rozsahu 420–500 A, napětí mezi 32–36 V a rychlost svařování činila 50 cm/min. V obou vrstvách byl použit stejnosměrný proud s pozitivní polaritou (DC+). Tyto parametry byly voleny s ohledem na tloušťku materiálu, zajištění dostatečného průvaru a kvality svarového kovu.

6.2 Cíl experimentu

Cílem experimentu bylo ověřit vliv různých technologických parametrů svařování pod tavidlem na vznik pórovitosti v obvodových a podélných svarech tlakových nádob železničních cisternových vozů. Současně je cílem posoudit míru vlivu těchto vad na statickou pevnost svarových spojů, které mají vliv celkovou provozní spolehlivost tlakových nádob.

6.2.1 Identifikace pórovitosti ve svarovém kovu

Ve stávající výrobní praxi se opakovaně vyskytuje problém výskytu pórů ve svarovém kovu, který může vznikat zejména v důsledku technologických odchylek. Mezi nejčastější příčiny může patřit nedostatečná příprava svarových ploch, přítomnost vlhkosti na materiálu nebo v tavidle, případně použití nesprávně skladovaného nebo znečištěného tavidla. Póry ve svaru snižují jeho celkovou pevnost a mohou ohrozit bezpečný provoz tlakové nádoby. Z tohoto důvodu je nutné analyzovat jejich vznik a závislost na konkrétních parametrech svařovacího procesu. Experiment byl navržen tak, aby pomohl odhalit a kvantifikovat příčiny výskytu těchto vad a zároveň poskytl návrhy na optimalizaci výrobního procesu.

6.2.2 Plán experimentu

Po konzultaci problematiky a návrhu experimentu bylo potřeba v první fázi zajistit návrh zkušebních vzorků pro tahové zkoušky. Poté byly vzorky rozděleny do několika skupin podle kombinace technologických podmínek, aby každý faktor, jako je stav plechu nebo stav tavidla, byl testován samostatně i ve vzájemných kombinacích. Testované varianty jsou uvedeny v následujícím přehledu v tabulce 1.

Tabulka 1 Přehled zkoušených zkušebních skupin dle stavu plechu a tavidla

Skupina	Označení	Stav plechu	Stav tavidla	Typ tavidla
A	A1	Neobroušený	Sušené	VÚZ
	A2	Obroušený	Sušené	VÚZ
B	B1	Neobroušený	Nesušené	VÚZ
	B2	Obroušený	Nesušené	VÚZ
C	C1	Neobroušený	Použité, znečištěné	VÚZ

Pro každou kombinaci bylo zhotoveno 6 zkušebních vzorků. Celkově tak bylo připraveno 30 vzorků, které slouží jako statistický základ pro hodnocení vlivu jednotlivých proměnných.

6.2.3 Výroba vzorků

Experimentální část práce byla realizována na sérii zkušebních vzorků, jejichž výroba probíhala ve více fázích s důrazem na dodržení technologické kázně, opakovatelnosti podmínek a přesného značení.

Výchozí materiál a výpalky

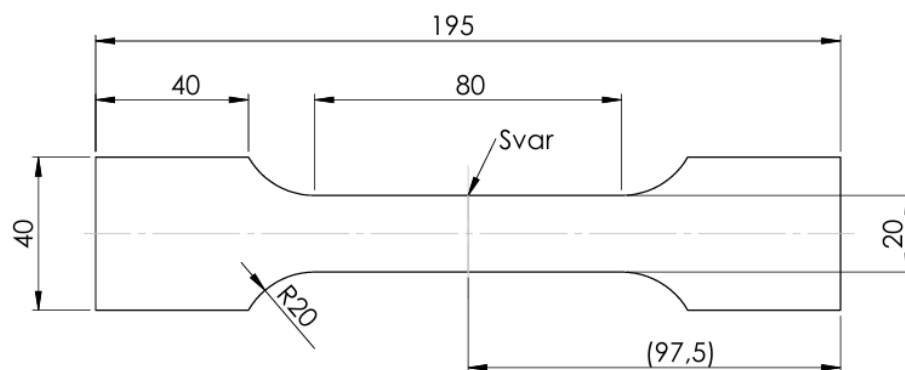
Jako výchozí materiál byla zvolena již zmiňovaná ocel P355N o tloušťce 6,3 mm, běžně používaná při výrobě tlakových nádob železničních cisternových vozů. Polotovary vzorků byly vypáleny podle výkresové dokumentace na CNC pálicím stroji. Geometrie byla zvolena tak, aby odpovídala požadavkům na následné provedení obvodových svarů a rozdělení na vzorky pro pozdější zkoušky.

Svařování vzorků

Po vypálení byly jednotlivé kusy svařeny metodou svařování pod tavidlem (SAW) za různých technologických podmínek. Experiment zahrnoval několik proměnných, jako stav tavidla (sušené / nesušené / použité) a přípravu povrchu (obroušené / neobroušené stykové plochy plechů). Vše byl následně svařeno za shodných podmínek svařovacím automatem, kde je nižší riziko na vliv chyby lidského faktoru.

Výroba jednotlivých vzorků

Po provedení svarů byly vzorky rozděleny na polotovary pomocí pásové pily a označeny číslem vyraženým raznicí. Značení mělo podobu třímístného číselného kódu. Číselné značení zajišťovalo jednoznačnou identifikaci během celé fáze zkoušení (viz převodní tabulka). Tyto polotovary byly následně ofrézovány dle výkresu pro tahové zkoušky a důraz byl také kladen na lehké sražení hran, aby tím nebyla ovlivněna pevnost v oblasti svaru.

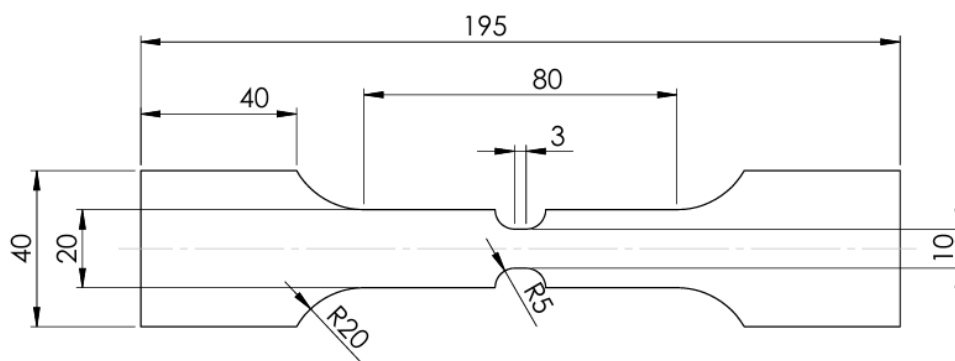


Obr. 16 Navržená geometrie zkušební vzorku pro tahové zkoušky

Po provedení prvních zkoušek bylo zjištěno, že i za kombinace všech nepříznivých podmínek, nedocházelo k porušení ve svaru, ale v základním materiálu. To naznačovalo, že i v těchto podmínkách vykazuje svar vyšší pevnost než samotný základní materiál a bylo zapotřebí upravit geometrii vzorků.

Úprava geometrie

Na základě výsledků z první fáze tahových zkoušek, při nichž docházelo k porušení mimo oblast svaru, byla provedena úprava geometrie vzorků s cílem dosáhnout porušení přímo ve svarovém kovu nebo v teplém ovlivněné oblasti (TOO). Z předchozího hodnocení tvrdosti základního materiálu a svarového kovu byl proveden výpočet potřebného průřezu, který by při zatížení způsobil porušení v požadovaném místě. Výsledkem byla úprava šířky tělesa na 10 mm v oblasti svaru, jak je zobrazeno na Obr. 17.



Obr. 17 Upravená geometrie zkušební vzorku se zúžením v oblasti svaru

U části vzorků se však i přes tuto optimalizaci rozměru nepodařilo dosáhnout porušení přesně ve svaru, což bylo způsobeno zejména nesouměrností svarového spoje. Přesto se podařilo získat dostatek vzorků s lomem ve svarové oblasti pro následnou analýzu vlivu pórovitosti.

6.2.4 Zkušební podmínky

Tahové zkoušky byly prováděny za pokojové teploty na zkušebním zařízení INOVA s kapacitou zatížení 100. Každý vzorek byl zatěžován za deformační rychlosti $0,002 \text{ s}^{-1}$ až do porušení, přičemž byla zaznamenána deformace, maximální síla v tahu a následným výpočtem získaná pevnost jako poměr této síly k původnímu průřezu zkušebního tělesa.

6.2.5 Omezení a předpoklady experimentu

Experiment probíhal za výrobních podmínek, které záměrně odrážely skutečnost reálného provozu. Nebyly tedy eliminovány všechny vnější vlivy, jako tomu bývá v laboratorním prostředí. Mezi ně patří například geometrická nesouměrnost svaru nebo menší odchylky v poloze svarové housenky. Tyto faktory byly brány jako přirozená součást procesu a nejsou chápány jako chyby, ale jako reálné proměnné.

I když byl počet vzorků omezen na 30 kusů, jedná se o dostatečný základ pro orientační hodnocení vlivu sledovaných faktorů.

7 Experimentální ověření

7.1 Pvní fáze tahových zkoušek

Tahové zkoušky probíhaly ve dvou fázích. Pro první fázi byly testovány vzorky s původní navrženou geometrií dle standardního tvaru zkušebních těles. Pro začátek experimentu byl z každé skupiny vzorků vybrán jeden. Vzorek se měl vlivem záměrně způsobených výrobních nedostatků porušit ve svaru. U všech vzorků došlo k přetržení v základním materiálu, což poukazovalo na dostatečnou pevnost svaru i při nejméně příznivých kombinacích technologických parametrů, tedy zejména u vzorků skupiny C1.

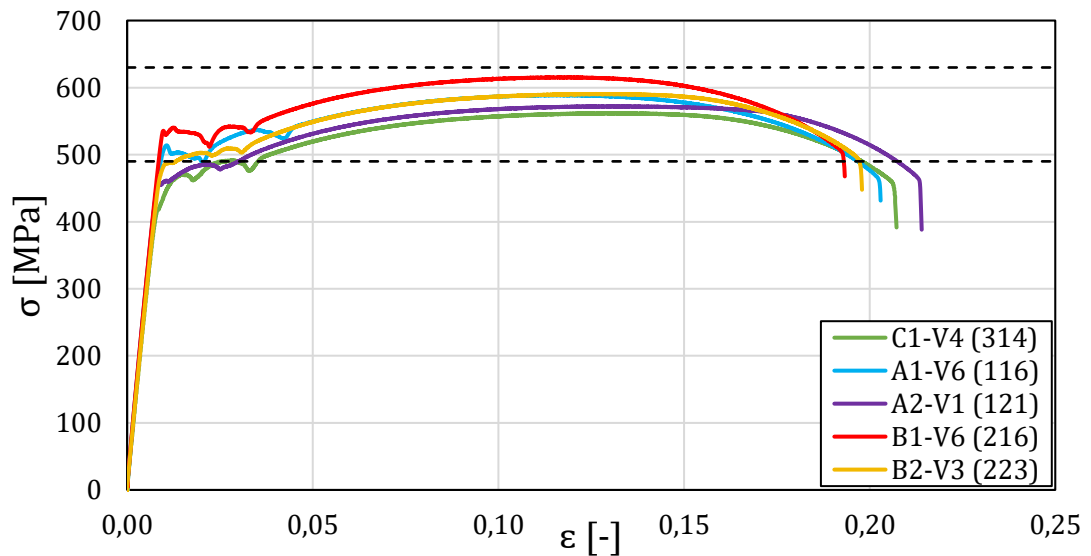


Obr. 18 Zkušební vzorek skupiny A1 vyfocený před provedením takové zkoušky

7.1.1 Vyhodnocení první fáze tahových zkoušek

Z výsledků první fáze tahových zkoušek vyplývá, že i za nejméně příznivých kombinací parametrů u skupiny vzorků C1 docházelo k porušení mimo oblast svaru. U této skupiny byla použita kombinace nesušeného tavidla a neobroušeného plechu. Oblast svaru, která se z hlediska těchto parametrů jevila jako nejvíce náchylná ke snížení pevnosti, přesto nevedla k porušení spoje.

Graf č. 1 ukazuje smluvní napětí a deformaci vzorku a u všech testovaných vzorků jednoznačně ukazuje, že pevnostní vlastnosti svarového kovu byly u všech testovaných vzorků vyšší než u základního materiálu. V grafech je pro lepší orientaci vyznačen pás meze pevnosti základního materiálu, která je v rozmezí od 470 MPa do 630 MPa.



Graf 1 Závislost napětí na deformaci u vybraných vzorků z první fáze zkoušek

Z grafu 1 je patrné, že všechny testované vzorky dosahují meze pevnosti v rozmezí přibližně 500 až 620 MPa. Nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek B1-V6 (216) a nejnižší hodnotu vykazuje vzorek A1-V6 (116). Vzorek C1-V4 (314) nevykazuje výrazně horší mechanické vlastnosti.

Průběh deformačních křivek je u všech vzorků velmi podobný. Po počátečním lineárním nárůstu napětí následuje oblast plastické deformace, ve které dochází k postupnému poklesu až do bodu porušení materiálu.

Vzhledem k tomu, že u všech testovaných variant došlo k porušení mimo oblast, jednalo se fakticky o zkoušení základního materiálu. Naměřené hodnoty meze pevnosti i meze kluzu tak odpovídají materiálu P355N, ale mají značný rozptyl. Tento rozptyl mezi kluzu pravděpodobně ukazuje na vliv tepelného cyklu.

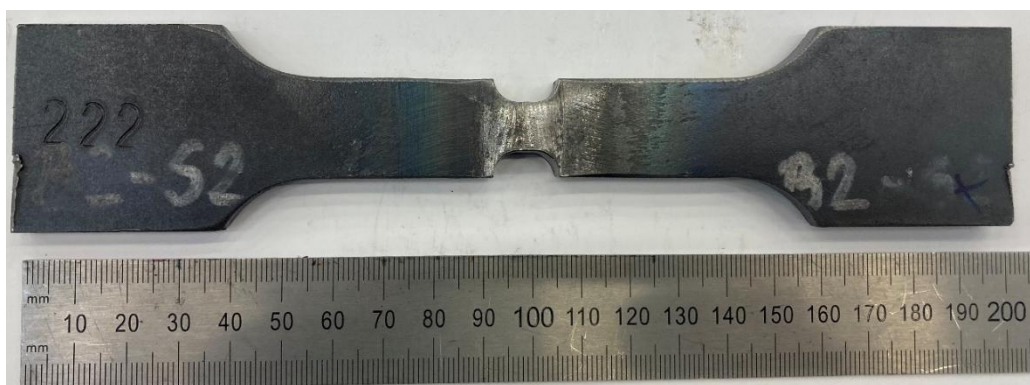


Obr. 19 Zkušební vzorky po provedení tahových zkoušek

7.2 Druhá fáze tahových zkoušek

Pro zajištění porušení v oblasti svaru a možný projev vlivu pórovitosti na pevnost spoje byla provedena optimalizace geometrie. Došlo tedy ke zúžení v oblasti svaru. Tato úprava nebyla jednoduchým zadáním z důvodu asymetrie svaru. Zúžení bohužel u některých vzorků nešlo vyrobit dle představ a při následné tahové zkoušce došlo k deformaci v jiném místě.

Úpravou geometrie se zvýšila deformační rychlost, vnesl se tam vrubový účinek a rozměry zúžení neodpovídají normě. Tato úprava byla z podstaty zadání korektní, ale byla nezbytná s ohledem na danou situaci a byla při vyhodnocení výsledků náležitě zohledněna.



Obr. 20 Zkušební vzorek skupiny B2 s upravenou geometrií ve svarovém spoji

7.2.1 Vyhodnocení druhé fáze tahových zkoušek

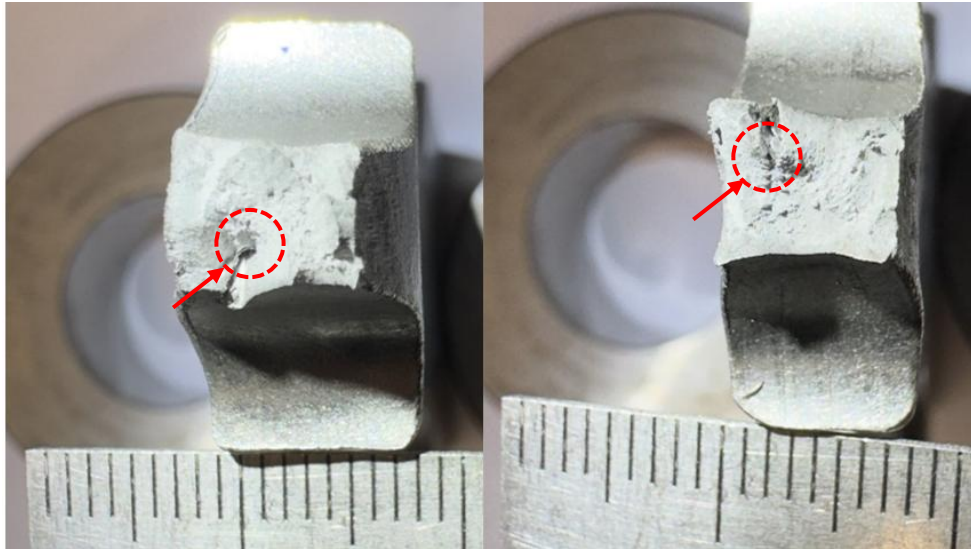
Skupina A1 – (Neobroušený plech – sušené tavidlo)

Vzorky skupiny A1 vykazovaly v průběhu tahových zkoušek různé hodnoty meze pevnosti v tahu, přičemž většina z nich se pohybovala v intervalu od 450 do 700 MPa. Jak je možné vidět v grafu 2. Nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek A1-V1 (111), zatímco nejnižší hodnoty vykazoval vzorek A1-V5 (115). Většina vzorků se porušila přímo ve svaru, což odpovídá očekávanému chování po zúžení tělesa v této oblasti. V jednom případě, a to u vzorku A1-V2 (112) došlo k porušení iniciované z hranice ztavení do středu svaru. U vzorku A1-V1 (111) byla během analýzy zaznamenána výrobní vada, která ale neměla na pevnost ani na místo porušení vliv. U vzorku A1-V5 (115) byla potvrzena přítomnost vnitřní vady v podobě póru, který je zachycen na obr. 21. Tato vada výrazně snížila pevnost svaru. Pro porovnání s mezí pevnosti základního materiálu slouží pásmo vyznačené čárkovanou čarou.

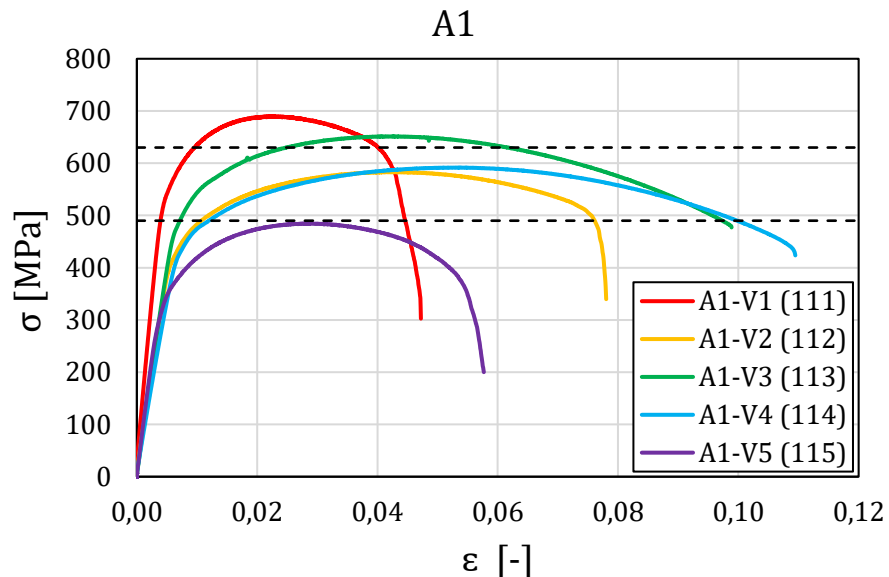
Po provedené úpravě geometrie zkušebních těles došlo k omezení plastické deformace, což vedlo k nižší tažnosti materiálu. Tento jev je z hlediska dynamického zatížení konstrukce významný. Naměřené výsledky po úpravě lépe odrážejí skutečný stav svarového kovu, avšak vykazují výrazný rozptyl pevnosti a zároveň podstatný pokles

tažnosti ve srovnání se základním materiálem. Je třeba podotknout, že zkrácení deformační délky mělo vliv na zvýšení deformační rychlosti, což mohlo rovněž přispět ke snížení celkové tažnosti vzorků.

S výjimkou vzorku A1-V5, u kterého byl potvrzen negativní vliv pórovitosti, vykazovaly ostatní vzorky pevnostní charakteristiky srovnatelné se základním materiálem, avšak při zřetelně nižší tažnosti. Pokles tažnosti lze částečně vysvětlit litou strukturou svarového kovu s orientací zrn ve směru krystalizační fronty, která je vůči tahovému zatížení při zkoušce nevýhodná.



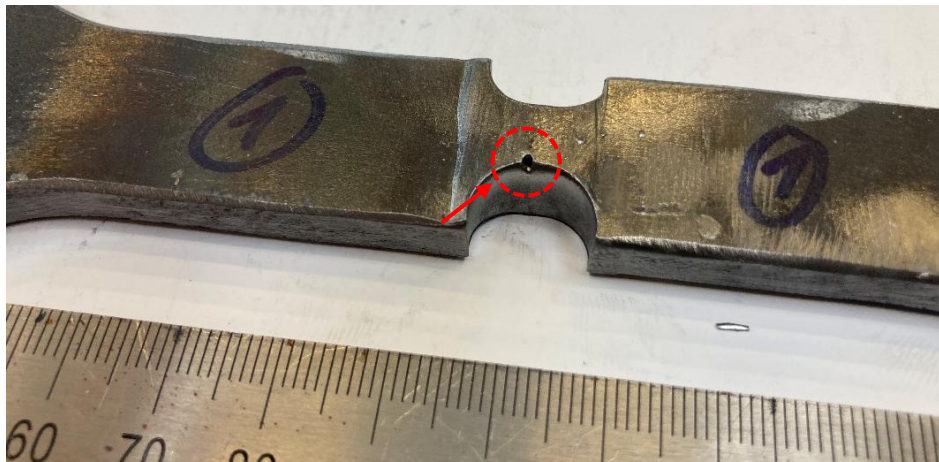
Obr. 21 Vnitřní vady v podobě póru



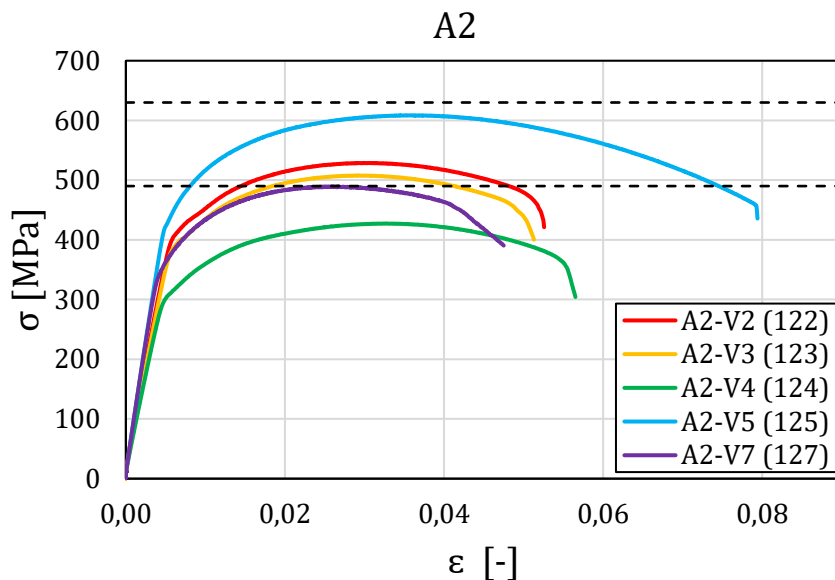
Graf 2 Tahové křivky vzorků skupiny A1 ve druhé fázi tahových zkoušek

Skupina A2 - (Obroušený plech - nesušené tavidlo)

Vzorky této skupiny vykazovaly obecně nižší pevnosti v tahu, a to převážně v rozmezí 400 až 500 MPa. Deformace nastávala jak ve svaru, tak na hranicích ztavení. Jak ukazuje graf 3 nejnižší hodnotu vykazoval vzorek A2-V4 (124) a nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek A2-V5 (125). Porušení u většiny vzorků nastávalo na hranicích ztavení z obou stran. Tento jev pravděpodobně nastal vlivem výrobních nedostatků v důsledku asymetrie svarových housenek. U vzorku A2-V7 (127) byl navíc ve svaru nalezen pór, který měl vliv na nižší pevnost daného svaru. Tato vada je zdokumentována v obr. 22.



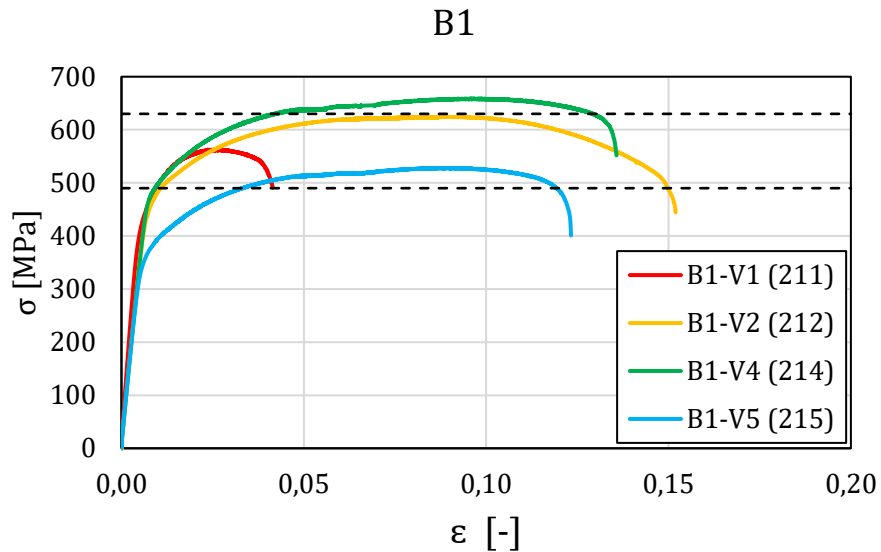
Obr. 22 Detail póru na zkušebním vzorku A2-V7 (127)



Graf 3 Tahové křivky vzorků skupiny A2 ve druhé fázi tahových zkoušek

Skupina B1- (Neobroušený plech - nesušené tavidlo)

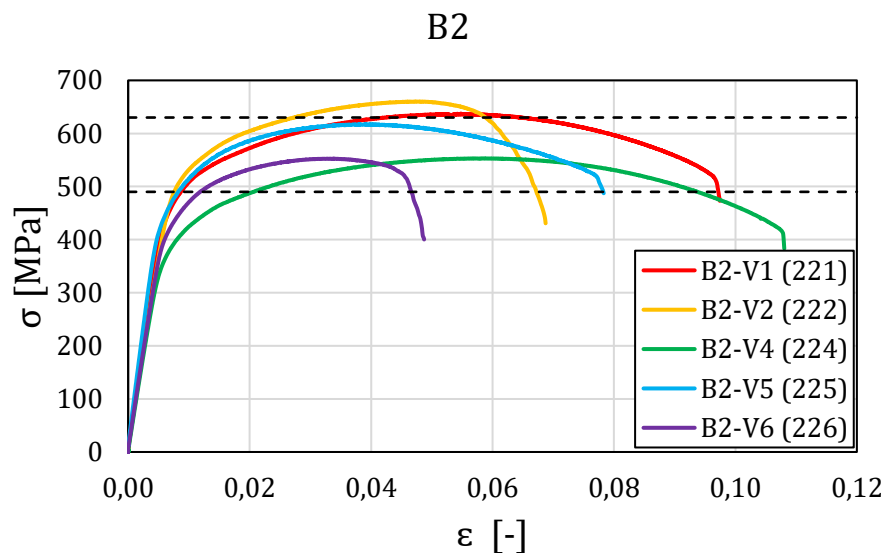
Tato skupina vzorků vykazovala hodnoty pevnosti v rozmezí 450 až 650 MPa. Ve svaru se porušil vzorek B1-V2 (212), ostatní vzorky se porušily na hranici ztavení.



Graf 4 Tahové křivky vzorků skupiny B1 ve druhé fázi tahových zkoušek

Skupina B2 - (Obroušený plech – nesusušené tavidlo)

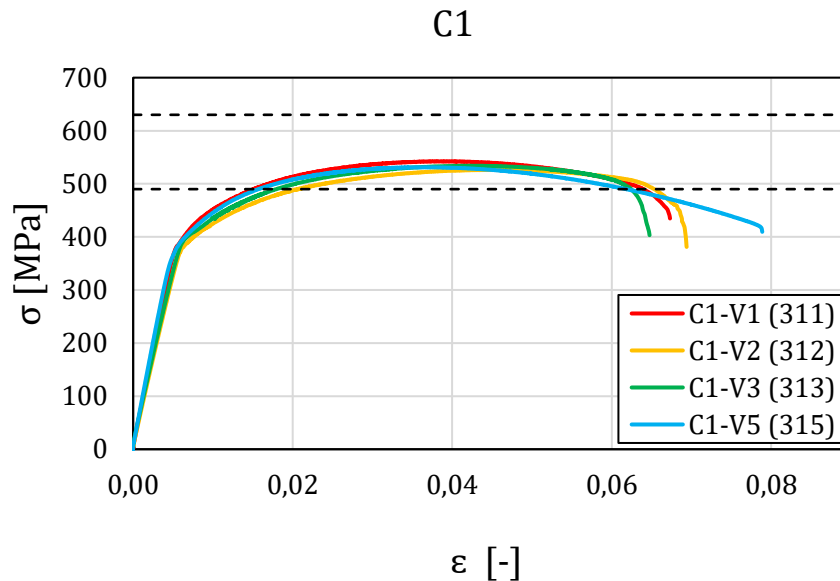
Vzorky ze skupiny B2 dosahovaly hodnot pevnosti v rozsahu 500 až 650 MPa, přičemž nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek B2-V2 (222). Všechny vzorky kromě již zmíněného vzorku B2-V2 (222) se porušily ve svaru. Tato skupina nevykazovala žádné pozorovatelné vady, a tudíž ani žádné výrazné odchylky.



Graf 5 Tahové křivky vzorků skupiny B2 ve druhé fázi tahových zkoušek

Skupina C1 - (Neobroušený plech – znečištěné, použité a nesušené tavidlo)

Vzorky C1 se během zkoušky deformovaly velmi podobně, což dokazuje graf 6. U vzorků (C1-V1 (311), C1-V2 (312) a C1-V3 (313)) došlo k porušení v zúžené oblasti i oblasti hranic ztavení iniciované z obou stran, což však nebylo hodnoceno jako výrobní vada, ale spíše jako přirozená slabina v této přechodové zóně. U vzorku C1-V5 (315) došlo k porušení přímo v zúžené části svaru. V žádném ze vzorků této skupiny nebyly nalezeny makroskopicky viditelné vady.



Graf 6 Tahové křivky vzorků skupiny C1 ve druhé fázi tahových zkoušek

Při porovnání výsledků tahových zkoušek svarových spojů se základním materiálem P355N lze konstatovat, že většina vzorků dosahovala srovnatelných nebo mírně nižších hodnot meze pevnosti v tahu, avšak ve všech skupinách byl zaznamenán pokles tažnosti. Tento jev souvisí zejména s metalurgickou strukturou svarového kovu a zvolenou geometrií zkušebních těles. Výraznější oslabení mechanických vlastností bylo pozorováno především u svarů s vnitřními vadami.

7.3 Metalografická analýza mikrostruktury v T00

Svarové spoje byly zhotoveny ve vysoké kvalitě, bez převýšení svarové housenky nebo neprůvaru. To svědčí o pečlivém dodržení technologického postupu při svařování. Díky vysoké kvalitě svarů lze výsledky považovat za relevantní, protože nejsou ovlivněny technologickými vadami, které by mohly zkreslit hodnocení struktury svarového kovu.

Pro metalografickou analýzu byly připraveny výbrusy ze tří deformovaných vzorků: vzorku 125 (A2-V5 – obroušený plech, nesušené tavidlo), vzorku 115 (A1-V5 – neobroušený plech, sušené tavidlo) a vzorku 312 (C1-V2 – neobroušený plech, znečištěné a nesušené použité tavidlo). Výbrusy byly odebrány podélným řezem v ose vzorků a

připraveny standardním metalografickým postupem, který zahrnoval broušení, leštění a leptání. K leptání byl použit roztok Nitalu.



Obr. 23 Makroskopický výbrus vzorků 115 (vlevo), 125 (uprostřed) a 312 (vpravo)

Pro metalografickou analýzu byla použita světelná mikroskopie při maximálním zvětšení 1000 \times . Při tomto zvětšení nebyly u žádného z analyzovaných vzorků (125, 115 a 312) identifikovány vnitřní vady ani mikrotrhliny a u všech vzorků byly pozorovány velmi podobné mikrostrukturní charakteristiky.

V oblasti základního materiálu byla patrná řádkovitá struktura odpovídající procesu výroby polotovaru. V tepelně ovlivněné oblasti (TOO) docházelo k částečné homogenizaci struktury v důsledku tepelného cyklu svařování. Na hranici ztavení byl dobře patrný přechod mezi základním materiálem a svarovým kovem.

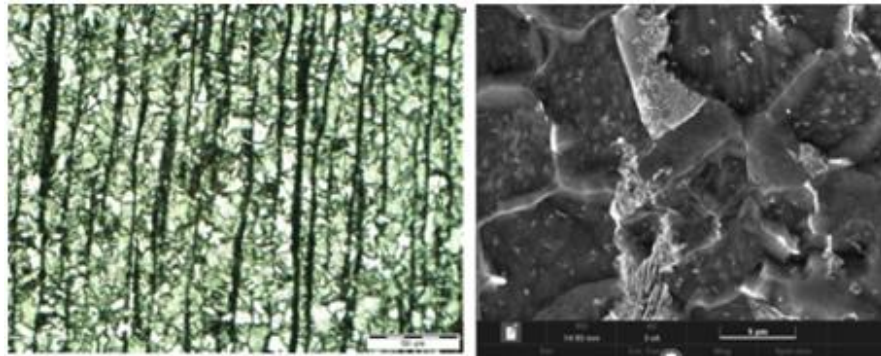
V oblasti svarového kovu bylo možné rozlišit dvě vrstvy – kořenovou svarovou housenku (první vrstvu) a krycí svarovou housenku (druhou vrstvu). U všech analyzovaných vzorků došlo ke kompletnímu provaření bez nespojitostí v kořeni svaru. Nebyly zaznamenány žádné vady na linii ztavení ani přítomnost nežádoucích strukturních složek. Celkově bylo potvrzeno kvalitní provedení svarů v souladu s kvalifikačním postupem (WPS).

Druhá vrstva svarového kovu plynule navazovala na první, přičemž její vznik vedl k částečné homogenizaci a zjemnění struktury první vrstvy vlivem opětovného prohřátí. Tento efekt byl patrný u všech analyzovaných vzorků. Zjištěné zjemnění zrna v oblasti kořenové housenky představuje účinný mechanismus zvýšení pevnosti svarového kovu, což odpovídá také vyšší pevnosti SK ve srovnání se základním materiálem, jak bylo pozorováno u výchozích tahových zkoušek. Pro přehlednost je dále zařazena srovnávací fotodokumentace mikrostruktury obou vrstev svarového kovu.

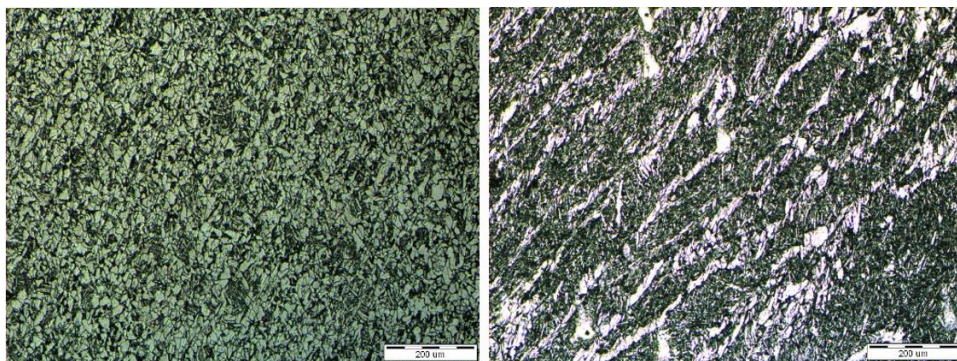
Vliv opakované austenitizace byl patrný rovněž v tepelně ovlivněné oblasti, zejména v místech překryvu teplotních polí jednotlivých housenek. V těchto místech docházelo k typickému intenzivnímu zjemnění zrna.

Jak je patrné z obr. 24, v oblasti základního materiálu byla viditelná řádkovitá struktura odpovídající procesu výroby polotovaru. V tepelně ovlivněné oblasti (TOO) docházelo k částečné homogenizaci struktury vlivem tepelného cyklu svařování a na hranici ztavení byl dobře patrný přechod mezi základním materiálem a svarovým kovem. Obrázek zachycuje typickou mikrostrukturu těchto oblastí. U krycí housenky je navíc patrná

zachovaná sloupcovitá struktura zrn s feritickou obálkou, zatímco kořenová vrstva po opakovaném přehřátí vykazuje velmi jemnou, rovnoměrnou strukturu.



Obr. 24 Mikrostruktura základního materiálu a přechodové oblasti (500× a 32×)

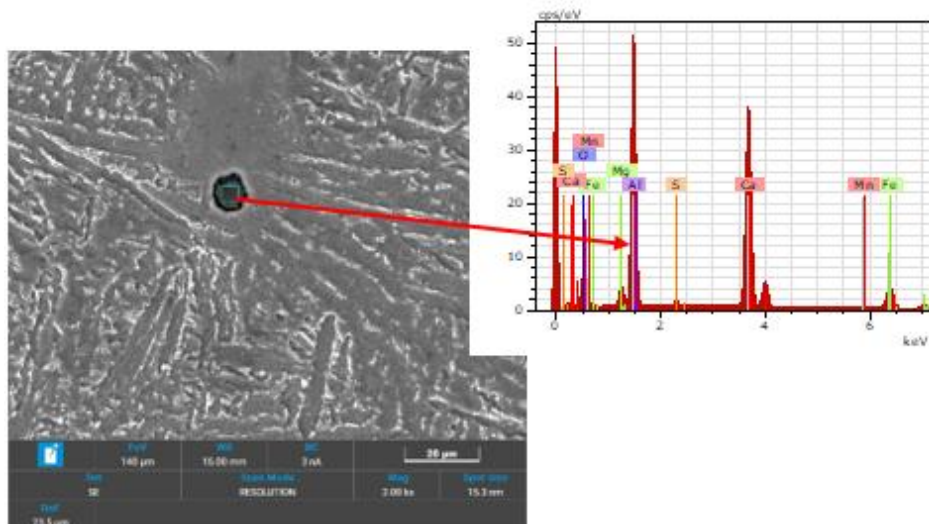


Obr. 25 Struktura kořenové a krycí housenky (125× a 64×).

Na obr. 25 je zobrazen svarový kov, vlevo jemná struktura kořenové housenky a vpravo hrubší struktura krycí housenky. Rozdíl ve struktuře odpovídá rozdílnému prohřátí při navařování jednotlivých vrstev.

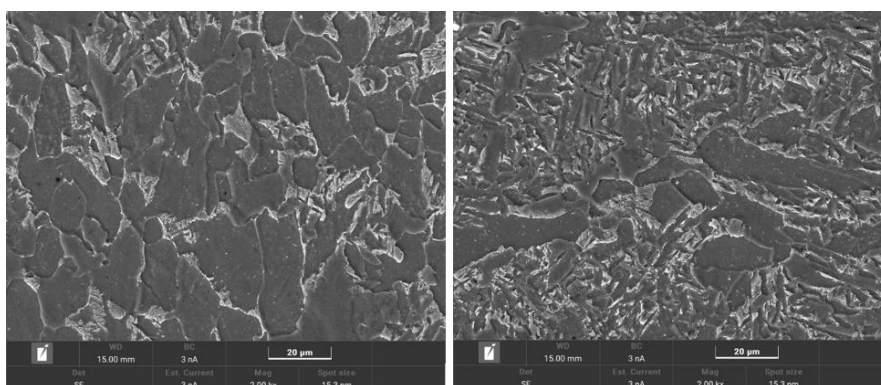
Pro podrobnější posouzení byl dále proveden rozbor pomocí elektronového mikroskopu na vzorcích A2 a C1, a to se zaměřením na čistotu svarového kovu v souvislosti s vlivem absence broušení základního materiálu. Zatímco při světelné mikroskopii nebyly mezi vzorky výrazné rozdíly, elektronová mikroskopie odhalila u vzorku C1 vyšší obsah nečistot a vměstků. Ve vzorku A2 byl svarový kov znatelně čistší. I přes vyšší výskyt vměstků u vzorku C1 se jejich přítomnost neprojevila negativně na výsledcích tahových zkoušek – statická pevnost zůstala dostatečná u obou vzorků.

Identifikace vměstků byla provedena pomocí energiové dispersní chemické mikroanalýzy (EDS). Byly zaznamenány především komplexní oxidické vměstky (viz obr. 26, příloha C).



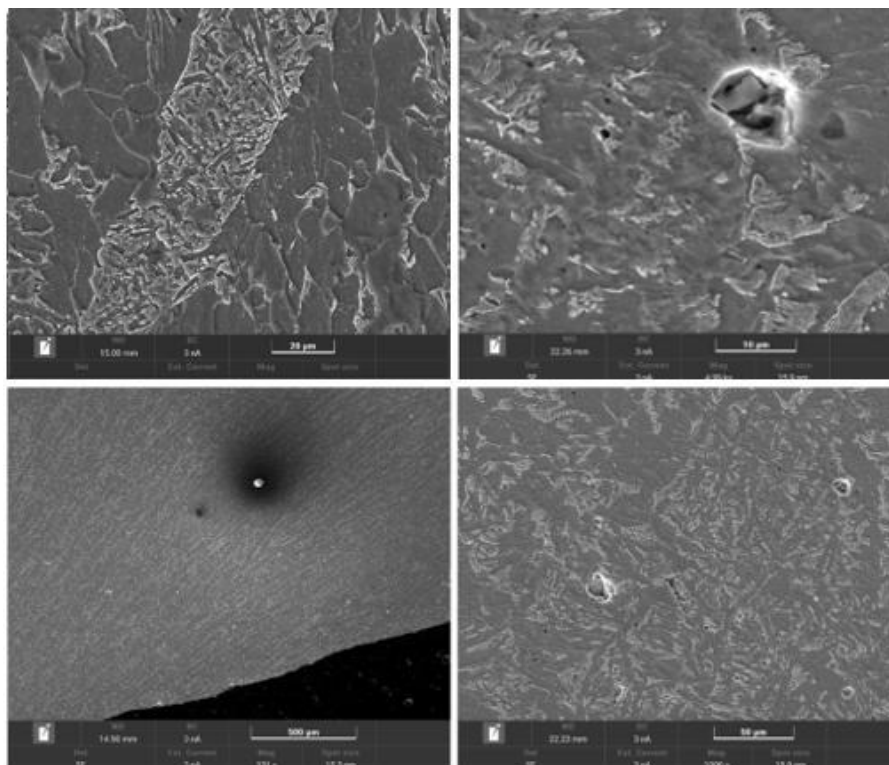
Obr. 26 Vměstek ve svarovém kovu a EDS analýza složení.

Přestože vzorek C1 vykazoval vyšší koncentraci těchto nečistot, jejich přítomnost neměla prokazatelný vliv na snížení mechanické pevnosti. Výsledky tahových zkoušek potvrdily dostatečnou statickou odolnost u obou vzorků.



Obr. 27 Mikrostruktura svaru oblasti kořenové (vlevo) a krycí housenky (vpravo)

Na obr. 28 je zachyceno porovnání elektronové mikroskopie vzorků A2 a C2. V levé horní části je vidět svarový kov vzorku A2, který je z hlediska čistoty považován za referenční. V dolní části obrázku jsou záběry kořenové (vlevo) a krycí (vpravo) housenky vzorku C2, u kterého byl pozorován vyšší výskyt vměstků. Pravý horní roh zobrazuje detailní pohled na jeden z výrazných vměstků ve vrstvě krycí housenky.



Obr. 28 Elektronová mikroskopie vzorků A2 a C2 (srovnání čistoty svarového kovu)

7.4 Měření tvrdosti svarového spoje

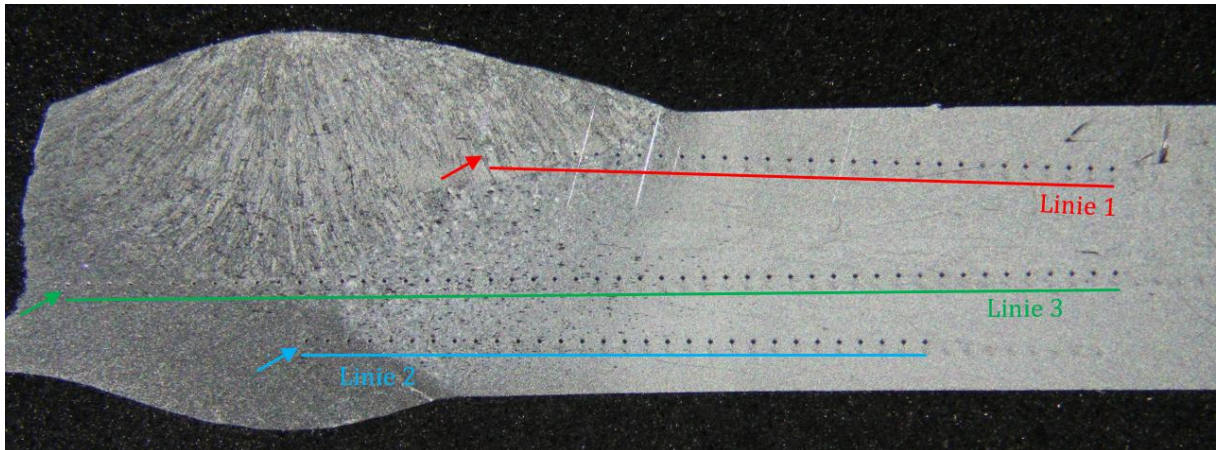
7.4.1 Cíl měření

Cílem liniového měření tvrdosti bylo kvantitativně posoudit vliv tepelného cyklu na mikrostrukturu svarového spoje. Tvrdostní profil napříč spojem poskytuje důležité informace o strukturních změnách v jednotlivých zónách svaru a slouží jako podpůrný parametr při hodnocení kvality provedení svaru. Měření bylo provedeno na tvrdoměru Zwick ZHU 2.5 metodou Vickers HV2.

7.4.2 Popis vzorku a měřených linií

Pro měření tvrdosti byl zvolen podélný výbrus svarového spoje vzorku A2-V5 (125). Tento vzorek byl vybrán jako reprezentant optimální kombinace všech parametrů svařování, tedy kombinace sušeného tavidla a obroušeného plechu.

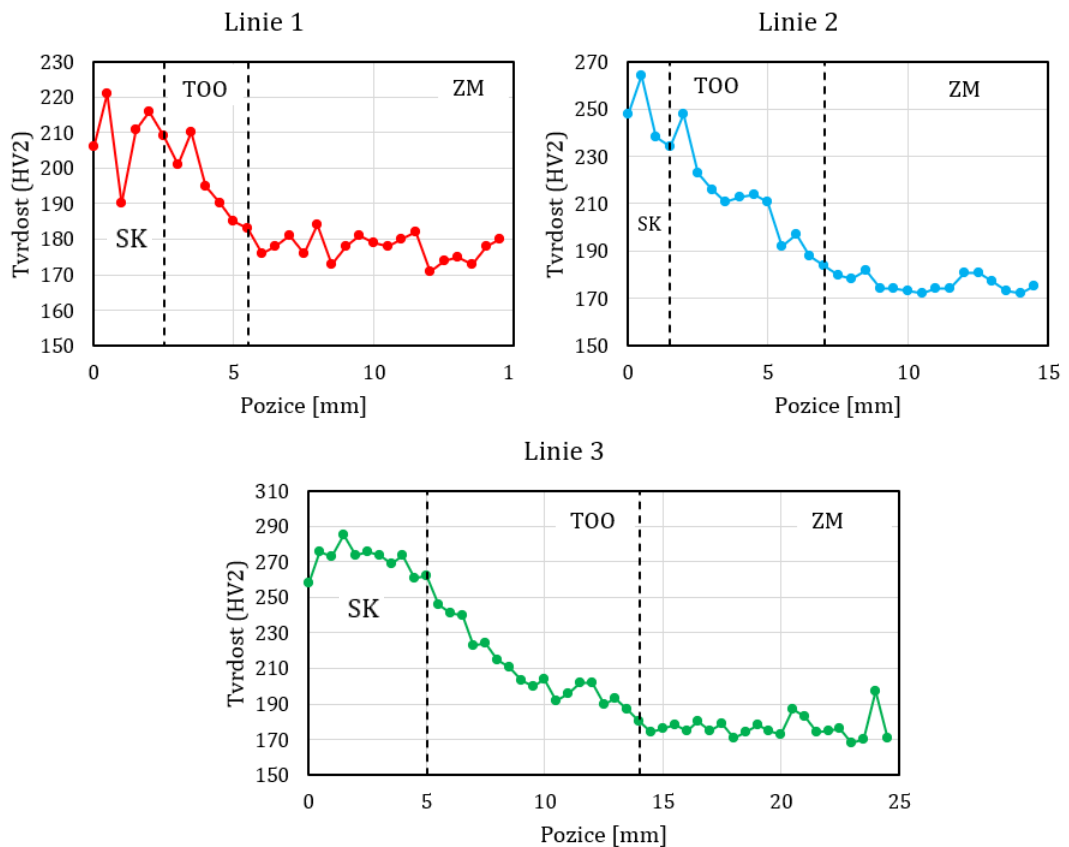
Jak je vidět z obr. 29, na podélném výbrusu vzorku jsou vyznačeny tři linie měření s krokem 0,5 mm. Linie 1 vede z oblasti krycí housenky, přes fúzní zónu a TOO do základního materiálu. Linie 2 vede z oblasti kořenové housenky, přes přechodové zóny do základního materiálu. Linie 3 je vedena přes hranici ztavení obou svarových kovů, přes TOO až do základního materiálu.



Obr. 29 Makrofotografie výbrusu se zvýrazněnými liniemi měření tvrdosti.

7.4.3 Výsledky a vyhodnocení

Měřením bylo potvrzeno, že tvrdost napříč svarovým spojem vykazuje charakteristické změny. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány v oblasti svarového kovu, nejnižší v základním materiálu.



Graf 7 Průběh tvrdosti (HV2) ve třech liniích napříč svarovým spojem

Měřením bylo potvrzeno, že tvrdost napříč svarovým spojem vykazuje charakteristické změny. Ve všech měřených liniích dochází k pozvolnému nárůstu tvrdosti od základního materiálu směrem ke svarovému kovu, kde byly zaznamenány nejvyšší hodnoty. V oblasti

základního materiálu se hodnoty ustalovaly v rozmezí 170–190 HV2. Tvrdozní rozdíl mezi základním materiálem a oblastí svarového kovu tvoří výrazný gradient. U linie 1 činí nárůst tvrdosti přibližně 38 %, u linie 2 zhruba 16 % a u linie 3 až 55 %. Tento přechod byl u všech linií plynulý a bez náhlých změn.

Měření zároveň potvrdilo rozhodující vliv zjemnění zrna na mechanické vlastnosti svarového kovu, zejména v oblasti kořenové housenky, kde byly zaznamenány nejvyšší hodnoty tvrdosti.

Výsledky celkově dokládají stav materiálu v místech, kde při první sérii tahových zkoušek docházelo k porušení. V případě rovnoměrného svaru bez výrazných nehomogenit nebo koncentrací napětí (např. v důsledku převýšení svarového kovu) se při jednoosém zatížení ukazuje jako rozhodující oblast středová – tedy právě ta, která vykazuje nejvyšší tvrdost a odpovídající zvýšenou pevnost.

8 Souhrnné vyhodnocení

Tato bakalářská práce byla zaměřena na hodnocení kvality svarového spoje vytvořeného metodou svařování pod tavidlem (SAW). Cílem bylo posoudit vliv různých parametrů svařování, zejména jejich optimalizace na výslednou kvalitu svaru z pohledu strukturních vlastností, vnitřních vad a mechanické odolnosti. Dílčím cílem bylo kvantitativně podchytit vliv tepelného cyklu na mikrostrukturu svarového spoje prostřednictvím liniového měření tvrdosti a zároveň zhodnotit význam pórovitosti jako potenciálně kritické vady z hlediska pevnosti.

Tahové zkoušky tvořily klíčovou část experimentálního ověření této bakalářské práce a sloužily jako přímý indikátor vlivu různých technologických parametrů svařování pod tavidlem (SAW) na výslednou pevnost svarového spoje. Byly navrženy ve dvou fázích s cílem ověřit chování materiálu za různých podmínek.

V první fázi zkoušek, prováděné na vzorcích s původně navrženou geometrií, docházelo k porušení v oblasti základního materiálu. Porušení se projevilo i u vzorků vytvořených za nejméně příznivých podmínek, do kterých patří vzorky skupiny C1 (neobroušený plech a použité tavidlo). Tento výsledek potvrdil, že samotný svarový kov vykazuje vyšší pevnost než základní materiál, což naznačuje vysokou kvalitu svaru i při technologických odchylkách.

Na základě těchto poznatků byla pro druhou fázi zkoušek upravena geometrie tělesa tak, aby došlo k porušení přímo v oblasti svaru nebo hranice ztavení. Touto úpravou se dosáhlo porušení u většiny vzorků oblasti svaru a bylo tak možné reálné hodnocení vlivu vnitřních vad, zejména pórovitosti, na statickou pevnost spoje.

Výsledky ukázaly, že vzorky se sušeným tavidlem a obroušeným plechem, které patří skupina A2, dosahovaly mírně nižších, ale za to stabilních hodnot meze pevnosti. Naproti tomu skupiny s nesusšeným nebo znečištěným tavidlem v kombinaci s neobroušeným plechem (skupiny B1, B2, C1) vykazovaly větší rozptyl výsledků.

Získané výsledky potvrzují, že pórovitost má negativní vliv na pevnost svaru, zejména pokud se nachází v kritických zónách jako je kořenová vrstva nebo hranice ztavení. Současně bylo prokázáno, že kvalitní příprava povrchu a správná manipulace s tavidlem významně zvyšují kvalitu spoje a omezují výskyt vnitřních vad. Celkově tahové zkoušky potvrdily důležitost nastavených technologických parametrů.

Metalografická analýza vzorků 115 (neobroušený plech, sušené tavidlo), 125 (obroušený plech, sušené tavidlo) a 312 (neobroušený plech, použité a znečištěné tavidlo) ukázala, že všechny vykazují obdobné mikrostrukturní vlastnosti. V oblasti základního materiálu byla patrná řádkovitost, zatímco v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) docházelo k částečné homogenizaci vlivem tepelného cyklu svařování. Přejít přes hranici ztavení byl

zřetelný a ve svarovém kovu byly identifikovány dvě vrstvy, kořenová a krycí housenka, přičemž druhá vykazovala jemnější strukturu díky opakovanému prohřátí.

Elektronová mikroskopie vzorků 125 a 312 dále prokázala rozdíly v čistotě svarového kovu. Vzorek 125 měl homogenní strukturu s minimem nečistot, zatímco ve vzorku 312 byly nalezeny výraznější vměstky. Tyto vady však neměly prokazatelný vliv na pevnost spoje, jak potvrdily výsledky tahových zkoušek.

Celkově analýza potvrdila, že kvalitní technologické podmínky svařování významně ovlivňují nejen mechanické vlastnosti, ale i jemnost a čistotu mikrostruktury svarového kovu.

Liniové měření tvrdosti bylo provedeno ve třech rovinách napříč svarovým spojem, a to s cílem podchytit jednotlivé vlivy kořenové a krycí housenky a dále hodnoty v oblasti překryvu obou tepelně ovlivněných zón. Výsledky prokázaly plynulý přechod tvrdosti z oblastí svarového kovu a teplem ovlivněné oblasti (TOO) směrem k základnímu materiálu. V oblasti fúzních zón nedocházelo k náhlému nárůstu tvrdosti, což svědčí o stabilním teplotním režimu a absenci lokálního zakalení. Hodnoty v TOO naznačují jemnější mikrostrukturu a odpovídající mírné zvýšení tvrdosti ve srovnání se základním materiálem. Nejnižší tvrdosti byly identifikovány v základním materiálu, a to v rozmezí 170–190 HV₂. Výsledky potvrzují správnou volbu technologických parametrů a dodržení specifikace WPS.

Největší tvrdostní gradient byl zaznamenán ve středové linii svaru, kde docházelo k přechodu přes dva svarové kovy. Výsledky potvrzují správnou volbu technologických parametrů a dodržení specifikace WPS.

Bylo prokázáno, že zvolené technologické parametry vedly k dostatečnému protažení a plastickému zpevnění ve středové části svarového spoje. V této oblasti zároveň došlo ke zjemnění mikrostruktury, které se pozitivně projevilo na výsledné pevnosti. Tato pevnost přesáhla pevnost základního materiálu a vytvořila bezpečnostní rezervu, která omezila negativní vliv nečistot zjištěných u vzorku 312.

9 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala hodnocením kvality svarových spojů vytvořených metodou svařování pod tavidlem (SAW) u tlakových nádob (kotlů) železničních cisternových vozů, přičemž hlavní důraz byl kladen na vznik pórovitosti a její vliv na pevnostní vlastnosti. Výzkum byl realizován ve spolupráci se společností Nymwag CS, která poskytla technologické zázemí i cenné praktické zkušenosti z oblasti výroby cisternových vozů.

V teoretické části byl zpracován přehled konstrukčních typů železničních cisternových vozů a technologických procesů jejich výroby, se zvláštním zaměřením na metodu SAW a typické vady svarů. Následně byl navržen a proveden experiment, který ověřoval vliv přípravy svarových ploch na vznik pórovitosti v konkrétním typu tupého svarového spoje. Současně byl posuzován také vliv stavu tavidla na kvalitu svarového spoje.

Výsledky tahových zkoušek ukázaly, že při správné přípravě svarových ploch a použití sušeného tavidla (vzorky skupiny A2) je výskyt vnitřních vad minimální a pevnost spoje stabilní. Naopak vzorky připravené za méně příznivých podmínek (skupina C1) vykazovaly větší rozptyl výsledků a vyšší výskyt vnitřních vad. Přesto se podařilo ve většině případů zachovat pevnost svarového kovu na vyšší úrovni než u základního materiálu.

Mikroskopická a metalografická analýza potvrdila konzistenci mikrostruktury napříč vzorky, zatímco elektronová mikroskopie odhalila větší množství vměstků u méně kvalitních svarů. Tyto nečistoty však nevedly ke kritickému snížení mechanické pevnosti. Liniové měření tvrdosti potvrdilo správný průběh tepelného cyklu, pozvolný gradient tvrdosti a absenci tvrdostních anomálií.

Celkově experiment potvrdil, že kvalita svarových spojů je velmi citlivá na dodržení technologické kázně, zejména na čistotu svarových ploch a správné zacházení s tavidlem. Práce tak přináší praktické poznatky pro optimalizaci výrobního procesu.

Na základě výsledků lze jako vhodná opatření doporučit přípravu svarových ploch broušením a použitím sušeného tavidla, jelikož obě tyto podmínky vedly ke zlepšení mikrostruktury i mechanické odezvy svarů. Současně však platí, že i při méně příznivých podmínkách (např. použití vlhkého tavidla nebo neobroušeného plechu) nedošlo ke kritickému zhoršení pevnosti, což potvrzuje určitou technologickou toleranci zvoleného postupu.

Literatura

- [1] ORLEN UNIPETROL DOPRAVA. *Železniční nákladní vozy – manipulace a používání*. Vydání 9. [online]. Ověřil Jiří Kára. Platnost od 1. 1. 2022. [cit. 2025-03-09]. Dostupné z: https://www.orlenunipetroldoprava.cz/CS/onas/Documents/PRP%204_Zeleznicni_nakladni_vozy_manipulace_a_pouzivani_V9Z0.pdf
- [2] Ministerstvo dopravy ČR. *RID - Přeprava nebezpečných věcí*. Dostupné z: <https://du.gov.cz/potrebuji-si-vyridit/rid-preprava-nebezpecnych-veci/> [cit. 2025-03-09].
- [3] *RID – Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí*. Příloha C k Úmluvě o mezinárodní železniční přepravě (COTIF). Bern: Mezivládní organizace pro mezinárodní železniční dopravu (OTIF), 2023. Dostupné z: <https://otif.org>
- [4] UNION PACIFIC. What Is a Rail Tank Car? [online]. [cit. 2025-02-14]. Dostupné z: <https://www.up.com/customers/track-record/tr052521-what-is-a-rail-tank-car.htm>
- [5] RYKO PLUS spol. s r.o. *Železniční vozy*. [online]. [cit. 2025-02-14]. Dostupné z: <https://www.rykoplus.cz/?p=clanky/vozy>
- [6] AMERICAN OIL & GAS HISTORICAL SOCIETY. *Densmore Oil Tank Car*. [online]. [cit. 2025-02-14]. Dostupné z: <https://aoghs.org/transportation/densmore-oil-tank-car>
- [7] DENSMORE, James a Amos DENSMORE. *Improved Car for Transporting Petroleum*. US Patent 53,794. 10. dubna 1866. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/c2/21/13/d95620e0dd01fe/US53794.pdf>
- [8] NOVÁK, Jaroslav; CEMPÍREK, Václav; NOVÁK, Ivan a ŠIROKÝ, Jaromír. *Kombinovaná přeprava*. CD-ROM. Vydání: páté rozšířené. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-948-7.
(HZ CONTAINERS. Rohové kostky na lodní kontejner [online]. [cit. 2025-02-13]. Dostupné z: <https://hz-containers.com/cs/nabidka/rohove-kostky-na-lodni-kontejner/>)
- [9] VŠB - Technická univerzita Ostrava. (2004). *Nápisy a značky na nákladních vozech*. [online] Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zdopr/01_ZD-03.pdf [cit. 5. březen 2025].
- [10] VŠB - Technická univerzita Ostrava. (2004). *Písemné označení a značky na nákladních vozech*. [online] Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zdopr/01_ZD-01.pdf [cit. 5. březen 2025].

- [11] Nařízení Komise (EU) č. 1302/2014 ze dne 18. listopadu 2014, kterým se stanoví technická specifikace pro interoperabilitu subsystému „kolejová vozidla – osobní doprava“ transevropského železničního systému. *Úřední věstník Evropské unie*, L 356, 12. 12. 2014. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32014R1302>
- [12] *Podvozky* [online]. Praha: Vagony.cz, ©2005–2024 [cit. 30. 3. 2025]. Dostupné z: <https://www.vagony.cz/pojezdy/podvozky.html>
- [13] *Skříň nákladních vozů* [online]. Praha: Vagony.cz, ©2005–2024 [cit. 30. 3. 2025]. Dostupné z: https://www.vagony.cz/vagony/skrin_nakladnich_vozu.html
- [14] HELLER, P., DOSTÁL, J. *Kolejová vozidla II*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009, 391 s. ISBN 978-80-7043-641-7
- [15] NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. *Derailment of CN Freight Train U70691-18 with subsequent hazardous materials release and fire; Cherry Valley, Illinois; June 19, 2009* [online]. NTSB/RAR-12/01. Washington, D.C.: National Transportation Safety Board, 14. února 2012 [cit. 12. 7. 2013]. Dostupné z: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/RAR1201.pdf>
- [16] *Zans – GATX Type 1698* [online]. ©2024 [cit. 30. 3. 2025]. Dostupné z: <https://www.gatx.eu/railcar/zans-gatx-type-1698/>
- [17] EN 14025:2013. *Tlakové nádoby z oceli pro přepravu nebezpečných věcí – Konstrukce a výroba*. Brusel: CEN, 2013.
- [18] LEE, B. S.; CHOI, H.; KWON, Y. Development of railway tank cars with improved drainage performance. *Transportation Research Record*, 2015, 2476(1), s. 65–72. Dostupné z: <https://doi.org/10.3141/2476-09>
- [19] RYKO PLUS spol. s r.o. *Typový list železničního kotlového vozu ZACENS 40 m³* [online]. Česká Třebová, 2021 [cit. 2025-03-29]. Dostupné z: <https://www.rykoplus.cz/doc/typovy-list-zacens-40-m3.pdf>
- [20] SAAT, M. R.; BARKAN, C. P. L. Optimizing the design of railway tank cars to minimize accident-caused releases. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 134(1–3), s. 153–160. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.10.040>
- [21] SCHULZ, H. Welding of pressure vessels and tanks in railway applications. *Welding in the World*, 2017, 61(3), s. 521–530. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0438-1>
- [22] MATUNA, J. *Pracovní návody – Výroba kotle cisterny 88 m³*. Interní dokumentace společnosti, revize 15.4.2020.
- [23] NYMWAG CS a.s. Oficiální webové stránky [online]. Nymburk: NYMWAG CS a.s., [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://www.nymwag.cz/>
- [24] TATRAVAGÓNKA a.s. Oficiální webové stránky [online]. Poprad: TATRAVAGÓNKA a.s., [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://tatravagonka.sk/>
- [25] Đuro Đaković Grupa d.d. Oficiální webové stránky [online]. Slavonski Brod: Đuro Đaković Grupa d.d., [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://duro-dakovic.com/en/>
- [26] Đuro Đaković. RAILWAY PROGRAM [online]. Slavonski Brod: Đuro Đaković, 2024 [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://duro-dakovic.com/wp-content/uploads/2024/10/DD-BROSURA-VAGONI NOVA-N WEB.pdf>
- [27] Greenbrier Europe. Oficiální webové stránky [online]. [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://www.greenbrier-europe.com/company/>

- [28] KUBÍČEK, Jaroslav. Technologie svařování. *Ústav strojírenské technologie*, 1994.
- [29] KUDĚLKA, Vladimír, Zdeněk BALEJ, Jan OPLETAL. WPS, WPQR, pWPS – popis a definice [online]. Brno: TESIYO, s.r.o., 27. listopadu 2014 [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=474>
- [30] KUMAR, E. Investigation of Various Welding Process Parameters on Mechanical Properties in SAW Process. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, 113-120.
- [31] ZHANG, Yanyun, et al. Structural roles of TiO₂ in CaF₂-SiO₂-CaO-TiO₂ submerged arc welding fluxes. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2020, 51: 1947-1952.
- [32] CHEN, Xiao-hua, et al. Manufacturing process and microstructure of copper-coated aluminum wires. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2015, 22: 190-196.
- [33] CHOUDHARY, Deepak Kumar; JINDAL, Sandeep; MEHTA, N. P. To study the effect of welding parameters on weld bead geometry in SAW welding process. *Elixir Mech. Engg*, 2011, 40: 5519-5524.
- [34] BENEŠ, Libor. *Přehled svařování*. Praha: ČVUT, dostupné z: https://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
- [35] PRŮVODCE SVÁŘEČE. *Pracovní polohy při svařování*. [online]. [cit. 2025-04-19]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/radce-svarece/pracovni-polohy-pri-svarovani/>
- [36] BEČKA, Jan. *Konstrukční zásady – svarové spoje*. [online]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, [cit. 2025-04-19]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/~beckajan/predn_design_KON_I_5.pdf
- [37] MITCalc. *Svařování – návrh a kontrola svarových spojů*. [online]. [cit. 2025-04-19]. Dostupné z: <https://www.mitcalc.com/doc/welding/help/cz/weldingtxt.htm>
- [38] BARTÁK, Jiří. *Svařování – obecné informace o metodách a postupech*. [online]. Plzeň: Škola WELDING, 1. 3. 2012 [cit. 2025-04-19]. Dostupné z: <https://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [39] SIMPLEWELD. *Welding Porosity: Causes, Types, and Prevention* [online]. [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://simpleweld.com/blogs/weldipedia/welding-porosity>

Seznam příloh

Příloha A Doplnující informace k vybraným kapitolám

Příloha B Svařování

Příloha C Chemická analýza

Příloha A: Železniční cisternová doprava

A.1 RID

Řád pro mezinárodní přepravu nebezpečných věcí (RID – Regulation Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail). RID je přípojkem C Úmluvy o mezinárodní železniční dopravě (COTIF – Convention concerning International Carriage by Rail). Tento řád upravuje podmínky pro přepravu nebezpečných věcí po železnici na území smluvních států.

RID definuje nebezpečné věci, které jsou z přepravy vyloučeny, a naopak seznam látek, jejichž přeprava je povolena, včetně specifických požadavků, které musí být při této přepravě splněny. Stanovuje klasifikaci nebezpečných věcí, včetně klasifikačních kritérií a příslušných zkušebních metod. Dále upravuje používání obalů, včetně pravidel pro společné balení a používání cisteren, jako jsou nesnímatelné cisterny, snímatelné cisterny, cisternové kontejnery a další speciální vozidla.

Dále RID specifikuje postupy před odesláním, které zahrnují nápis, bezpečnostní značky, označování dopravních prostředků a požadované doklady. Obsahuje ustanovení o konstrukci, zkoušení a schvalování obalů a cisteren a upravuje používání dopravních prostředků, včetně nakládky a vykládky. Důležitou součástí jsou bezpečnostní značky, které se používají na vozech a přepravních jednotkách, včetně oranžových tabulek s UN kódem a Kemlerovým kódem. RID také vyžaduje jmenování bezpečnostních poradců, kteří jsou odpovědní za pomoc při zabránění rizikům při přepravě nebezpečných věcí.

Nejnovější aktualizace pravidel vstoupila v platnost 1. ledna 2023, v souladu s článkem 35 § 3 Úmluvy, a začala platit i pro Českou republiku na základě Sdělení Ministerstva zahraničních věcí č. 14/2023 Sb.m.s. [2]

A.2 Historie cisternového vozu

Po Americké občanské válce prudce vzrostla těžba ropy v severozápadní Pensylvánii, což vedlo k potřebě efektivnější dopravy. Po železnici se původně ropa přepravovala v dřevěných sudech (barelech), které se ručně nakládaly na plošinové vozy, což bylo časově i fyzicky náročné, drahé a množství přepravené ropy bylo omezené. Řešení přinesli v roce 1865 bratři James a Amos Densmorovi, kteří navrhli první železniční cisternový vůz. [6]

Jejich konstrukce spočívala v připevnění dvou velkých dřevěných nádrží na plošinový vůz, což umožnilo přepravu ropy ve velkém objemu. Každá nádrž byla upevněna pomocí rámové konstrukce a speciálních šroubů, které zajišťovaly stabilitu a zabraňovaly nárazům při pohybu vozu. Nádrže měly plnicí otvory chráněné kryty proti dešti a nečistotám a vypouštěcí kohoutky na dně pro snadnou manipulaci s kapalinou. Na

bocích vozu byly schůdky a lávka, které umožňovaly snadný přístup pro obsluhu. Patent na tento vynález získali 10. dubna 1866. [7]

První testovací přeprava proběhla v září 1865 a do roku 1866 už byly v provozu stovky těchto vozů. Nový systém snížil náklady na dopravu a zvýšil efektivitu přepravy.

Navzdory výhodám měly cisterny bratrů Densmorových i značné nedostatky. Vozy byly nestabilní, nádrže byly náchylné k únikům a jejich kapacita byla omezená. Proto byly brzy nahrazeny bezpečnějšími horizontálními válcovými cisternami z ocelových plechů spojených nýty.

Přestože se Densmorovy cisterny používaly jen krátce, sehrály klíčovou roli ve vývoji železniční dopravy ropy a položily základ moderním cisternovým vozům. [6]

A.3 Mezinárodní číselné označení vozu

Mezinárodní číselné označení železničních vozů se vztahuje na všechny členské podniky Mezinárodní železniční unie (UIC). Jedná se o systém dvanáctimístných identifikačních čísel, který umožňuje evidenci železničních nákladních vozů. Toto dvanáctimístné číslo je strukturované do pěti skupin číslic zvláštního významu. Ty mají následující pořadí:

- **Kód interoperability** (1. a 2. číslice)
Tento kód určuje, zda je vůz způsobilý k použití pro vnitrostátní nebo mezinárodní provoz, vlastníka vozu a systém pojezdu vozu. Poblíž tohoto kódu se nachází značka, která vyjadřuje schodu s předpisy pro používání vozů v mezinárodním provozu. Tato značka je složena ze tří písmen – RIV nebo PPV.
- **Kód země, v níž je vůz registrován** (3. a 4. číslice)
Kód země, kde je vůz registrován je stanoven Vyhláškou UIC 920-14. Kód pro Českou republiku je číslo 54.
- **Přepravně-technické parametry vozu** (5. až 8. číslice)
Třetí kombinace čísel popisuje technické informace o voze. První číslo číslice např. popisuje řadu daného vozu. Pro označení kotlového vozu se používá číslice 7. Zbylá čísla popisují konstrukční varianty daného vozu. Přesný význam číslic popisuje Vyhláška UIC 438-2.
- **Číslo vozu v konstrukční řadě** (9. až 11. číslice)
Čtvrtá skupina čísel se skládá ze tří číslic, které označují pořadové číslo vozu v dané výrobní sérii.
- **Kontrolní číslice** (12. číslice)
Poslední číslice je od ostatních oddělena pomlčkou a slouží jako kontrolní číslo. Pomáhá ověřit správnost celého identifikačního čísla vozu. Tuto číslici určuje postup ve Vyhlášce UIC 913. [9]

A.4 Pojezdy (podvozky)

Oproti rámovým nákladním vozům umožňuje podvozkové uspořádání železničních vozů zvýšení délky a únosnosti při zachování přijatelného nápravového tlaku. Podvozek je typ pojezdu, který má vlastní rám a celý se může pohybovat vůči spodku skříně vozu, což zlepšuje průjezd oblouky a lépe se přizpůsobuje nerovnostem železničních tratí. Tato koncepce snižuje boční i vertikální rázy. [12]

Podvozek Y25

V období přelomu 60. a 70. let Mezinárodní železniční unie (UIC) po sérii zkoušek, výzkumů a mezinárodních jednání stanovila jednotný standard pro čtyřnápravové nákladní vozy. Jako optimální řešení byl zvolen francouzský podvozek Y 25 s rozvorem 1800 mm, jenž byl následně přijat jako unifikovaná konstrukce v souladu s předpisem UIC 510-1. Podvozek Y25 je jedním z nejrozšířenějších dvounápravových podvozků pro nákladní železniční vozy v Evropě. [12]

Konstrukce podvozku Y25

Existuje několik verzí tohoto podvozku. Jednotlivé verze se liší nosností a konstrukčními detaily. Hlavní varianty mají nosnost 20, 22,5 a 25 tun. Dále tyto varianty mohou být v kombinaci s čelníkovým nebo bezčelníkovým provedením. Čelníkové podvozky jsou konstrukčně robustnější, protože jejich čelník slouží především jako opora pro brzdové zařízení. Na celkové zatížení má jen minimální vliv. Naopak bezčelníkové podvozky jsou konstrukčně jednodušší a lehčí, což umožňuje zvýšit užitečné zatížení vozu. Výběr dané koncepce závisí na konkrétním typu vozu, přepravovaném nákladu nebo provozních požadavcích. Nosnost jednotlivých verzí je označena velkými písmeny, s možností dalších specifikací malými písmeny a číslicemi. [12]



Obr. 30 Podvozek Y25 Lsd vyráběný firmou Nymwag CS

Mezi hlavní konstrukční prvky podvozku Y25 patří:

- **Rám podvozku**

Rám podvozku je svařovaná ocelová konstrukce tvořená podélníky, příčníky a výztuhami. U podvozku Y 25 se skládá ze dvou podélníků profilu "I", jednoho příčníku, dvou čelníků a čtyř podélných výztuh profilu "U".

Příčník nese kulovou tornu a kluznice pro uložení skříně vozu. Brzdové konzoly jsou přivařeny k příčníku a čelníkům. Podélné výztuhy slouží k upevnění brzdových součástí.

Na spodní straně podélníků jsou ocelolitinové rámy pro uložení pružin a vedení dvojkolí, doplněné záchytkami pro jejich zajištění. [12]

- **Vedení a vypružení ložiskové skříně**

Podvozky Y 25 bývají osazovány ložiskovými skříněmi s válečkovými ložisky. Skříně jsou upevněny pomocí přírubové a koncové desky, zatímco těsnicí prvky zajišťují ochranu proti nečistotám.

Vedení dvojkolí je založeno na rozsochovém uspořádání, které kromě vedení zároveň plní i tlumicí funkci díky tření mezi otěruvzdornými plochami. Potřebný přítlak těchto ploch zajišťuje systém podle Lenoira, který využívá našikmené závěsky pružin k vyvození přítlačné síly. Ložiskové skříně jsou v podélném směru vedeny téměř bez vůle, v příčném směru s malou vůlí umožňující nezbytné boční pohyby.

Vypružení je tvořeno sadami válcových pružin, kde menší vnitřní pružina začne působit až při větším zatížení. Díky progresivnímu vypružení je minimalizován pokles nárazníků vůči kolejnici. [12]

- **Uložení skříně vozu na podvozek**

Skříň železničního vozu je na podvozek Y 25 připevněna prostřednictvím kulové torny a odpružených postranních kluznic. Horní část torny je upevněna k hlavnímu příčníku spodku vozu, zatímco spodní část je přivařena k příčníku podvozku.

Hlavní část svislého zatížení přenáší torna, zatímco postranní kluznice slouží ke stabilizaci vozové skříně a přenášejí pouze menší část zatížení. Kulová torna zároveň přenáší všechny síly mezi skříní vozu a podvozkem ve vodorovné rovině. Odpružené postranní kluznice jsou neustále zatíženy částí hmotnosti vozu a částečně tak odlehčují tornu. Jejich třením o opěrku na hlavním příčníku spodku skříně vozu vzniká třecí moment, který tlumí natáčivé pohyby podvozku a zajišťuje jeho stabilitu při vyšších rychlostech na přímé koleji. [12]

- **Brzdový systém**

Podvozky Y 25 bývají vybaveny špalíkovou brzdou, kde brzdná síla prochází mechanickým převodem k brzdovým zdržím. Pro rychlosti do 100 km/h se používají jednošpalíkové zdrže, pro 120 km/h dvojšpalíkové.

U vozů s vyšším kilometrickým proběhem může být výhodnější kotoučová brzda nebo jejich kombinace. [12]

A.5 Současně vyráběné konstrukce

V této kapitole budou popisovány cisternové vozy velmi významných výrobců v Evropě. Každý z těchto výrobců se specializuje na vývoj a výrobu železničních nákladních vozů, přičemž cisternové vozy zaujímají důležitou část jejich produktového portfolia. Popis jednotlivých typů vozů zahrnuje jejich objemové varianty, základní konstrukční charakteristiky a oblasti použití.

A.5.1 Cisternové vozy Nymwag CS

Společnost Nymwag CS byla založena v roce 2019 s výrobním závodem v Nymburce. Jedná se o největšího výrobce nákladních železničních vozů v České republice. Výroba probíhá na několika výrobních linkách a nabízí mimo cisternové vozy i vozy plošinové nebo výsypné.

Vozy jsou typicky postaveny na čtyřnápravových podvozcích typu Y25, jejich konstrukce zahrnuje svařovaný páteřový rám s předstávkou a lomenou ocelovou nádrží, která je k předstávkám přišroubována nebo přivařena. Standardní rozchod dvojkolí činí 1435 mm, maximální rychlost vozů je 120 km/h a maximální hmotnost dosahuje 90 000 kg.

Vozy jsou konstruovány v souladu s mezinárodními normami RID, TSI a EN a nesou označení TEN GE, které zajišťuje jejich interoperabilitu v rámci evropského železničního sítě. V nabídce společnosti nalezneme tyto typy cisternových vozů. [23]

- Zacns 88 m³, 98 m³
- Zacens 78 m³
- Zac(e)ns 40-75 m³ SPINA



Obr. 31 Vybrané cisternové vozy Nymwag CS [23]

A.5.2 Cisternové vozy Tatravagónka Poprad

Společnost Tatravagónka a.s. se sídlem v Popradě na Slovensku je jedním z největších evropských výrobců nákladních vozů. Společnost má tradici ve výrobě železničních vozů více než 100 let a disponuje širokým sortimentem železničních nákladních vozů. Mezi cisternovými vozy nalezneme verze o objemech od 40 m³ až po 117 m³ určené k přepravě lehkých i těžkých ropných produktů, stlačených plynů i chemických výrobků.

Konstrukce těchto vozů vychází z páteřového rámu s představky, na který je uchycen válcový nebo lomený kotel. Převážní kapacity i technické parametry jako je maximální zatížení 90 000 kg nebo rychlost 120 km/h odpovídají předpisům TSI, RID, UIC i normám EN a ISO. Všechny typy cisternových vozů jsou osazovány dvounápravovými podvozky Y25 v různých verzích s rozchodem dvojkolí 1435 mm. Tatravagónka vyrábí například tyto typy. [24]

- Zacens 64 m³, 73 m³, 80 m³
- Zacns 44 m³, 54 m³, 62 m³, 88 m³, 93 m³
- Za(c)ns 88 m³, 89 m³, 98 m³
- Zaens 88 m³
- Zags 117 m³
- Zagns 54 m³, 85 m³
- Zans 40 m³, 88 m³, 95 m³



Obr. 32 Vybrané cisternové vozy Tatravagónka Poprad [24]

A.5.3 Cisternové vozy Duro Dakovič

Společnost Duro Đaković vznikla v roce 1921 a nyní má svůj hlavní výrobní závod ve městě Slavonski Brod v Chorvatsku. Zabývá se mimo jiné i výrobou nákladních vagonů a obrněných vozidel.

Tato společnost nabízí kotlové vozy Zacns a Zacens s objemem od 40 m³ do 98 m³. Tyto vozy jsou určeny k přepravě kapalných, často teplotně citlivých a nebezpečných látek, jako jsou chemikálie nebo ropné produkty. Vozy se liší objemem nádrží a konstrukčními prvky podle typu přepravované látky.

Nádrže jsou válcové, vyrobené z chemicky odolných materiálů. Některé kotle jsou vyráběné ohřevem a izolací nebo nerezové. Výbava zahrnuje bezpečnostní prvky jako tlakové ventily či nouzové uzávěry. Vozy splňují mezinárodní přepravní normy RID, TSI, EN a nesou označení TEN GE pro interoperabilní železniční provoz v Evropě. [25][26]

- Zacns 45 m³, 62 m³, 88 m³, 98 m³
- Zacens 40 m³, 59 m³, 72 m³, 78 m³



Obr. 33 Vybrané cisternové vozy Duro Dakovič [26]

A.5.4 Cisternové vozy Greenbrier Europe

Greenbrier Europe je přední evropský výrobce nákladních železničních vozů, který vznikl sloučením americké skupiny The Greenbrier Companies a Astra Rail Management v roce 2017. Výroba probíhá ve výrobních závodech v Polsku, Rumunsku a Turecku. Nabízí širokou škálu cisternových vozů určených pro přepravu nebezpečných kapalin, minerálních olejů, chemikálií i plynných látek.

Společnost vyrábí nákladní vozy s kapacitami v rozmezí 73 až 123 m³. Všechny typy jsou standardně vybaveny dvěma dvounápravovými podvozky Y25. Nosnou část konstrukce tvoří páteřový rám s představky, ke kterému jsou pomocí svarů nebo šroubů připevněny lomené nebo přímé kotle.

Vozy mají standardní rozchod 1435 mm, dosahují maximální rychlosti 120 km/h a jejich maximální hmotnost činí 90 000 kg. Konstrukční řešení odpovídá požadavkům předpisů TSI, RID, UIC a norem DIN a EN. Mezi vyráběné kotlové vozy patří například tyto. [27]

- Zacens 73 m³, 79 m³
- Zacns 98 m³
- Za(c)ns 88 m³, 97 m³
- Zaens 73 m³
- Zags 53 m³, 103 m³, 106 m³, 113 m³, 117 m³, 123 m³
- Z08D 102 m³



Obr. 34 Vybrané cisternové vozy Greenbrier Europe [27]

Výše uvedené výrobky a údaje byly převzaty z oficiálních katalogů a webových stránek jednotlivých výrobců. Z důvodu průběžného vývoje produktových řad může docházet k aktualizacím parametrů i typů vyráběných vozů.

Příloha B: Svařování

B.1 WPS a WPQR

WPS (Welding Procedure Specification) je písemně zpracovaný a kvalifikovaný svařovací postup, který stanovuje přesné parametry a podmínky pro provedení svaru tak, aby splňoval požadovanou kvalitu a provozní bezpečnost. Tento postup se vytváří na základě předchozích zkušeností, platných norem a ověřovacích zkoušek. Slouží jako základní dokument pro plánování svařovacích operací ve výrobě i při opravách, a to u výrobků, u nichž by selhání svaru mohlo ohrozit mechanickou stabilitu nebo těsnost.

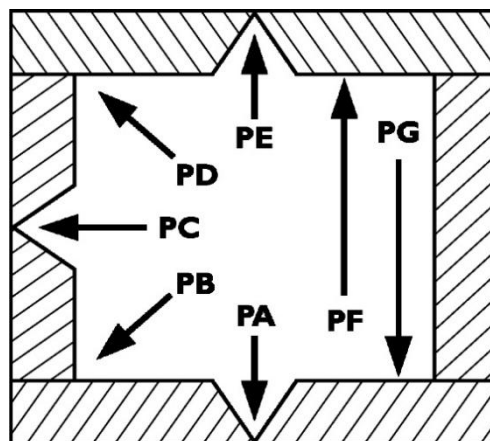
WPQR (Welding Procedure Qualification Record) je kvalifikační certifikát, který potvrzuje, že svařovací postup uvedený ve WPS byl prakticky odzkoušen. Získává se po provedení kontrolních svarů a jejich následném vyhodnocení pomocí nedestruktivních (NDT) a destruktivních (DT) zkoušek podle stanovených norem. Tento dokument slouží jako důkaz, že navržený postup splňuje požadavky na pevnost, celistvost a další provozní nároky. [29]

B.2 Polohy svařování

Svařování lze provádět v různých prostorových polohách, přičemž volba vhodné polohy má významný vliv na kvalitu svaru, produktivitu práce a celkovou rentabilitu výrobního procesu. Pro zajištění správného umístění svařovaných dílů se často používají svařovací přípravky, tzv. polohovadla, která umožňují nastavit optimální pracovní podmínky. [34]

Hlavní polohy u tupých a koutových svarů:

- PA** poloha vodorovná shora
- PB** poloha vodorovná šikmo shora
- PC** poloha vodorovná
- PD** poloha vodorovná šikmo nad hlavou
- PE** poloha vodorovná nad hlavou
- PF** poloha svislá nahoru
- PG** poloha svislá dolů [35]

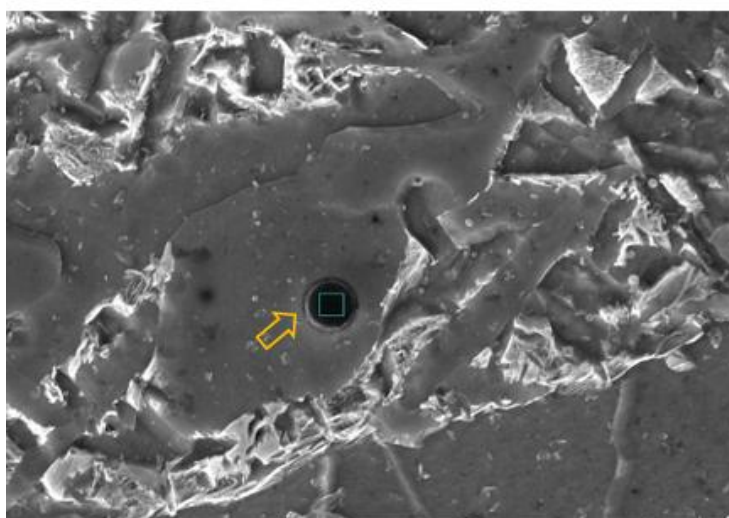


Obr. 35 Ilustrace svařovacích poloh [35]

Příloha C: Chemická analýza

číslo zprávy/protokolu :
 datum měření : 04.4.2025
 číslo vzorku: 35-P1
 číslo/typ analýzy : 2/plošná

fáze:
 oblast anal.: metalogr.vybrus
 eV/PC/WD: 30/6/16,7



Acquisition 4070 Date: HV:30.0kV Puls th.:24.55kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	11.13	11.58	26.68	1.32
Mg	12	K-series	0.76	0.79	1.19	0.07
Al	13	K-series	11.75	12.23	16.71	0.61
Si	14	K-series	5.61	5.84	7.66	0.28
Ca	20	K-series	6.19	6.44	5.93	0.21
Ti	22	K-series	0.73	0.76	0.58	0.05
Mn	25	K-series	6.86	7.14	4.79	0.20
Fe	26	K-series	53.06	55.23	36.46	1.36
Total:			96.08	100.00	100.00	

