

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Diplomová práce

Bodové svařování

Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Diplomant: Bc. Michal Miláček

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Michal Miláček

Procesní inženýrství
Technologická zařízení staveb

Název práce

Bodové svařování

Název anglicky

Spot welding

Cíle práce

- shromáždit informace o technologii odporového svařování se zaměřením na svařování bodové,
- na základě provedeného experimentu posoudit pevnost bodových svarů.

Metodika

- současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- cíl práce a metody jejího zpracování,
- výsledky experimentů a jejich diskuse,
- závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

odporové svařování; Jouleovo teplo; pevnost bodových svarů; laboratorní zkoušky

Doporučené zdroje informací

BERNASOVÁ, E.: Svařování. Praha, SNTL 1987. 200 s.

BLAŠČÍK, F. aj.: Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarovania. Bratislava, ALFA 1987. 830 s.

BROŽEK, M.: Working variables optimization of resistance spot welding. Manufacturing Technology. 2014, 14 (4), s 522-527.

Časopisy zahraniční (<https://www.sic.czu.cz/cs/r-8833-odborne-database/r-8883-infozdroje>) a tuzemské (Manufacturing Technology, MM Průmyslové spektrum, SDSM – Svařování, dělení, spojování materiálů, Strojírenská technologie, Strojářstvo/Strojírnoství, Svět svaru, Technický týdeník, Zváranie/Svařování)

KŘÍŽ, R., VÁVRA, P.: Strojírenská příručka. Svazek 8. Praha, SCIENTIA 1998. 256 s.

KUNCIPÁL, J., PILOUS, V., DUNOVSKÝ, J.: Nové směry ve svařování. Praha, SNTL 1984. 292 s.

Sborník "Moderní technologie pro spojování tenkých plechů". Praha, SVZP 1997. 96 s.

VALAEE-TALE, M., SHEIKHI, M., MAZAHERI, Y., MALEK GHAINI, F., USEFIFAR, G. R.: Criterion for predicting expulsion in resistance spot welding of steel sheets. Journal of Materials Processing Technology. 2020, 275, 116329.

WEMAN, K.: Welding processes handbook. Cambridge, Woodhead 2003. 193 s.

ZHANG, H., SENKARA, J.: Resistance welding: fundamentals and applications. 2nd Edition. Boca Raton, CRC Press 2012. 436 s.

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 20. 2. 2020

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 24. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 31. 08. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Bodové svařování" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.5.2021

Poděkování

Děkuji prof. Ing. Milanovi Brožkovi, CSc. za vstřícný přístup, konzultace a cenné připomínky při vedení této diplomové práce. Dále děkuji paní Alexandře Novákové za ochotnou pomoc při práci na experimentální části.

Abstrakt: Diplomová práce se zabývá tématem "Bodové svařování". V teoretické části popisuje historii a vývoj svařování, rozdělení svařovacích metod, hlavní metody odporového svařování, parametry pro svařování a využití Jouleova tepla. Dále popisuje jednotlivé metody odporového svařování s důrazem na odporové bodové svařování, které je hlavním tématem experimentální části práce. Následující kapitoly popisují zkoušky odporových svarů. Experimentální část je zaměřena na stanovení pevnosti spojů vytvořených bodovým svařováním v závislosti na druhu materiálu, druhu úpravy povrchu materiálu a svařovacím časem. Hodnocení experimentální části bylo provedeno na základě výsledků statické smykové zkoušky. V poslední části diplomová práce zahrnuje ekonomické zhodnocení, ve kterém je zjištěna cena za jeden svar.

Klíčová slova: Jouleovo teplo; laboratorní zkoušky; odporové svařování; pevnost bodových svarů

Spot welding

Summary: The diploma thesis deals with the topic "Spot welding". The theoretical part describes the history and development of welding, the division of welding methods, the main resistance welding methods, the parameters for welding and the use of Joule heat. It also describes the various methods of resistance welding with an emphasis on resistance spot welding, which is the main topic of the experimental part of the work. The following chapters describe the tests of resistance welds. The experimental part is aimed at determining the strength of joints formed by spot welding depending on the type of material, the type of material surface treatment and the welding time. The evaluation of the experimental part was based on the results of the static tension-shear test. In the last part, the thesis includes an economic evaluation in which the price per weld is established.

Keywords: Joule heat; laboratory tests; resistance welding; strength of spot welds

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů

Seznam obrázků

Seznam tabulek

1	Úvod.....	2
2	Cíl práce a metodika	3
2.1	Cíl práce.....	3
2.2	Metodika	3
3	Teoretická východiska	4
3.1	Historie a současný vývoj v oblasti svařování.....	4
3.2	Rozdělení svařování.....	5
3.3	Odporové svařování.....	6
3.3.1	Svařovací režimy	6
3.3.2	Svařovací program	7
3.4	Bodové svařování	8
3.4.1	Způsoby vytváření bodových svarů	9
3.4.2	Teplo nutné ke svařování	11
3.4.3	Přechodové odpory.....	11
3.4.4	Parametry svařování.....	12
3.4.5	Tepelná rovnováha	14
3.4.6	Elektrody pro bodové svařování	15
3.4.7	Zařízení pro bodové svařování.....	17
3.4.8	Vady bodových svarů.....	19
3.5	Švové svařování.....	20
3.6	Výstupkové svařování	20
3.7	Odporové stykové svařování	22
3.7.1	Stlačovací stykové svařování	22
3.7.2	Odtavovací stykové svařování	22
3.8	Zkoušky odporových svarů.....	23
3.8.1	Destruktivní zkoušky	23
3.8.2	Nedestruktivní zkoušky.....	26
4	Experimentální část práce.....	29
4.1	Příprava zkušebních vzorků.....	29

4.1.1	Rozměry a materiál zkušebních vzorků	29
4.1.2	Čištění povrchu	30
4.2	Svařování zkušebních vzorků	30
4.2.1	Svařovací kleště	32
4.2.2	Řídicí jednotka	32
4.3	Zkouška pevnosti smykem	33
5	Zhodnocení výsledků	37
5.1	Matematické vztahy pro vyhodnocení naměřených hodnot	37
5.2	Dílčí zhodnocení	38
5.2.1	Skupina číslo 1	39
5.2.2	Skupina číslo 2	40
5.2.3	Skupina číslo 3	40
5.2.4	Skupina číslo 4	42
5.2.5	Skupina číslo 5	43
5.2.6	Skupina číslo 6	44
5.3	Souhrnné zhodnocení	44
5.3.1	Porovnání při svařovacím času 0,30 s	47
5.3.2	Porovnání při svařovacím času 0,40 s	47
5.3.3	Porovnání při svařovacím času 0,60 s	48
5.3.4	Porovnání při svařovacím času 0,80 s	49
5.3.5	Porovnání při svařovacím času 1,0 s	49
5.3.6	Porovnání při svařovacím času 1,30 s	50
5.4	Ekonomické zhodnocení	51
6	Závěr	55
7	Seznam použitých zdrojů	58

Seznam použitých zkratk a symbolů

Q	Množství vzniklého tepla	J
R _c	Celkový elektrický odpor soustavy	Ω
I _s , I _{max}	Intenzita svařovacího proudu	A
t	Doba průchodu svařovacího proudu	s
R _{d1,2}	Odpory dotyku mezi elektrodami a svařovanými materiály	Ω
R _k	Přechodový odpor mezi svařovanými materiály	Ω
R _{m1,2}	Přechodové odpory materiálů	Ω
R _{e1} , R _{e2}	Odpor elektrod	Ω
F _s	Svařovací síla	N
b, b _{1,2}	Tloušťka plechu	mm
R _v	Odpor vodiče	Ω
ρ _m	Hustota materiálu	kg/m ³
l	Délka vodiče	m
S	Plocha průřezu vodiče	m ²
d _{1,2}	Šířka elektrody	mm
C _{max}	Obsah uhlíku ve svařované oceli	%
\bar{x} , \bar{x}_1 , \bar{x}_2	Aritmetický průměr	-
x _i	Naměřená hodnota	-
n, n ₁ , n ₂	Počet naměřených hodnot	-
R	Variační rozpětí	-
x _{max}	Maximální hodnota souboru	-
x _{min}	Minimální hodnota souboru	-
σ	Směrodatná odchylka	-
s ² , s ₁ ² , s ₂ ²	Rozptyl hodnot	-
v	Variační koeficient	-, %
T	Testovací kritérium	-
N _{s1}	Náklady na jeden zkušební svar bez odmaštění	Kč/ks
N _{kWh}	Cena za kWh	Kč
P	Příkon bodové svářečky	kW

N_{sv}	Hodinové náklady svářeče	Kč/h
p	Počet svarů za hodinu	ks/h
$N_{odmaštění}$	Náklady na odmaštění	Kč
C_{aceton}	Cena acetonu	Kč/l
S_{aceton}	Spotřeba acetonu na odmaštění jednoho vzorku	l
N_o	Náklady na mzdu obsluhy	Kč/h
t_o	Doba potřebná k odmaštění jednoho vzorku	h
N_{s2}	Náklady na jeden zkušební svar při odmaštění vzorku	Kč/ks

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma způsobů odporového svařování	6
Obr. 2 Svařovací program odporového svařování.....	8
Obr. 3 Princip bodového svařování	8
Obr. 4 Základní druhy bodového svařování	9
Obr. 5 Přímé bodové svařování	10
Obr. 6 Nepřímé bodové svařování.....	11
Obr. 7 Jednotlivé složky elektrického odporu	12
Obr. 8 Odstranění tepelné nerovnováhy bodových svarů	15
Obr. 9 Chlazení elektrod vodou.....	16
Obr. 10 Typy elektrod	16
Obr. 11 Ruční bodová svářečka.....	18
Obr. 12 Stacionární bodová svářečka	18
Obr. 13 Robotické rameno pro bodové svařování	19
Obr. 14 Princip švového svařování	20
Obr. 15 Odporové výstupkové svařování	21
Obr. 16 Stykové stlačovací svařování	22
Obr. 17 Odtavovací stykové svařování.....	23
Obr. 18 Zkouška sekáčem bodového svaru	24
Obr. 19 Odlupovací zkouška bodového svaru.....	25
Obr. 20 Zkouška smykem bodového svaru	25
Obr. 21 Křížová zkouška bodového svaru.....	26
Obr. 22 Zkušební vzorek z plechů 1,5 mm + 1,5 mm	30
Obr. 23 Tepelně ovlivněná oblast bodového svaru	31
Obr. 24 Svařovací kleště BV 2.5.21	32
Obr. 25 Elektronická řídicí jednotka QX 12.1.....	33
Obr. 26 Destrukce bodového svaru – vytvořený svar	34
Obr. 27 Destrukce bodového svaru – svařovaný materiál.....	34
Obr. 28 Neporušený bodový svar	35
Obr. 29 Univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST	36
Obr. 30 Pevnost zkušebních vzorků ocel + ocel odmaštěné a ocel + ocel neodmaštěné	39
Obr. 31 Pevnost zkušebních vzorků pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné a pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné.....	41

Obr. 32 Pevnost zkušebních vzorků ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné a ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné.....	43
Obr. 33 Graf porovnání naměřených hodnot při všech svařovacích časech	45
Obr. 34 Graf souhrnného hodnocení nákladů při svařovacím času.....	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 Orientační hodnoty svařování pro tvrdý a měkký režim	7
Tabulka 2 Parametry svařovacích kleští BV 2.5.21	32
Tabulka 3 Parametry řídicí jednotky QX 12.1	33
Tabulka 4 Technické parametry stroje LabTest 5.50ST	36
Tabulka 5 Výsledky měření – zkušební vzorky ocel + ocel odmaštěné.....	39
Tabulka 6 Výsledky měření – zkušební vzorky ocel + ocel neodmaštěné.....	40
Tabulka 7 Výsledky měření – zkušební vzorky pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné	41
Tabulka 8 Výsledky měření – zkušební vzorky pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné	42
Tabulka 9 Výsledky měření – zkušební vzorky ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné	43
Tabulka 10 Výsledky měření – zkušební vzorky ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné	44
Tabulka 11 Náklady na jeden svar bez odmaštění povrchu a náklady na jeden svar s úpravou povrchu odmaštěním	52
Tabulka 12 Ceny plechových tabulí a zkušebních vzorků	54
Tabulka 13 Porovnání pevností spojů	54

1 Úvod

Svařování je pracovní postup spojování materiálů za působení tepla nebo tlaku nebo obou zároveň, při kterém zůstává zachována podstata spojovaného materiálu. Metod svařování je celá řada a ovlivňuje skoro všechny průmyslové obory a patří mezi významné strojírenské technologie. U některých oborů jako např. v automobilovém průmyslu je způsob spojování materiálů svařováním natolik důležitý, že by bez této technologie nemohl existovat. Ve většině vyráběného zboží v tomto oboru je zapotřebí svařování, a to hlavně z důvodů pevnosti, ceny a všestrannosti. Svařováním dosahujeme potřebné pevnosti spoje svařovaných materiálů s ohledem na ekonomičnost a jednoduchost. Jedním z druhů svařování je i bodové svařování, které patří do skupiny odporového svařování. Průchodem elektrického proudu vzniká mezi materiály přechodový odpor a dochází k vytvoření tepla potřebného k roztavení svařovaných materiálů. [1, 3, 28]

Teoretická část diplomové práce je rozdělena do několika kapitol. Nejprve je zde popsána historie svařování, která sahá až do doby bronzové. V následující kapitole je popsáno rozdělení svařovacích metod na hlavní kapitoly a rozdělení odporového svařování dle (ČSN) EN ISO 4063. Dále je popsána podstata odporového svařování a využití svařovacího tepla. Další kapitola se zabývá jednotlivými metodami odporového svařování a vzhledem k praktické části diplomové práce je největší důraz soustředěn na popis bodového svařování. Poslední kapitola teoretické části se zabývá zkouškami odporových svarů, které se dělí na zkoušky destruktivní a nedestruktivní. V praktické části byl experimentálním způsobem zjištěn vliv svařovacího času, druhu materiálu a způsobu úpravy povrchu materiálu na velikost síly nutné k porušení svarového spoje vytvořeného bodovým svařováním. V úvodní kapitole je popsána příprava plechů z rozdílných materiálů použitých pro výrobu zkušebních vzorků, výroba zkušebních vzorků, úprava povrchu materiálu odmaštěním a následná zkouška pevnosti svarů smykem na univerzálním stroji LabTest 5.50ST. Zkušební vzorky byly vytvořeny z plechů z nízkouhlíkové oceli a pozinkované oceli o tloušťce 1,5 mm. Plechy byly svařeny při různých svařovacích časech pomocí bodových svařovacích kleští BV 2.5.21. Výsledkem experimentu z praktické části je zjištění závislosti pevnosti svarů na svařovacím času, druhu materiálu a jeho povrchové úpravě. Svařovací proud je u použitých svařovacích kleští konstantní. Přítlačná síla elektrod byla nastavena na stálou hodnotu a měněn byl pouze svařovací čas. Závěrem je provedeno ekonomické zhodnocení a je vypočítána cena za jeden svar.

2 Cíl práce a metodika

V následujících kapitolách je popsán cíl diplomové práce a metodika. Kapitoly jsou dále rozděleny na dvě části, teoretická a experimentální.

2.1 Cíl práce

V teoretické části shromáždit informace o technologii svařování se zaměřením na svařování bodové a popsat obecnou charakteristiku jednotlivých metod využívaných k hodnocení kvality, jakosti a mechanických vlastností bodových odporových svarů. V experimentální části posoudit vliv úpravy materiálu odmaštěním na pevnost spoje ocelových materiálů, ocelových pozinkovaných materiálů a jejich vzájemnou kombinaci při různém nastavení svařovacího času. Následně zjistit velikost síly nutné k porušení bodového odporového svaru. Dále na postup, kterým k tomuto porušení došlo a na proměnlivost naměřených výsledků statické smykové zkoušky. Závěrem provést zhodnocení výsledků a jejich diskuzi.

2.2 Metodika

Teoretická část je vytvořena na základě prostudování odborné literatury, zdrojů dostupných na internetu, studijních materiálů, vědeckých a odborných článků a odborné konzultace. Tyto zdroje jsou uvedené v seznamu použitých zdrojů. Na základě získaných informací je rešeršní práce vypracována a získané vědomosti byly využity v experimentálním měření spojů vytvořených metodou odporového bodového svařování. Toto měření proběhlo na České zemědělské univerzitě v laboratořích Katedry materiálu a strojírenské technologie. Metodika experimentální části zahrnuje použití plechů o rozměrech 100 mm × 25 mm a tloušťce 1,5 mm. Plechy byly nastříhány z ocelových a ocelových pozinkovaných polotovarů. Celkem bylo takto zhotoveno 288 kusů ocelových plechů a 288 kusů ocelových pozinkovaných plechů, které byly dále rozděleny do tří skupin. Každá tato skupina byla dále rozdělena na dvě podskupiny, které se lišily přípravou povrchu, a to buď odmaštěním acetonem, nebo bez povrchové úpravy. Celkem bylo vytvořeno 288 kusů zkušebních vzorků, které byly vytvořeny ze dvou zkušebních plechů. Následně byla každá skupina vzorků svařena jiným způsobem při nastavení svařovacího času na hodnoty 0,30 s, 0,40 s, 0,60 s, 0,80 s, 1,0 s a 1,30 s. Takto vytvořené zkušební vzorky byly podrobeny zkoušce smykem na zkušebním stroji a byla vyhodnocena pevnost svarových spojů. Na základě těchto hodnot byla zjištěna závislost úpravy povrchu, druhu svařovaného materiálu a doba svařovacího času na pevnost bodového odporového spoje.

3 Teoretická východiska

V této části je nejprve popsána historie a současný vývoj v oblasti svařování. Další kapitoly popisují hlavní rozdělení a metody odporového svařování. Největší důraz je kladen na odporové bodové svařování. Dále je zde popsán princip, technologie a hlavní parametry pro odporové svařování. Následuje popis zkoušek odporových svarů.

3.1 Historie a současný vývoj v oblasti svařování

První zmínky o svařování nás zavedou do doby bronzové. V době železné se Egypťané a populace východního středomoří naučila svařovat železo a bylo nalezeno množství takto vyrobených železných nástrojů.

Ve středověku se rozšířilo tzv. kovářské svařování následkem rozvinutí kovářského řemesla, kdy se spojované předměty zahřejí a poté se následně kovářím spojí dohromady. Svařování, které lze znát z dnešní doby, bylo zaznamenáno až v 19. století. V roce 1836 objevem acetylenu bylo dosaženo svařování a řezání plynem. Vynálezem elektrického generátoru bylo podmíněno svařování elektrickým obloukem.

Použití tepla elektrického oblouku ke svařování bylo poprvé zřejmě využito ve Francii roku 1881, kde ho Auguste De Meritens využil pro svařování olověných desek pro akumulátory. První britský patent na svařování obloukem obdržel Nikolaj de Benardos se svým přítelem Stanislavem Olszewským roku 1885 a následně v roce 1887 také patent americký. Bylo to svařování uhlíkovými elektrodami, které umožňovalo svařování pod vodou.

Svařování za použití kovové elektrody bylo prvně patentováno roku 1890 a následně okolo roku 1907 byla patentována první obalená kovová elektroda. Mezitím bylo také představeno odporové svařování (bodové, výstupkové, švové a svařování na tupo). V roce 1903 bylo vynalezeno svařování termitem, které bylo poprvé využito pro svařování kolejnic.

V roce 1920 společnost General Electric představila používání automatického svařování v automobilovém průmyslu k navařování opotřebovaných hřídelí motorů. V roce 1953 došlo k význačnému objevu, kdy byl pro svařování použit ochranný plyn, a to oxid uhličitý (CO₂). Plazmové svařování bylo vynalezeno roku 1958. [2, 3, 28]

Technický a technologický vývoj ve svařování je velmi ovlivněn součinností a vývojem oborů jako je informatika, elektrotechnika, elektronika, robotika a senzorika. Hlavním trendem ve svařování a spojování je inovace v aplikaci robotů a automatizace. Dále se usiluje o pokračující nárůst propojení s IT technikou a celkovou digitalizací procesů. Ve svařování platí, že si musíme počínat co nejefektivněji s co nejmenšími náklady a s tím spojenou spotřebu materiálových a energetických zdrojů. Splnění těchto podmínek lze dosáhnout použitím robotů a automatizovaných svařovacích buněk.

Další vývojové trendy souvisí s nástupem „čtvrté průmyslové revoluce“, kdy je nezbytné propojení lidské a strojové práce pro zlepšení výsledků. Pro tento pokrok je využíváno CNC strojů, robotů a mikroprocesorů. V současné době je bodové svařování nejvíce rozšířeno v automobilovém průmyslu pro svařování ocelových plechů o tloušťce 1 mm. Tato metoda je velmi produktivní a průměrná karoserie osobního automobilu obsahuje cca 5–6 tisíc bodových svarů. Svařovací pistole s obvykle legovanými měděnými elektrodami jsou řízeny roboty a jsou jich desítky v každé automobilové a výrobní lince. Tvar a velikost každého spoje je určen svařovacími parametry, elektrodami a postavením robota. [1, 3]

3.2 Rozdělení svařování

Svařování rozdělujeme dle normy (ČSN) EN ISO 4063 (050011). Tato norma definuje pro každou známou metodu svařování a pájení číselný kód s maximálním počtem 3 číslic. První číslice definuje hlavní skupinu svařovacích metod a rozdělení na hlavní skupiny je následovné:

- 1 Obloukové svařování (Arc welding)
- 2 Odporové svařování (Resistance welding)
- 3 Plamenové svařování (Gas welding, fuel gas welding (USA))
- 4 Tlakové svařování (Pressure welding)
- 5 Svařování svazkem paprsků (Beam welding)
- 6 Není obsazena
- 7 Ostatní způsoby svařování (Other welding processes)
- 8 Řezání a drážkování
- 9 Pájení tvrdé, měkké a do úkosu (Brazing, soldering and braze welding) [19, 20, 21, 28]

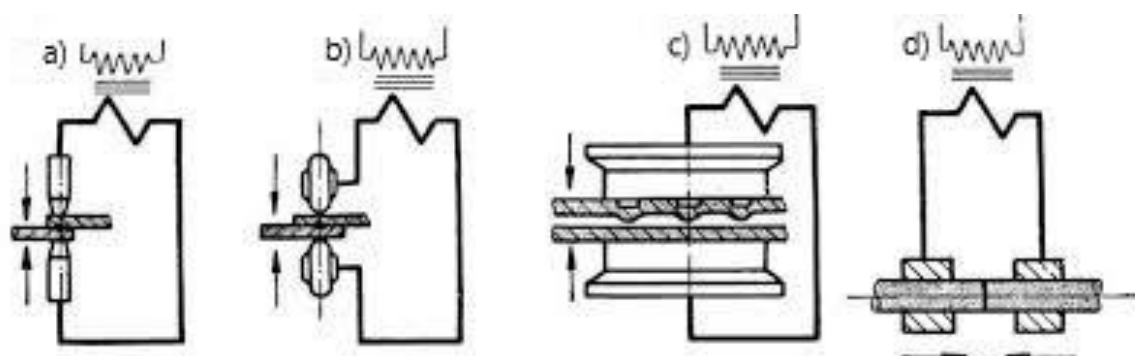
3.3 Odporové svařování

Při odporovém svařování se využívá odporového tepla (Jouleovo teplo), které vzniká průchodem svařovacího proudu svařovanými materiály. Tyto materiály tvoří část svařovacího okruhu. Působením elektrického odporu dochází v místě styku k roztavení materiálu a vytvoření metalurgického spoje. Na rozdíl od jiných technologií svařování (elektrickým obloukem, plamenem) vzniká teplo přímo ve svařovaných materiálech. Odporové svařování se řadí do skupiny tlakového svařování, protože při vytváření spoje je použita síla, která vytváří plastické deformace a svaření součástí. [28, 40]

Dle normy (ČSN) EN ISO 4063 (050011) se odporové svařování rozděluje (Obr. 1) na hlavní podskupiny:

- 21 Odporové bodové svařování (Spot welding, resistance spot welding (USA))
- 22 Odporové švové svařování (Seam welding, resistance spot welding (USA))
- 23 Odporové výstupkové svařování (Resistance projection welding, projection welding (USA))
- 24 Odtavovací stykové svařování (Flash welding)
- 25 Stlačovací stykové svařování (Resistance butt welding, projection welding (USA))
- 29 Ostatní metody odporového svařování (Other resistance welding processes) [19, 20, 21, 28]

Obr. 1 Schéma způsobů odporového svařování



a) svařování bodové, b) svařování švové, c) svařování na lisu výstupkové, d) svařování stykové

Zdroj: <https://adoc.pub/rozdelni-metod-tlakoveho-odporoveho-svaovani.html>

3.3.1 Svařovací režimy

Potřebné množství energie můžeme dodat do svaru použitím nižšího proudu a delšího času tzv. měkký režim nebo nastavením vyššího proudu a kratšího času tzv. tvrdý režim. [22]

Hranici mezi režimy bodového svařování nízkouhlikových ocelí charakterizují specifické hodnoty tlaku, proudu a času ve vztahu ke kontaktní ploše elektrody uvedené v Tab. 1.

Tabulka 1 Orientační hodnoty svařování pro tvrdý a měkký režim

Parametry	Měkký režim	Tvrdý režim
Svařovací tlak [MPa]	do 60	nad 80
Svařovací proud [A/mm ²]	do 150	nad 200
Svařovací čas [s]	0,1 – 1	0,01 – 0,1

Zdroj: [15]

Měkký režim

Svařovací proud malé intenzity a dlouhý svařovací čas. Měkký režim je charakteristický větším tepelným ovlivněním. Svarová čočka je relativně velmi vysoká a má hrubší dendritickou strukturu, která zhoršuje mechanické vlastnosti spoje. Svarová čočka má relativně malý průměr a tím zhoršuje únosnost spoje. Vzhledem k nízkým tlakům hrozí výstřik roztaveného jádra svaru. Elektrody jsou tepelně velmi namáhané v důsledku delšího styku a vyšší teploty pod povrchem kovu a z tohoto důvodu mají kratší životnost. V případě ohřátí materiálu až po povrch, zanechávají elektrody velké vtisky. Nízké přitlačné síly nestačí zejména při svařování tuhých profilů. V důsledku vyšších tepelných ztrát se snižuje účinnost a roste spotřeba elektrické energie. U tohoto režimu se dosahuje nižší produktivity práce. [8, 10, 11, 12, 15, 22]

Tvrdý režim

Svarová čočka má větší průměr, ale menší výšku. Na rozdíl od měkkého režimu vyžaduje krátké svařovací časy. Tento svařovací režim je produktivnější. Díky krátkodobému působení svařovací teploty (rychlé chladnutí svaru) má svarový kov jemnozrnnou strukturu. U tvrdých režimů je zapotřebí strojů velkých příkonů s dobrou energetickou přístupností. U tvrdého režimu se vyžadují vyšší výkony, vyšší přitlačné síly a odměřované časy v periodách. V dnešní výrobě, kdy se vyžadují jakostní spoje a hospodárny provoz se tvrdému režimu dává přednost. [9, 10, 12, 15, 22]

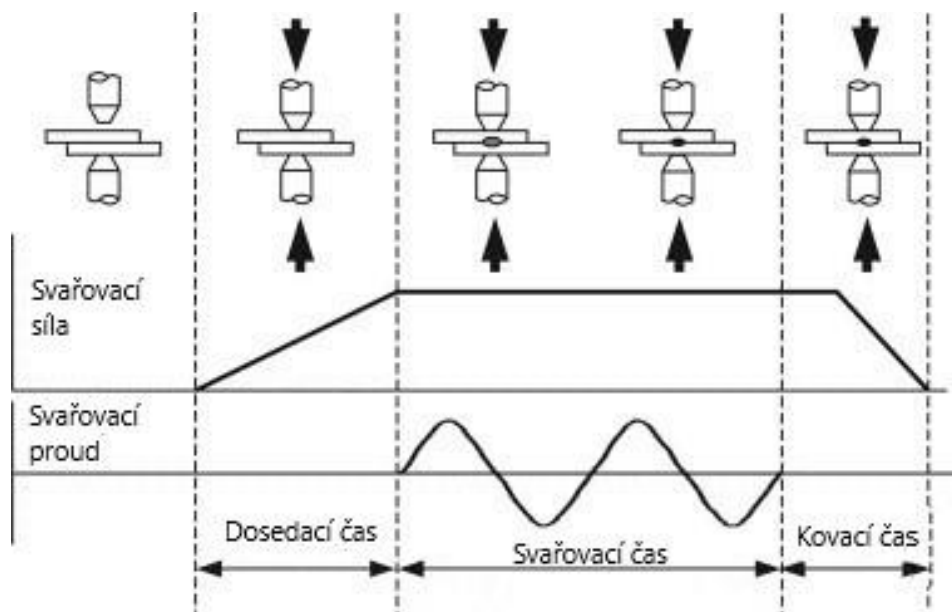
3.3.2 Svařovací program

Hlavní technologická zásada všech odporových svařovacích strojů je přivedení svařovacího proudu do svařovaného předmětu až při dosažení dostatečné svařovací síly, a to s určitým časovým zpožděním. [34]

Typický svařovací program pro bodové odporové svařování je zobrazen na Obr. 2. Dosedací čas je čas spojený s vytvořením potřebné svařovací síly pro průchod svařovacího proudu a závisí zejména na charakteristice svařovacího zařízení. Kovací čas je čas potřebný k udržení

svařovacího tlaku elektrod, poté co přestane proudit svařovací proud a k potřebnému zatuhnutí bodového svaru. [31]

Obr. 2 Svařovací program odporového svařování

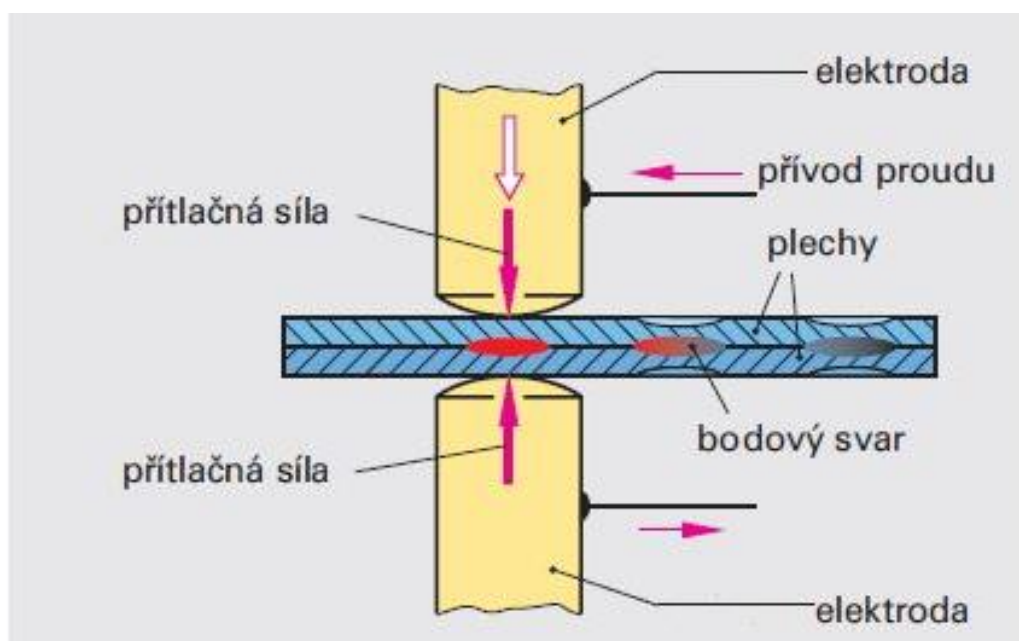


Zdroj: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306905002670>

3.4 Bodové svařování

Je metoda odporového svařování, při kterém vzniká bodový svar mezi svařovanými materiály stlačenými tyčovými elektrodami (Obr. 3). Bodový svar má rozměry přibližně stejné jako konce tyčových elektrod. Elektrody jsou přitlačovány do svaru po celou dobu svařovacího cyklu. [28]

Obr. 3 Princip bodového svařování



Zdroj: <https://www.batima.cz/odporove-svarovani>

Bodový spoj vzniká na rozhraní stlačených materiálů elektrodou. Elektrody stlačují materiály k sobě a průchodem elektrického proudu se materiály svaří. Průchodem elektrického proudu vzniká elektrický odpor, který vytváří dostatečné teplo v místě dotyku plechů a dojde ke svaření materiálů. Část tepla uniká vedením do materiálu a sáláním do okolního prostředí. Postupně tvořený svar v odporovém svařování je rozdělen do 5 odlišných etap, v následném pořadí: narušení povrchu, měknutí materiálu, zvyšování teploty z důvodu odporového zahřívání, tavení a vznik svaru pomocí tepla a svařovacího tlaku. Takto vytvořený spoj se nazývá svarová čoučka. Průměr bodového svaru často slouží ke zhodnocení kvality spoje a svařovacího procesu. [29, 40]

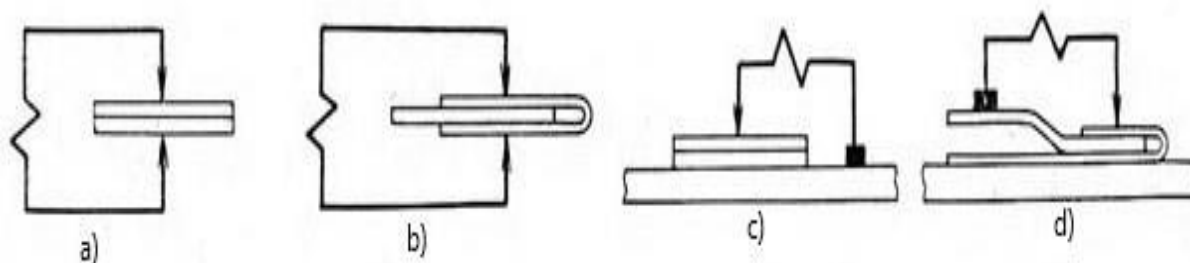
3.4.1 Způsoby vytváření bodových svarů

Uspořádání elektrod při bodovém svařování se dá rozdělit na dvě hlavní skupiny:

- **Přímé bodové svařování** – svary jsou vytvářeny přímo mezi elektrodami, které jsou umístěny souose z opačných stran svařovaných materiálů.
- **Nepřímé bodové svařování** – svary jsou vytvářeny mezi elektrodami, které jsou umístěny v různých osách z jedné strany svařovaných materiálů. [9, 10, 32]

Tyto skupiny svařování (Obr. 4) mohou být s bočním proudem, při kterém část sekundárního proudu odbočuje mimo vytvářené svařování, nebo bez bočního proudu, při kterém se vytváří jeden nebo více svarů a všechny sekundární proud protéká přes vytvářené svařování. [10, 11]

Obr. 4 Základní druhy bodového svařování



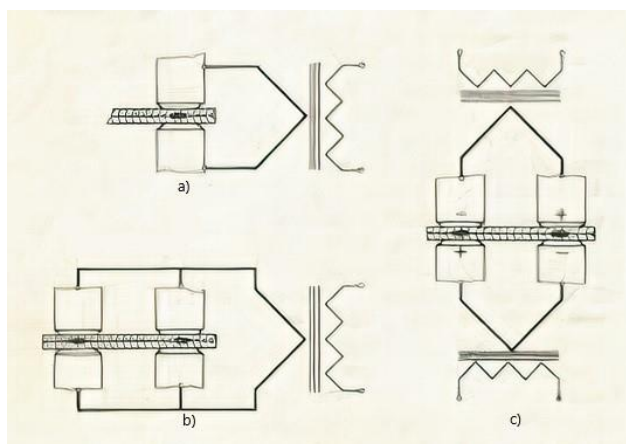
a) přímé bez bočního proudu, b) přímé s bočním proudem, c) nepřímé bez bočního proudu, d) nepřímé s bočním proudem.

Zdroj: <https://www.rockweld.cz/wp-content/uploads/2016/01/Z%C3%A1kladn%C3%AD-druhy-bodov%C3%A9ho-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD.jpg>

Při přímém svařování (Obr. 5) lze svařovat třemi způsoby:

- a) **Jednobodové** – stroj má dvě protiběžné elektrody, kde dolní elektroda je většinou pevná a horní je přitlačná. Svařuje se postupně vždy po jednom bodě. Tento druh svařování je nejrozšířenější.
- b) **Dvoubodové paralelní** – Na jeden transformátor jsou paralelně zapojeny dva páry protiběžných elektrod. Svařovací proud má dvě větve, dva obvody a dva body svařování, a proto se současně svařují dva body.
- c) **Dvoubodové sériové** – Vytvářejí se nejméně dva svary. Část proudu přechází i přes plechy. [10, 11, 32]

Obr. 5 Přímé bodové svařování



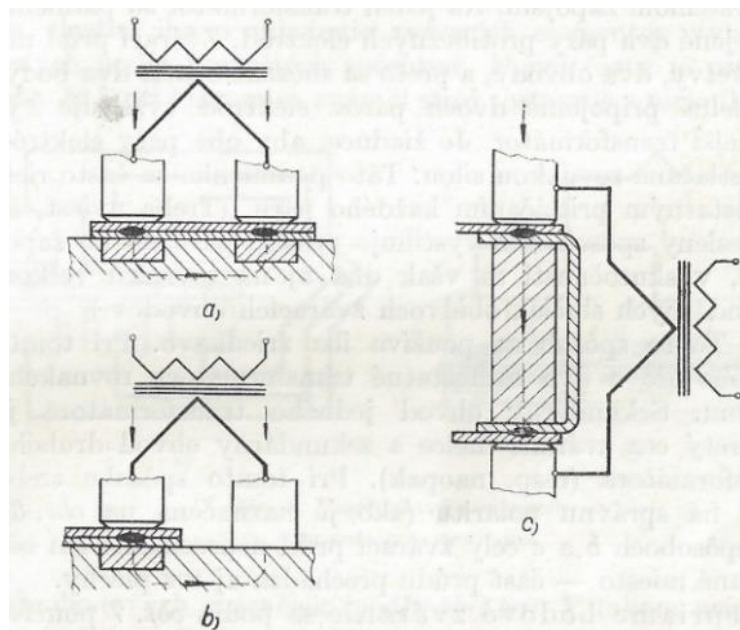
- a) Jednobodové s protiběžnými elektrodami, b) dvoubodové v paralelním zapojení, c) dvoubodové v sériovém zapojení.

Zdroj: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=128324

Při nepřímém bodovém (Obr. 6) svařování lze svařovat třemi způsoby, a to vždy v sériovém zapojení:

- a) **Dvoubodové s rovnoběžnými elektrodami** – proud z transformátoru přechází přes svařované materiály (vytváří svar), poté přechází přes měděnou podložku a vrací se zpět přes svařované materiály (vytváří svar) do transformátoru.
- b) **Jednobodové, jedna elektroda přivádí proud** – tento způsob se liší od způsobu a) tím, že se přivádí proud do podložky pouze přes jednu elektrodu a vytváří se pouze jeden svarový spoj.
- c) **Dvoubodové s protiběžnými elektrodami a proudovým mostem** – při tomto způsobu měděnou podložku nahrazuje měděný můstek. Ačkoli jsou elektrody orientované protiběžně jedná se o stejný případ jako při způsobu a). [10, 11, 32]

Obr. 6 Nepřímé bodové svařování



a) dvoubodové s rovnoběžnými elektrodami, b) jednobodové s rovnoběžnými elektrodami, c) dvoubodové s protiběžnými elektrodami a proudovým mostem.

Zdroj: [11]

3.4.2 Teplo nutné ke svařování

Teplo potřebné k ohřátí materiálu na svařovací teplotu vzniká při průchodu proudu velké intenzity (až 100 kA) a nízkého napětí (5 až 15 V) soustavou tvořenou horní a dolní elektrodou a svařovaným materiálem. Rychlost ohřevu je velmi vysoká a může dosahovat až 100 000 °C. K zahřátí a roztavení 1 gramu oceli je potřeba přibližně 1381 Joule. Teplo vzniklé průchodem svařovacího proudu je dáno Jouleovým zákonem:

$$Q = R_c \cdot I_s^2 \cdot t \text{ [J]} \quad (1)$$

- Q je množství vzniklého tepla [J],
- R_c je celkový elektrický odpor soustavy [Ω],
- I_s je intenzita svařovacího proudu [A],
- t je doba průchodu svařovacího proudu [s]. [4, 8, 22, 30, 34]

Z rovnice vyplývá, že zásadní podíl na vývinu tepla ve svařovaných materiálech má velikost svařovacího proudu. [40]

3.4.3 Přechodové odpory

Při odporovém svařování můžeme sledovat několik dílčích elektrických odporů (Obr. 7), jejichž součet se podílí na vzniku tepla. Každý z těchto odporů je funkcí teploty a hodnota závisí dále na kvalitě povrchů svařovaného materiálu a elektrod a na vzájemném tlaku mezi elektrodami.

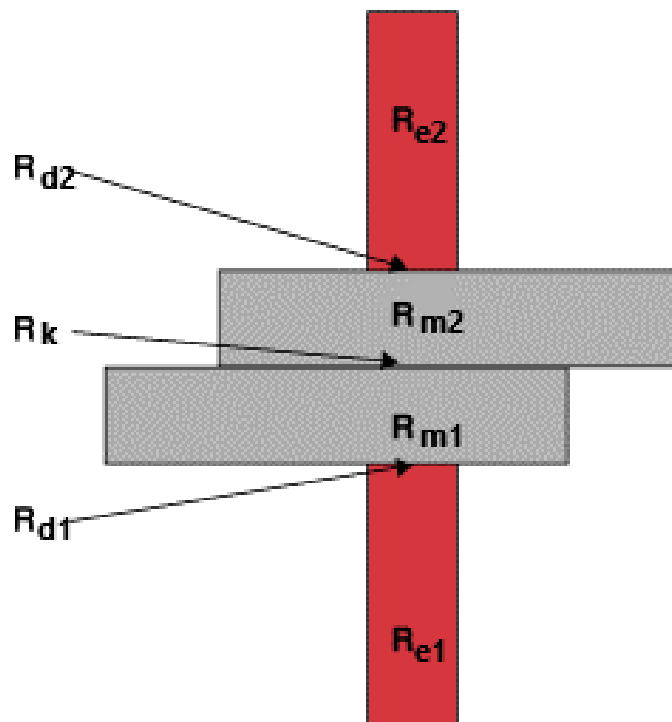
Při výpočtu celkového elektrického odporu soustavy se vychází ze vztahu:

$$R_c = R_{d1} + R_{d2} + R_k + R_{m1} + R_{m2} + R_{e1} + R_{e2} \quad [\Omega] \quad (2)$$

- R_c je celkový elektrický odpor soustavy $[\Omega]$,
- R_{d1} a R_{d2} jsou odpory dotyku mezi elektrodami a svařovanými materiály $[\Omega]$,
- R_k je přechodový odpor mezi svařovanými materiály $[\Omega]$,
- R_{m1} a R_{m2} jsou přechodové odpory materiálů $[\Omega]$,
- R_{e1} a R_{e2} jsou odpory elektrod $[\Omega]$.

Přechodové odpory $R_{d1,2}$ jsou odpory na rozhraní elektroda – svařovaný materiál. Přechodový odpor R_k je odpor v místě styku svařovaných materiálů. Deformace, znečištění a oxidace povrchu elektrod vede ke zvýšení odporu, koncentraci a zvýšení teploty v místě styku mezi svařovaným materiálem a elektrodou a tím vzniká nežádoucí otláčení elektrod na povrch svařovaných materiálů nebo hrozí přehřátí a následné vystříknutí materiálu. Proto elektrody i svařované materiály musí mít kovově čisté povrchy a musí být stlačeny přiměřenou silou. [5, 12, 14, 40]

Obr. 7 Jednotlivé složky elektrického odporu



Zdroj: <https://static.thefabricator.com/a/articles/photos/993/fig1.gif>

3.4.4 Parametry svařování

Mezi hlavní parametry u odporového svařování patří především přítláčná (svařovací) síla F_s , svařovací proud I_s a svařovací čas. Dalším důležitým parametrem je vzájemná rozteč bodů.

Pokud jsou svarové body příliš blízko sebe, nastává tzv. „shuntování“ a dochází ke ztrátě části proudu elektrickým obvodem přes již provedený sousední svar. Z tohoto důvodu se musí dodržovat dostatečný rozestup. [40]

Přítlačná síla

Působení tlaku během svařovacího procesu můžeme rozdělit do třech po sobě jdoucích časových úseků:

- **Přítlačení** – zlepšuje se dosednutí dotykových ploch a tím zaručuje rovnoměrnější přechod elektrického proudu na začátku svařování.
- **Svařování** – působí v průběhu tvorby svaru a vytváří svařovací tlak, který udržuje tavící se kov v uzavřené dutině a brání jeho vystříknutí.
- **Kování** – dochází ke zlepšení struktury svaru (zjemnění zrna, odstranění necelistvosti) a dochází ke zlepšení mechanických vlastností. [34]

Přítlačná síla se rovná součinu základního měrného tlaku (pro tvrdý režim 80 MPa) a kontaktní plochy elektrody. Průměr a plocha elektrody závisí na tloušťce svařovaného materiálu. Čím větší bude tloušťka, tím větší bude potřebná i celková svařovací síla. Přítlačná síla se volí s ohledem na rovinnost a čistotu svařovaných plechů tak, aby bylo zajištěno dosednutí a dokonalý průchod svařovacího proudu v místě svaru. Někdy se doporučuje určit svařovací sílu úměrně k tloušťce plechu podle vztahu:

$$F_s = (1000 \text{ až } 2500) \cdot b \text{ [N]} \quad (3)$$

- F_s je svařovací síla [N],
- b je tloušťka jednoho plechu [mm].

Neúměrně vysoký nebo malý tlak bývá příčinou rychlé deformace konců elektrod, a tím i následně špatné jakosti svarů. Je třeba rozlišit svařování měkkým režimem a svařování tvrdým režimem. [10, 11, 12]

Svařovací (sekundární) proud

Velikost svařovacího proudu závisí zejména na tloušťce svařovaného materiálu, elektrickém odporu materiálu, čistotě materiálu, povrchovém stavu materiálu, svařovacím tlaku a na zvoleném režimu. Z rovnice (1) vyplývá, že svařovací proud má na vytvoření tepla větší vliv než svařovací odpor nebo svařovací čas. [4, 10, 32]

Se změnou odporu se mění úměrně i proud. Tlustší materiály způsobují větší odpory a vyžadují i vyšší napětí. Pro orientační výpočet stačí použití empirického vztahu, který určí svařovací proud vůči tloušťce jednoho svařovaného materiálu:

$$I_s = 6500 \cdot b \text{ [A]} \quad (4)$$

- I_s je intenzita svařovacího proudu [A],
- b je tloušťka plechu [mm].

Při použití malého svařovacího proudu může dojít ke stavu, že se přivedená energie rovná ztrátám tepla vedením a sáláním do okolí a materiálu, vytvoří se difúzní svar, jehož mechanická pevnost je velmi malá. Při svařování za vysokých intenzit svařovacího proudu se musí pamatovat na možnost vystříknutí svarového kovu. [10, 11]

Svařovací čas

Svařovací čas je čas, při kterém proudí svařovací proud. Tento čas je většinou velmi krátký a odvíjí se zejména od tloušťky a druhu svařovaného materiálu, ale po většinu času se pohybuje v rozmezí 8-12 cyklů nebo 8-12/60 s. [31]

3.4.5 Tepelná rovnováha

Pro vznik dokonalé svarové čočky, která je vzhledem ke stykové rovině symetrická, je zapotřebí vytvoření tepelné symetrie ve svaru. Tento předpoklad platí nejen pro fázi ohřevu, ale i fázi ochlazování. Pokud se tepelná rovnováha poruší (rozdílné svařované materiály, rozdílné tloušťky svařovaného materiálu, rozdílná elektrická vodivost), svařovaný materiál se zahřívá nerovnoměrně a nesymetricky. Nastane nerovnoměrné tavení svařovaných materiálů a nerovnoměrný svar. Při odstraňování tepelné nerovnováhy bodových svarů vycházíme z rovnice pro odpor vodiče, který udává vzájemný vztah měrného odporu a rozměrů vodiče:

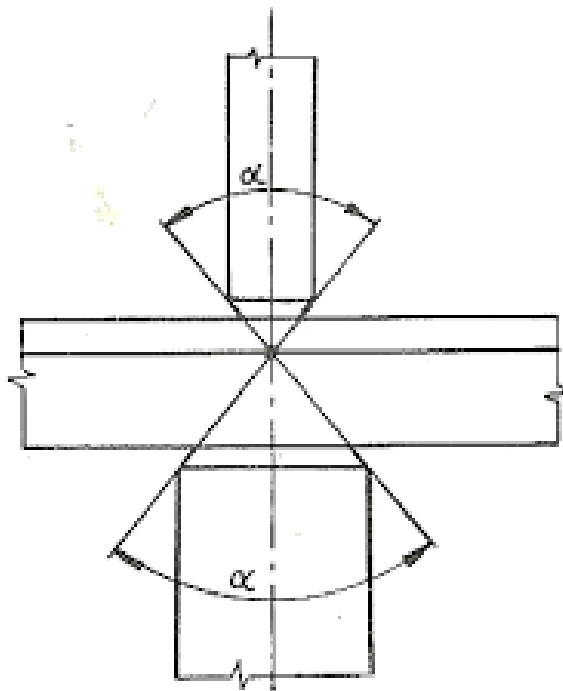
$$R_v = \rho_m \cdot \frac{l}{S} \text{ [\Omega]} \quad (5)$$

- R_v je odpor vodiče [Ω],
- ρ_m je hustota materiálu [kg/m^3],
- l je délka vodiče [m],
- S je plocha průřezu vodiče [m^2]. [5, 10, 11, 14, 32]

Porušení tepelné rovnováhy, které nastalo při svařování dvou materiálů různé jakosti, se eliminuje přizpůsobením průměru svařovacích elektrod. Na straně, kde je ohmický odpor materiálu větší, se volí větší průměr elektrod z důvodu rychlejšího nárůstu tepla a na straně

materiálu s menším ohmickým odporem elektrody menšího průměru. Při stanovení průměrů elektrod vycházíme z doporučených hodnot pro jeden z materiálů a druhý průměr elektrody následně odvozujeme. Při svařování stejných materiálů rozdílné tloušťky tepelnou rovnováhu lze odstranit vhodným přizpůsobením průměrů elektrod graficky (Obr. 8). [5, 10, 11, 15]

Obr. 8 Odstranění tepelné nerovnováhy bodových svarů



Zdroj: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcRf3jaKUfcajsQZoI9MzXDcXKdxvtC7BLClkg&usqp=CAU>

Jejich průměry lze zjistit také výpočtem:

$$d_1 = \frac{d_2 \cdot b_1}{b_2} [mm] \quad (6)$$

- d_1 je šířka elektrody u tenčího plechu [mm],
- d_2 je šířka elektrody u silnějšího plechu [mm],
- b_1 je tloušťka tenčího svařovaného plechu [mm],
- b_2 je tloušťka silnějšího svařovaného plechu [mm]. [23]

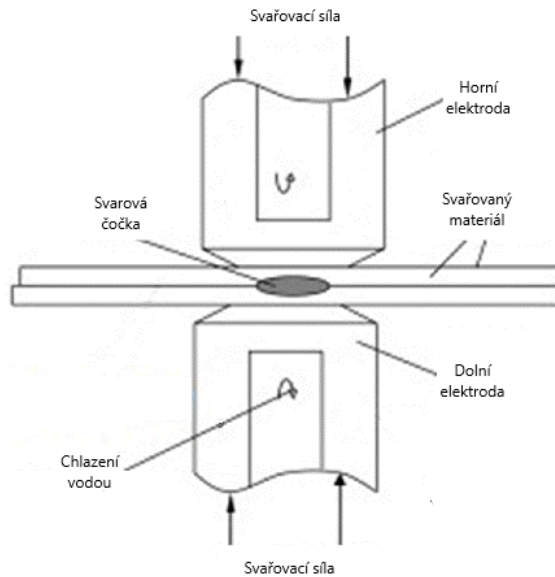
3.4.6 Elektrody pro bodové svařování

Elektrody jsou nejnamáhanější částí bodových svářeček. Elektrody určují velikostí a tvarem dosedací plochy také geometrii svaru. Uvnitř větších elektrod je otvor pro chladicí kapalinu (Obr. 9). Elektrody přicházejí do přímého styku se svařovaným materiálem. Hlavním úkolem elektrod je přivádět do svařovaného místa proud o velmi vysoké intenzitě. Elektrody bodové svářečky jsou proudově a tepelně nejvíce zatíženy před ukončováním svaru.

V tomto okamžiku vzniká pro elektrody nebezpečí:

- změknutí materiálu elektrody v místě styku s plechem,
- difúze svařovaného kovu do materiálu elektrody (lepení elektrody),
- tepelné přetížení pracovní plochy elektrody (natavování a popálení elektrody). [4, 5, 10, 11, 12]

Obr. 9 Chlazení elektrod vodou



Zdroj: https://www.researchgate.net/figure/Resistance-spot-welding-system_fig2_277936352

Tvar a typ elektrod

Elektrody mají na kvalitu spoje bezprostřední vliv. Vzhledem k opotřebení a možnosti opracování jsou opatřeny vyměnitelnými čepičkami. Většinou se používají elektrody ve tvaru různých formovaných špiček (Obr. 10), které se nasadí nebo vsadí do držadla elektrody. [4, 5, 10, 11, 12]

Obr. 10 Typy elektrod



Zdroj: <https://www.kro-mel.cz/image.php?nid=12166&oid=3587951&width=900>

Elektrody pro odporové svařování jsou rozděleny dle asociace RWMA (Resistance Welder Manufacturers Association) do třech skupin dle mechanických a fyzikálních vlastností:

- **Skupina A** – do této skupiny patří elektrody ze slitin na bázi mědi a dělí se dále do 4 tříd (1, 2, 3 a 4).
- **Skupina B** – do této skupiny patří elektrody ze žáruvzdorných kovů a dělí se dále do 5 tříd (10, 11, 12, 13 a 14).
- **Skupina C** – do této skupiny patří elektrody ze speciálních materiálů a dělí se dále do 3 tříd (20, 21 a 22). [42]

3.4.7 Zařízení pro bodové svařování

Bodové svářečky jsou obvykle nazývány bodovkami a dělí se na bodovky ruční a bodovky stacionární. Ramena bodových svařovacích strojů jsou obvykle z mosazi a u výkonnějších strojů jsou opatřena vodním chlazením. Ramena jsou dle účelu různého tvaru. Nejjednodušší bodové svařovací stroje jsou bez regulace proudu. Složitější bodovky jsou regulované pomocí antiparalelně zapojených výkonových tyristorů a řídicí jednotky. Většina bodových strojů je vybavena transformátorem pro jednofázové nebo dvoufázové napájení, ale můžeme se setkat i s bodovými stroji třífázovými. Bodové stroje jsou buď střídavé, nebo stejnosměrné, kde se usměrňuje sekundární napětí výkonnými polovodiči. Přítlačnou sílu lze vyvodit mechanicky, pneumaticky nebo hydraulicky. Bodové stroje ovládané hydraulicky a pneumaticky jsou vhodné pro automatizované a robotizované prostředí. [5, 17]

Ruční svářečky

Mobilní svářečky se v určitém omezeném prostoru mohou přemisťovat. Často jsou nazývány jako bodovací kleště. Jsou to přenosná zařízení, která slouží pro svařování plechů do tloušťek cca 3 mm + 3 mm. Přesto, že se tyto bodovky nazývají ruční, jedná se o stroje s velkou hmotností, a to díky vestavěnému transformátoru. Pro kompenzaci hmotnosti a lehčí manipulovatelnosti se tyto stroje ve většině případů zavěšují na odlehčovací závěsy (tzv. vyvažovány). Nevýhoda tohoto zavěšení tkví v omezeném akčním rádiu, který je dán délkou lana závěsu.

Přítlak je řešen mechanicky, a to na principu páky ovládané rukou svářeče. Regulace přítlaku je řešena předpětím pružiny pomocí šroubu. Svařovací proud je spínán pákou, která je vybavena koncovým dorazem. K protékání proudu tedy dojde pouze za plného stlačení ramen. Proud se zde nereguluje vůbec nebo pomocí tyristorů. Chlazení transformátoru, ramen

a elektrod je řešeno pomocí okolního vzduchu. Nevýhodou ručních bodovek je chlazení ramen a tzv. kadence bodování (počet bodů za minutu). Příklad bodové svářečky je na Obr. 11. [17]

Obr. 11 Ruční bodová svářečka



Zdroj: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008033102>

Stacionární svářečky

Mají vodou chlazená ramena, elektrody a transformátor. Příklad je řešen hydraulicky nebo pneumaticky. Sevření ramen a sepnutí proudu se ovládá obvykle nožním spínačem. Jednoduché stacionární bodové svářečky mají přítlak řešen mechanicky, a to nožní pákou. Samozřejmě je zde plynulá regulace proudu a času. Dále lze ovládat i velikost přítlaku. Stacionární bodovky (Obr. 12) jsou určeny pro sériovou výrobu s velkou kadencí bodů. [17, 18]

Obr. 12 Stacionární bodová svářečka



Zdroj: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008033102>

Roboty pro bodové svařování

Robotizované bodové svařování (Obr. 13) je v dnešní době velmi rozšířeno především v automobilovém průmyslu, a to z důvodu velkých hmotností bodovacích kleští. Jelikož se robotická ramena pohybují po přesně určených trasách, umožňují zrychlení svařovacího

procesu, zlepšují přesnost, zvyšují produktivitu práce a přebírají namáhavé pracovní podmínky. Bodovací kleště jsou umístěny na robotickém rameni a celý svařovací proces je ovládán pomocí aplikačního softwaru. [24]

Obr. 13 Robotické rameno pro bodové svařování



Zdroj: https://www.robots.com/images/general/FANUC_Spot_Welding_Robot.png

3.4.8 Vady bodových svarů

Dle ČSN EN ISO 6520-2 se vady tlakových svarů dělí na:

- **P1 – trhliny** – příčinou je zhoršená svařitelnost materiálu, kde dochází k jeho zakalení. Trhliny snižují únosnost spoje (dynamické namáhání) a lze jim částečně předejít použitím měkkého svařovacího režimu, nebo nechlazením elektrod.
- **P2 – dutiny** – příčinou je nevhodně zvolený režim svařování nebo při dlouhém ohřevu materiálu. Často předcházejí výstřiku materiálu mezi svařovanými plechy nebo pod elektrodou. Dutinám lze předcházet správnou volbou kovací síly.
- **P3 – pevné vměstky** – vznikají následkem znečištění svařovaných materiálů, elektrod nebo při poruše chlazení elektrod. Následně dochází k povrchovému natavení spoje. Vadě lze předcházet dostatečným očištěním svařovaného materiálu a elektrod.
- **P4 – studené spoje** – Příčinou je nedostatečné natavení svařovaného materiálu, nesprávné zvolené svařovací parametry, opotřebení elektrod nebo při působení bočních proudů.
- **P5 – vady tvaru a rozměru** – lze mezi ně zařadit nízkou nebo vysokou svarovou čočku, malý průměr svarového spoje, nesymetrický svar, nebo hluboké otisky po elektrodách.
- **P6 – ostatní vady** – nejčastější vadou je výstřik svarového kovu. K výstřiku dochází v rovině svařovaných materiálů, a to při nadměrném přívodu tepla. [33]

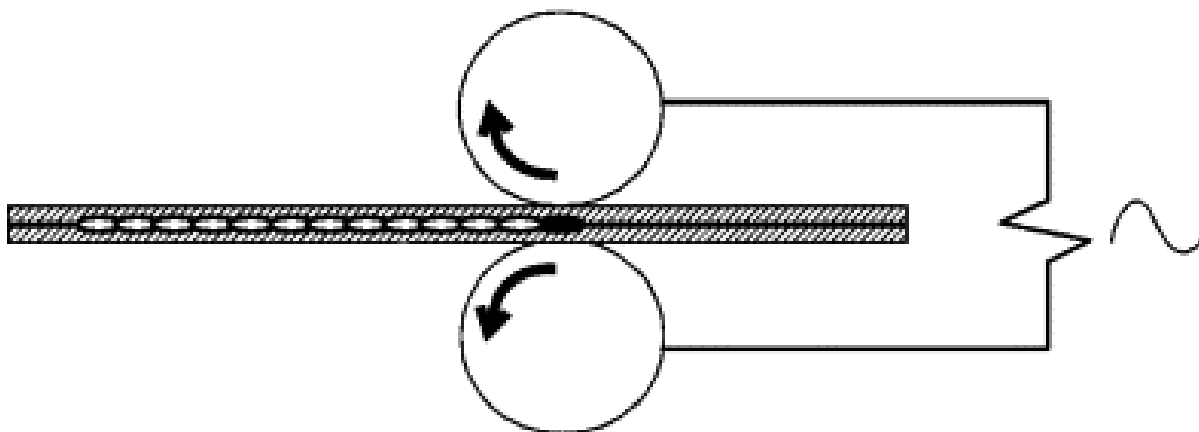
3.5 Švové svařování

Tento druh svařování má velký význam v automobilovém průmyslu a při výrobě všech druhů ocelových sudů např. na olej a benzin. Dále také k výrobě ocelových střešních krytin, kde je potřeba určitá míra vodotěsnosti. Ve všech těchto odvětvích únik vody není povolený, a tudíž je zapotřebí použití této svařovací metody.

Důležité faktory pro dosažení konzistentního a dobrého švového svaru jsou svařovací tlak, svařovací proud, svařovací rychlost a svařovací program. Švové svařování se provádí pomocí dvou rotačních kotoučových elektrod (Obr. 14), nebo mezi jednou kotoučovou elektrodou a deskou. Elektrický proud prochází skrz elektrody. Materiály připravené ke svařování se vloží mezi kotoučové elektrody, které se otáčejí konstantní rychlostí opačným směrem, kde je následně elektrodami vyvinut trvalý svařovací tlak. Elektrický proud průchodem svařovaným materiálem vytváří Jouleovo teplo a vzniká svarový spoj. Díky rotujícím elektrodám není nutné je mezi jednotlivými svary zvedat, jako tomu je u bodového svařování.

Během švového svařování se vytváří řada svarů, která závisí na době průchodu elektrického proudu. Při kontinuálním průchodu proudu vzniká tzv. švový nepřerušovaný svar a při přerušovaném průchodu proudu vzniká tzv. švový přerušovaný svar. [3, 25, 28]

Obr. 14 Princip švového svařování



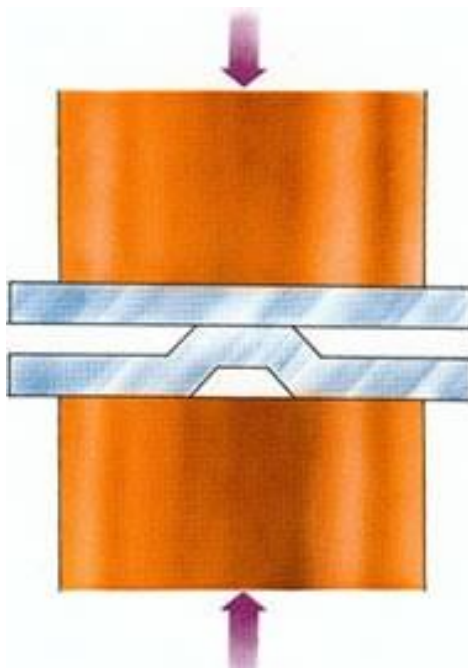
Zdroj: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/seam-welding>

3.6 Výstupkové svařování

Při výstupkovém svařování (Obr. 15) se na jednom svařovaném dílu zhotoví jeden nebo několik výstupků. Při zapnutí svařovacího proudu se v místě výstupků zvyšuje hustota proudu a tím dochází k natavení výstupků a protilehlé oblasti. V konečné fázi nastává zborcení výstupků, natavený kov obou dílů se spojí a vzniká svarový spoj. Výstupky jsou dvojího druhu, a to buď

prolisované nebo masivní. Pomocí deskových elektrod, z nichž jedna je pevná a druhá je pohyblivá, dochází ke stlačení dílů. Prolisované výstupky v plechu připomínají vícebodový spoj. Nesmí dojít k deformaci výstupku dříve, než dojde k natavení. Nejdůležitějším prvkem při kontrole svaru s masivními výstupky je výronek, což je průvodní jev dobře provedeného spoje. Při nedostatku energie výronek téměř neexistuje. Při přebytku energie je výronek velký, dochází k vystříknutí a díly mohou být deformované. Při nedostatečném svařovacím tlaku dochází k popálení povrchů. [27]

Obr. 15 Odporové výstupkové svařování



Zdroj: <https://www.schinkmann.cz/odporove-vystupkove-svarovani>

Rozhodující parametry pro tento způsob svařování jsou svařovací síla, svařovací proud a svařovací čas. Jde použít tvrdý i měkký režim. Při volbě parametrů je v první řadě důležitý půdorys svarové plochy. Existují 4 typy spojů:

- **Přeplátované spoje** – pomocí prolisovaných výstupků.
- **Tupé spoje** – pomocí masivních výstupků.
- **Křížové spoje** – vznikají překřížením tyčí nebo drátů.
- **Speciální spoje** – vytvářejí se pomocí vkládání výstupků mezi svařované díly.

Svařování na lisu nahrazují výkovky při výrobě excentrů, dále svařují náboje s těly ozubených kol a vyrábějí se polotovary při výrobě náradí z více materiálů. Uplatní se také ve výrobě okenních a dveřních závěsů, roštů chladicích zařízení atd. Lze s ním také nahradit např. nýtování. [27, 34]

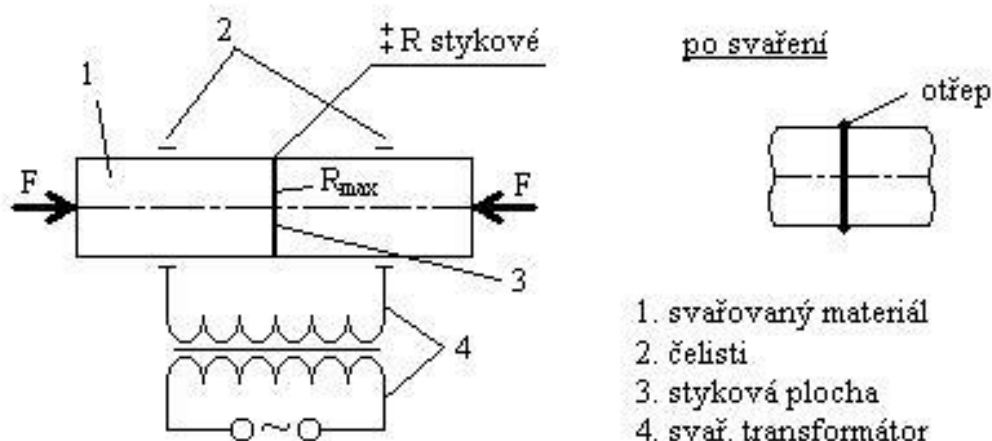
3.7 Odporové stykové svařování

Je to druh odporového svařování, při němž jsou svařované materiály přitlačeny ve styčných plochách k sobě za průchodu elektrického proudu. Stykové svařování se dále rozděluje na dvě základní metody, a to stykové stlačovací svařování a stykové odtavovací svařování.

3.7.1 Stlačovací stykové svařování

Je druh odporového svařování, při kterém jsou materiály (trubky, dráty) udržovány pod tlakem a zahřívány elektrickým proudem, který prochází kontaktní oblastí a vytváří svar (Obr. 16). Proces je podobný odtavovacímu svařování, avšak u stlačovacího svařování se tlak a elektrický proud aplikují současně. Tento druh svařování je vhodný pro materiály malých rozměrů. Proces je vysoce produktivní a velmi čistý. Na rozdíl od odtavovacího svařování poskytuje spojování bez ztráty svařovaného materiálu. [26, 28]

Obr. 16 Stykové stlačovací svařování

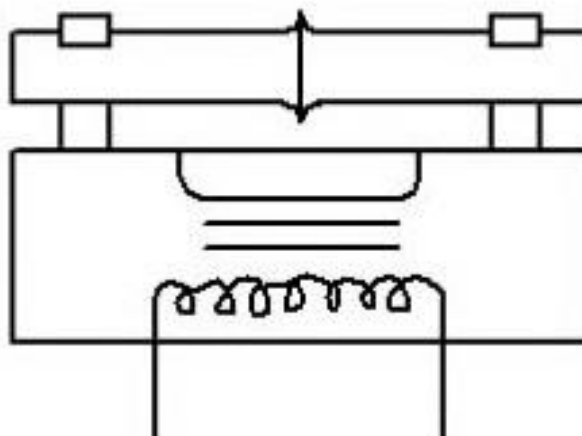


Zdroj: <http://strojirenstvi-maturita.blogspot.com/2011/10/maturitni-otazka-c-11b.html>

3.7.2 Odtavovací stykové svařování

Je proces odporového svařování, při kterém se konce tyčí (trubky, plechy) zahřívají a taví elektrickým obloukem (Obr. 17), který vzniká mezi svařovanými materiály, a poté jsou kovány (přivedeny do kontaktu pod tlakem proti sobě) za vzniku svaru. Svařované části jsou drženy v elektrodových svorkách, z nichž jedna je stacionární a druhá je pohyblivá. Tato metoda umožňuje rychlé (přibližně 1 minutu) spojení velkých a složitých dílů. Optimální hodnoty svařovacího proudu pro svařování ocelí je 10 až 25 A/mm². Svařované materiály jsou často žíhány pro zlepšení houževnatosti svaru. Nevýhodou tohoto svařování je ubývání svařovaného materiálu. Touto metodou lze svařovat oceli a slitiny hliníku, mědi, hořčíku a niklu. Nejčastěji jsou takto svařovány tlusté trubky, rámy a podvozky letadel. [26, 28, 37]

Obr. 17 Odtavovací stykové svařování



Zdroj: <https://www.rockweld.cz/svarovani-natupo/>

3.8 Zkoušky odporových svarů

V normě ČSN EN ISO 9001 - systémy zabezpečení jakosti je svařování uváděno jako „zvláštní proces“, protože kontrolou jakosti a zkouškou výrobku není možno s konečnou platností potvrdit, že při svařování byly dodržovány normy jakosti. Z toho vyplývá, že zkouškami nelze plně zajistit jakost svařované konstrukce, ale musí být již s touto jakostí vyrobena. Žádné nedestruktivní zkoušky nezlepší jakost svaru. Zkoušky odporových svarů se dělí do dvou hlavních skupin:

- destruktivní,
- nedestruktivní. [4, 10, 11, 28]

3.8.1 Destruktivní zkoušky

Jak již název napovídá při destruktivních zkouškách dochází k poškození nebo úplnému znehodnocení zkoušených vzorků, které jsou následně určené k likvidaci. Destruktivní zkoušky slouží k získání mechanických vlastností a obvykle se dále rozdělují do třech kategorií na zkoušky:

- metalografické,
- technologické,
- mechanické. [4, 10, 11, 28]

Metalografické zkoušky

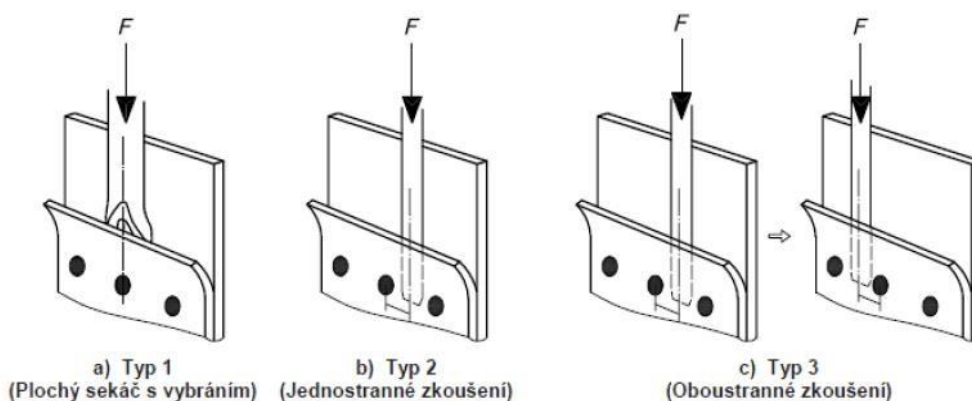
Posuzují se dle normy ČSN EN ISO 17639. Metalografické zkoušky se dále dělí na makroskopické a mikroskopické. Pomocí metalografické zkoušky získáme přehled o struktuře svaru, přechodové oblasti, homogenitě, výskytu pórů, prasklin a bublin. U bodových svarů se vede řez v rovině průměru svarové čočky. Vyhovující makrovýbrus lze zhotovit v dílenské laboratoři do 5 minut, který se následně vyhladí, vyleští a naleptá. Při sledování mikrostruktury je požadováno dosažení zrcadlového lesku, po kterém následuje leptání. Význam zkoušek je velký, ale z důvodu velké časové náročnosti se vykonávají pouze při vážných poruchách a při zavádění výroby. [10, 11, 35]

Technologické zkoušky

Provádějí se za podmínek, které se blíží nebo podobají podmínkám zatěžování součástí v provozu a zjišťujeme vhodnost materiálu pro určitý způsob použité technologie. Výhodou technologických zkoušek je zkoušení materiálu jednoduchými dílenskými prostředky (např. svěrák).

Jednou z nejvíce používaných zkoušek je dílenská zkouška sekáčem (Obr. 18) dle normy ČSN EN ISO 10447. Jejím účelem je rozevření přeplátovaného spoje bez proseknutí svaru. Tato zkouška má mnoho nedostatků, mezi které patří např. individualita lidí vykonávající zkoušku. Díky těmto nedostatkům je uváděna jako méně vhodná.

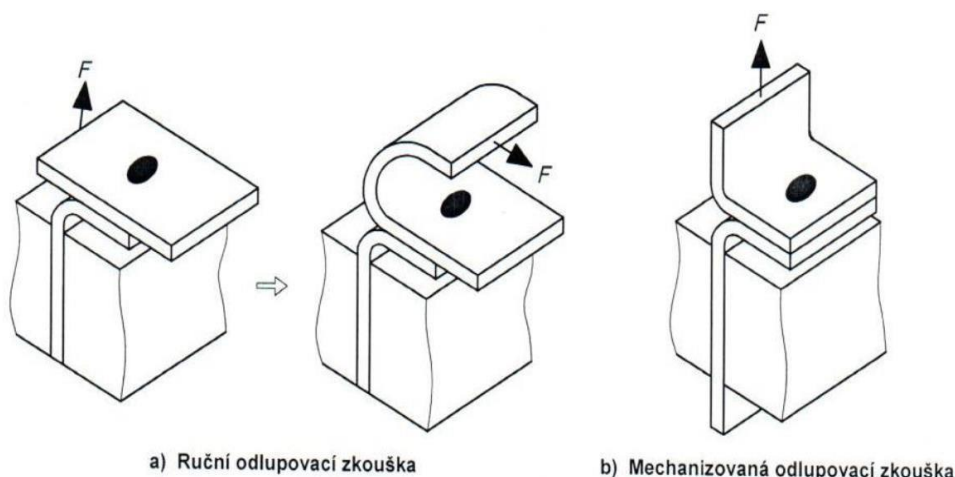
Obr. 18 Zkouška sekáčem bodového svaru



Zdroj: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/72867/F2-BP-2017-Holub-Stepan-2017_BP_Holub_NDT%20kontrola%20odporovych%20bodovych%20svaru.pdf?sequence=1

Zdokonalenou formou sekáčové zkoušky je zkouška nabalováním, kterou lze vykonat ručním nástrojem. Při zkoušce odlupovací dle ČSN EN ISO 10447 se nejprve přeplátovaný svar rozevře, jeden plech se upne do svěráku a druhý do přípravku. Destrukce svaru se dosáhne nabalením plechu na válcovou plochu (Obr. 19). Bodové svary dobré jakosti se vyznačují vytržením jednoho z plechů v místě svaru. [4, 5, 10, 11, 14, 15, 35]

Obr. 19 Odlupovací zkouška bodového svaru

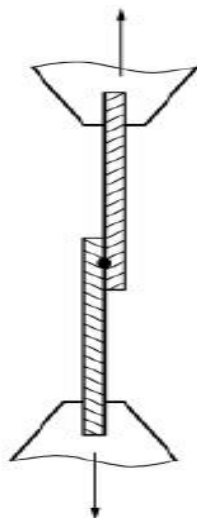


Zdroj: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/72867/F2-BP-2017-Holub-Stepan-2017_BP_Holub_NDT%20kontrola%20odporovych%20bodovych%20svaru.pdf?sequence=1

Mechanické zkoušky

Přepřátované bodové svary se nejčastěji zkoušejí smykovou (stříhovou) zkouškou (Obr. 20). dle normy ČSN EN ISO 14273. Předmětem zkoušení (obvykle na univerzálních zkušebních strojích) je síla potřebná na porušení tělesa a rozměr roztrhnutého spoje. Při této zkoušce převládá smykové napětí. Zkoušený spoj současně namáhá i tahová složka.

Obr. 20 Zkouška smykem bodového svaru



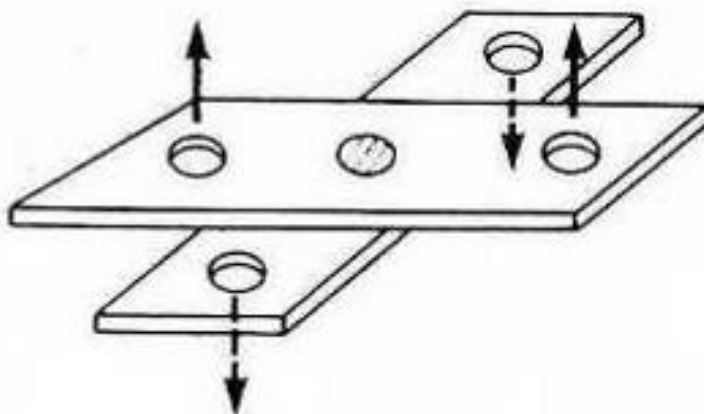
Zdroj: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/72867/F2-BP-2017-Holub-Stepan-2017_BP_Holub_NDT%20kontrola%20odporovych%20bodovych%20svaru.pdf?sequence=1

Další mechanickou zkouškou je skupina tahových zkoušek, kde se svar namáhá na vytržení. Opět se měří síla potřebná k porušení tělesa. Dále posuzujeme vzhled lomu a rozměr spoje. U této skupiny je často používána tahová zkouška těles tvaru U. Její nevýhodou, při velmi tenkém plechu, je deformace v okolí svaru, která zkresluje výsledky zkoušky. Tuto nevýhodu

lze částečně odstranit miskovým tvarem zkušebního tělesa a tím snížit vliv deformace před roztrhnutím.

Křížovou zkoušku nazýváme dle tvaru zkušebního tělesa (Obr. 21). U této zkoušky se svarový spoj namáhá v přípravku na vytržení dle ČSN EN ISO 14272. [4 ,5, 10, 11, 15, 35]

Obr. 21 Křížová zkouška bodového svaru



Zdroj: https://www.researchgate.net/figure/Tensile-Shear-a-and-Cross-Tension-b-tests-4_fig1_250359133

3.8.2 Nedestruktivní zkoušky

U těchto metod nedochází k porušení zkoušeného vzorku a lze je obecně rozdělit na metody, které zjišťují vady povrchové a vady vnitřní.

Vizuální kontrola

Provádí se podle normy ČSN EN 13018. Jedná se o nejjednodušší a nejrozšířenější kontrolu, která předchází jakémukoliv jinému testování. Lze ji lehce aplikovat ve strojírenské výrobě. Může být použita jak samostatně, tak i jako součást dalších metod. Měření, kontrolu a vyhodnocení svaru a jeho povrchu lze vykonat pouhým okem nebo speciálním vybavením (lupa, zrcátka, endoskopy). Zahrnuje měření velikosti svarů. [15, 36]

Kapilární metoda

Provádí se podle norem ČSN EN ISO 3452-1 a ČSN EN ISO 12706. Tuto metodu lze rozdělit do dvou skupin, a to na metodu barevné indikace a fluorescenční metodu. Rozdíl mezi těmito druhy metod je pouze ve složení penetrantu a způsobu pozorování indikace.

Nejdříve je nutná příprava povrchu a odmaštění. Na připravený povrch se nanáší detekční kapalina. Na větší rozměry lze nanést kapalinu nastříkáním, tamponováním, štětcem nebo při

malých rozměrech, ponorem. Penetrant se nechá působit 10 až 30 minut. Poté se přebytečný penetrant odstraní (oplach, otření). Po osušení penetrantu se na předmět nanese vývojka nastříkáním. V dnešní době jsou vývojky ve formě sprejů. Vývojka nejprve pomáhá pronikání penetrantu z vad k povrchu a následně vytváří kontrast pro indikaci vady. Po odpaření vytvoří vývojka souvislou tenkou vrstvu na povrchu materiálu. Po několika minutách pomocí vzlínivosti vystoupí penetrant z vad na povrch předmětu a vytvoří indikaci, která se sleduje vizuálně. U metody barevné indikace je penetrant červené barvy a vývojka barvy bílé, takže výsledná indikace je pak červená na bílém podkladu. Metodu fluorescenční je nutno sledovat v tmavé místnosti pod ultrafialovým světlem. Indikace jasně fluoreskuje. [15, 36]

Ultrazvuková metoda

Provádí dle normy ČSN EN ISO 5577. Jedná se o velmi přesnou metodu pro určení vnitřních vad. Zkouška se provádí kolmými nebo šikmými sondami, které jsou umístěné ve stojanu z plexiskla. Do materiálu se vysílací sondou vyše ultrazvukové vlnění s frekvencí 2 MHz až 4 MHz.

V prvním případě jeden krystal slouží jako vysílací a druhý jako přijímací sonda. Při správně provařeném spoji nedopadne na druhou (přijímací) sondu žádný odraz a ultrazvuk se dále šíří ve spodním plechu. Je-li spoj špatně provařen, část energie se odrazí od přijímací sondy a projeví se odrazovým impulsem tzv. poruchovým echem.

V druhém případě slouží obě sondy jako vysílače a přijímače zároveň. Posouváním sondy a indikací poruchového echa lze s přesností $\pm 0,5$ mm zjistit i průměr bodové čocky. [4, 7, 10, 11, 15, 36]

Metoda magnetická prášková

Vychází z norem ČSN EN ISO 9934-1 a ČSN EN ISO 12707. Podstata zkoušky spočívá v zmagnetizování výrobků z feromagnetických materiálů a vytvoření rozptylového magnetického pole, které je schopné přitahovat částice detekčního magnetického prášku, v místě porušení celistvosti tak, aby vznikala indikace necelistvosti. Indikace necelistvosti se zjišťují vizuálně. Magnetická prášková metoda slouží pro zjišťování necelistvostí na povrchu nebo těsně pod povrchem zkoušeného předmětu. Zkoušené výrobky lze magnetizovat:

- **Pólově** – pomocí trvalých magnetů.
- **Cirkulárně** – průchodem proudu zkoušeným výrobkem.
- **Kombinovaně** – současně se magnetizuje pólově i cirkulárně.

Jako zkušební prostředek se používá magnetický detekční prášek, který je vyrobený z feromagnetického materiálu. Rozlišujeme dva typy a to barevné (černé, šedé, červené) nebo fluorescenční. Jako detekční kapalina se používá voda s aktivními přísadami, směs oleje a petroleje atd. Detekční kapalina obsahuje v 1 dm³ 2 g až 20 g barevného magnetického prášku nebo 0,5 g až 4 g fluorescenčního magnetického prášku.

Před začátkem zkoušky se musí povrch materiálu očistit od povlaků. Poté se nanese magnetický prášek, a to dvěma způsoby:

- **Mokrý způsob (polévací)** – velikost částic 1 μm až 40 μm, magnetická suspenze se nanáší na materiál poléváním nebo ponořením materiálu do suspenze.
- **Suchý způsob (naprašovací)** – velikost částic 40 μm až 400 μm, suchý prášek se naprašuje na povrch materiálu a následně se přebytečný prášek odstraní opatrným sfouknutím.

Poté se zkoušky provádějí buzeným magnetickým polem nebo zbytkovým magnetickým polem. Intenzita magnetického pole je závislá na vodivosti proudu, tvaru materiálu, rozměrech materiálu a magnetických vlastnostech materiálu. Směr magnetického pole je vždy kolmý ke směru zjišťování necelistvostí. Při zkoušce zbytkovým magnetismem je doba magnetizace nejméně 0,1 s a při zkoušce buzeným magnetickým polem 2 s až 5 s. Zjištění případných vad se provádí vizuálně. Pokud je to nutné provádí se po ukončené zkoušce odmagnetování. [15, 36]

Zkouška prozářením

Provádí se dle normy ČSN EN ISO 5579. Zkouška je založena na schopnosti rentgenového (gama) záření proniknout do předem očištěného zkoušeného vzorku. Množství a velikost vad ve svarovém spoji se následně zobrazí na filmu po zpracování fotografického materiálu. Zobrazování vad pomocí filmu začíná být v dnešní době zastaralé a používá se spíše digitální způsob zobrazování chyb přímo na „monitoru“. [25, 36]

4 Experimentální část práce

Experimentální část se zabývá návrhem a uskutečněním laboratorních zkoušek plechů svařených metodou bodového odporového svařování. Cílem zkoušky bylo stanovit velikost síly potřebné k porušení bodového spoje v závislosti na úpravě povrchu, druhu svařovaného materiálu a délce svařovacího času. Z naměřených hodnot poté provést porovnání únosnosti bodových svarů pro jednotlivé skupiny vzorků s rozdílnou kombinací druhu svařovaného materiálu, délkou svařovacího času a úpravou povrchu materiálů. Přípravné práce a laboratorní zkoušky byly provedeny v laboratoři Katedry materiálu a strojírenské technologie na České zemědělské univerzitě.

4.1 Příprava zkušebních vzorků

Pro účel stanovení velikosti síly nutné k porušení bodového svaru byla zvolena zkouška smykem. Zkouška smykem se provádí dle normy ČSN EN ISO 14273 (051112), ve které jsou určeny rozměry a tvar zkušebních vzorků v závislosti na tloušťce použitých kovových plechů. Z ekonomických důvodů byly použity vzorky s rozměry, které se využívají na Katedře materiálu a strojírenské technologie k realizaci zkoušek pájených spojů, lepených spojů nebo nýtovaných spojů.

4.1.1 Rozměry a materiál zkušebních vzorků

Bylo vytvořeno 6 skupin, z nichž pro každou skupinu následoval různý druh svařovaného materiálu a způsob úpravy povrchu:

- skupina vzorků číslo 1 – ocel + ocel odmaštěné,
- skupina vzorků číslo 2 – ocel + ocel neodmaštěné,
- skupina vzorků číslo 3 – pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné,
- skupina vzorků číslo 4 – pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné,
- skupina vzorků číslo 5 – ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné,
- skupina vzorků číslo 6 – ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné.

Zkušební vzorky byly zvoleny z nízkouhlíkové oceli, která se dle evropské normy označuje jako DC01 a pozinkované oceli, která se dle evropské normy označuje jako DX51D. Z tabule plechových polotovarů o rozměrech 1 000 mm × 2 000 mm a tloušťce 1,5 mm byly nastříhány

plechy o rozměrech 100 mm × 25 mm. Celkem bylo pro potřeby experimentu nastříháno 288 kusů ocelových plechů daných rozměrů a 288 kusů plechů z pozinkované oceli daných rozměrů. Pro vytvoření zkušebních vzorků pro zkoušku smykem byly přeplátovány a následně bodově svařeny dva zkušební plechy. Velikost přeplátování byla 25 ± 3 mm.

4.1.2 Čištění povrchu

U 3 skupin zkušebních vzorků došlo před samotným bodovým svařováním k očištění povrchu. Toto čištění se provádí z důvodu odstranění případných nečistot a odmaštění povrchu. Nejprve byly plochy zkušebního plechu odmaštěné v misce s acetonem a následně očištěny pomocí štětce. Poté byly zkušební plechy položeny na čistou látku z důvodu oschnutí. Zkušební plechy byly bezprostředně po oschnutí bodově svařeny.

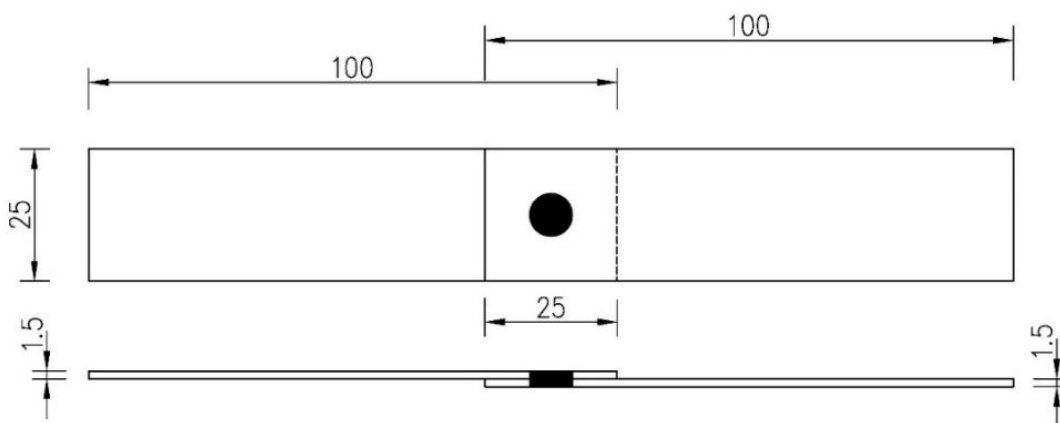
Aceton

Dimethylketon (propanon), je známý převážně pod triviálním názvem aceton. Nejčastěji je používán jako rozpouštědlo organických látek. Aceton je bezbarvá kapalina se specifickým zápachem, hořlavá a neomezeně mísitelná s vodou. Při smíšení par s kyslíkem je vysoce výbušná. Teplota tání je $-94,9$ °C a teplota varu $56,53$ °C. Při vyšších koncentracích par je aceton dráždivý a utlumuje centrální nervový systém. Při práci s acetonem je nutné dbát na bezpečnost a v místnosti, kde se s touto látkou pracuje, je nutné zajistit dostatečné odvětrávání. [38]

4.2 Svařování zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly svařeny z dvojice plechů o rozměrech 100 mm × 25 mm a tloušťce obou plechů 1,5 mm. Velikost přeplátování plechů byla 25 ± 3 mm (Obr. 22).

Obr. 22 Zkušební vzorek z plechů 1,5 mm + 1,5 mm

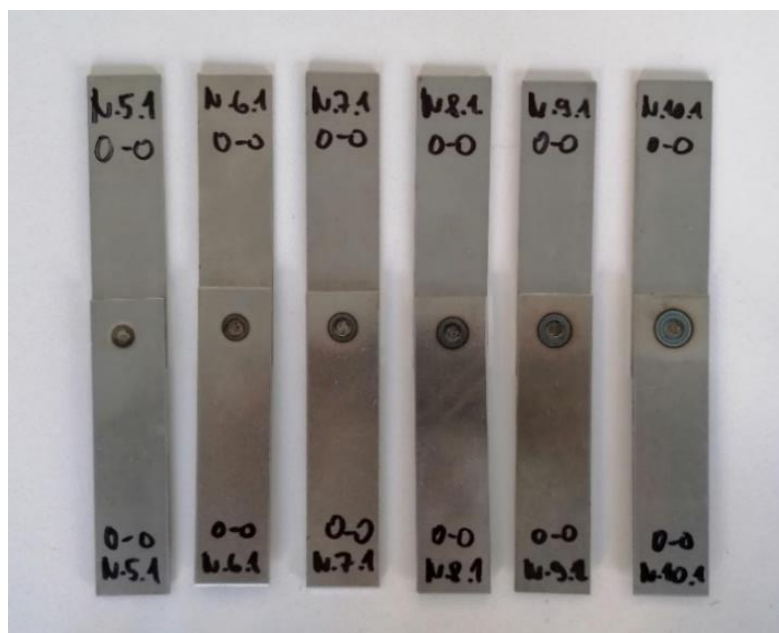


Zdroj: Vlastní nákres

Ke svařování byla použita svařovací sestava pro bodové svařování tvořena odporovými svařovacími kleštěmi BV 2.5.21 a řídicí jednotkou QX 12.1. Svařovací sestava byla vyrobena firmou Danubius elektrik Bratislava. Je určena pro kusovou výrobu a je vhodná pro potřeby experimentu. Dále se svařovací sestava používá např. pro školní potřeby, výuku, opravárenské dílny a všude, kde je požadována nižší intenzita práce.

Elektrody svařovacích kleští jsou z legované mědi s chlazením od okolního vzduchu. Sestava pracuje v měkkém svařovacím režimu (nižší proud a delší čas). Svařovaná ocel má obsah uhlíku $C_{\max} = 0,3 \%$. Výrobce doporučuje svařování materiálů o maximální tloušťce $2,5 \text{ mm} + 2,5 \text{ mm}$. Svařovací proud je dán na pevné hodnotě $I_{\max} = 6,4 \text{ kA}$ a prochází pouze při úplném stlačení ramen zařízení. Přítlačná síla byla zvolena dle tloušťky plechu na $1,5 \text{ kN}$ a byla konstantní po celou dobu svařování, která se vyvozuje mechanicky ručně ovládanou pákou. Svařovací čas byl zvolen $0,30 \text{ s}$, $0,40 \text{ s}$, $0,60 \text{ s}$, $0,80 \text{ s}$, $1,0 \text{ s}$ a $1,30 \text{ s}$ (Obr. 23). Celkem bylo takto svařeno 576 kusů plechů a dohromady tedy bylo vytvořeno 288 kusů zkušebních vzorků, které byly rozděleny do 6 skupin dle svařovaného materiálu a způsobu úpravy povrchu.

Obr. 23 Tepelně ovlivněná oblast bodového svaru



Zdroj: Vlastní fotografie

Nejprve byly přepátované plechy vloženy mezi elektrody. Následně byla vyvozena přítlačná síla ručně ovládaným pákovým mechanismem. Průchod svařovacího proudu se spustil úplným domáčknutím na doraz. Přerušení svařovacího proudu došlo po uplynutí svařovacího času a následovalo rozevření ramen. Poté došlo k vyjmutí hotového svarového spoje. Takto vytvořené vzorky byly podrobeny smykové zkoušce, na jejímž základě se stanovila velikost síly, která byla potřebná k porušení vzorku.

4.2.1 Svařovací kleště

Svařovací kleště BV 2.5.21 (Obr. 24) jsou tvořeny těmito hlavními částmi:

- elektrody,
- čelisti pro uchycení elektrod,
- pákový mechanismus,
- transformátor,
- přívodní kabel.

Obr. 24 Svařovací kleště BV 2.5.21



Zdroj: Vlastní fotografie

Obecné parametry svařovacích kleští jsou popsány v následující tabulce (Tab. 2).

Tabulka 2 Parametry svařovacích kleští BV 2.5.21

Maximální svařovací proud [kA]	6,4
Primární napětí [V, Hz]	380, 50
Maximální proud na primárním vinutí [A]	61,5
Připojovací výkon [kVA]	6
Maximální síla mezi elektrodami [kN]	2,0
Krytí	IP20

Zdroj: Svařovací kleště BV 2.5.21

4.2.2 Řídicí jednotka

Elektronická řídicí jednotka QX 12.1 (Obr. 25) slouží pro nastavení svařovacích parametrů. Nabízí dvanáct svařovacích časů a to konkrétně 0,10 s, 0,15 s, 0,20 s, 0,25 s, 0,30 s, 0,40 s,

0,60 s, 0,80 s, 1,00 s, 1,30 s, 1,60 s a 2,00 s. Při případných výkyvech napájecího napětí jednotka zajišťuje kompenzaci napětí. Doporučené hodnoty svařovacích parametrů pro různé tloušťky svařovaných materiálů udává výrobce.

Obr. 25 Elektronická řídicí jednotka QX 12.1



Zdroj: Vlastní fotografie

Obecné parametry elektronické řídicí jednotky jsou uvedené v následující tabulce (Tab. 3).

Tabulka 3 Parametry řídicí jednotky QX 12.1

Napětí [V, Hz]	380, 50
Proud [A]	6,6
Ovládání [V]	24
Krytí	IP22

Zdroj: Řídicí jednotka QX 12.1

4.3 Zkouška pevnosti smykem

Zkoušky pevnosti zkušebních vzorků smykem byly provedeny v laboratořích Katedry materiálu a strojírenské technologie na České zemědělské univerzitě. Experiment byl proveden na elektromechanickém zkušebním stroji LabTest 5.50ST. V praxi se bodové svary navrhují, aby byly namáhány pouze na smyk. Únosnost bodových svarů u namáhání tahem je výrazně nižší. Z tohoto důvodu byly bodové svary v experimentu navrženy tak, aby byly zkoušeny na namáhání stříhem.

Zkušební vzorky u zkoušky pevnosti smykem byly zatěžovány až do jejich porušení. Nejprve byly zkušební vzorky uchyceny do čelistí. Následně byla nastavena rychlost zatěžování na 10 mm/min. Vzdálenost upínacích čelistí byla nastavena tak, aby bylo možno zkoušený

prvek pevně upnout mezi čelisti, aniž by docházelo k uvolňování. Zkoušený vzorek byl upnut mezi čelisti ve svislé poloze. Měřicí zařízení zaznamenávalo průběh zkoušky. U experimentu docházelo ke třem druhům porušení zkušebních vzorků. U prvního druhu porušení docházelo k destrukci spoje v bodovém svaru, kde byl nejslabším článkem vytvořený svar (Obr. 26).

Obr. 26 *Destrukce bodového svaru – vytvořený svar*



Zdroj: Vlastní fotografie

Druhým druhem porušení byla destrukce spoje ve svařovaném materiálu (Obr. 27), kde byl nejslabším článkem svařovaný materiál.

Obr. 27 *Destrukce bodového svaru – svařovaný materiál*



Zdroj: Vlastní fotografie

Třetím typem výsledku zkoušky bylo neporušení spoje svařovaných materiálů (Obr. 28). K tomuto výsledku docházelo u některých vzorků z důvodu nastavení ukončení zkoušky při

poklesu síly na 50 %. Po nastavení ukončení zkoušky při poklesu síly na 5 % došlo ve všech případech k destrukci bodového svaru ve vytvořeném svaru (Obr. 26).

Obr. 28 Neporušený bodový svar



Zdroj: Vlastní fotografie

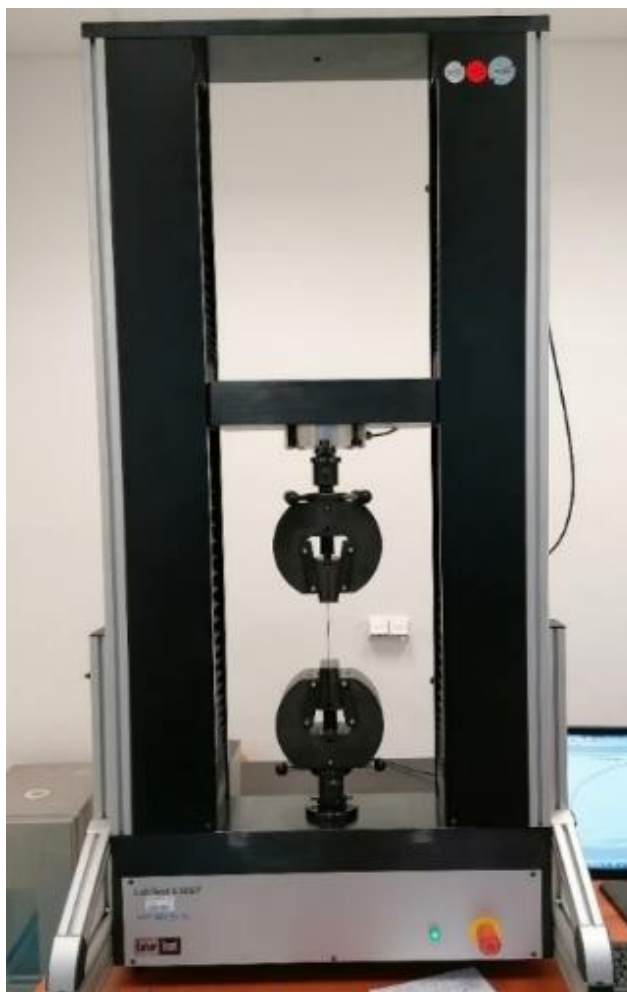
Výstupem smykové zkoušky byla maximální síla, při které došlo k porušení svarového spoje a druh porušení spoje.

Univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST

Zkušební stroj (Obr. 29) je ve stolním provedení a jeho maximální zkušební síla je 50 kN. Vybavení stroje zahrnuje měřicí a řídicí elektroniku a dva pracovní prostory. Stroj provádí mechanické zkoušky v tahu, ohybu, tlaku, pro statická a dynamická namáhání a pro zkoušky vzorků i celých výrobků. Stroj je vybaven řízením v silové a poziční smyčce (FULL STEP). [39]

Jeho využití je při kontrole kvality výroby a při kontrolách materiálu a zboží ve strojírenském a automobilovém průmyslu. Univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST má přesnost měření síly $\pm 0,3 \%$ z čtené hodnoty v rozsahu 1/100, přesnost dráhy 1 μm a odpovídá tím normě ČSN EN 7500-1. Dále odpovídá normám DIN 51220, DIN 51 221, ČSN EN 6892, DIN 51223, DIN 51 227, ASTM E-4, VD 0113, ISO 5893 a je způsobilý pro použití v systémech jakosti ISO 9001:2009. [39]

Obr. 29 Univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST



Zdroj: Vlastní fotografie

Základní technická data jsou sepsána v následující tabulce (Tab. 4).

Tabulka 4 Technické parametry stroje LabTest 5.50ST

Maximální zkušební síla [kN]	50
Výška pracovního prostoru [mm]	1181
Šířka pracovního prostoru [mm]	400
Minimální zkušební testovací rychlost [mm/min]	0,001
Maximální zkušební testovací rychlost [mm/min]	600
Rozlišení polohy příčnicku [μm]	1
Opakovatelnost změny polohy [μm]	2
Přesnost řízení polohy [%]	$\pm 0,5$
Hmotnost zkušebního zařízení [kg]	368
Tuhost příčnicku [N/mm]	$2,3/10^6$
Rozměry stroje výška \times šířka \times hloubka [mm]	1683 \times 860 \times 760
Napájení stroje [V, Hz]	230, 50/60
Příkon [VA]	1200
Připojovací konektor [V]	230

Zdroj: [39]

5 Zhodnocení výsledků

Zhodnocení naměřených hodnot bylo rozděleno do dvou částí. První část zhodnocení výsledků se zabývá zpracováním a vyhodnocením naměřených hodnot pro každou skupinu vzorků samostatně. Druhá část zhodnocení výsledků obsahuje souhrnné vzájemné porovnání naměřených hodnot všech skupin vzorků.

5.1 Matematické vztahy pro vyhodnocení naměřených hodnot

Z naměřených hodnot experimentu, byly odvozeny další hodnoty potřebné k závěrečnému vyhodnocení experimentu. K výpočtu potřebných hodnot byly využity následující matematické vztahy.

Aritmetický průměr

Jedná se o nejpoužívanější statistickou charakteristiku a výpočet aritmetického průměru je velmi jednoduchý. Jedná se o souhrn hodnot statistického znaku, dělený rozsahem souboru:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [-] \quad (7)$$

- \bar{x} je aritmetický průměr [-],
- x_i je naměřená hodnota [-],
- n je počet naměřených hodnot [-].

Kromě výhody, která spočívá v jednoduchosti má aritmetický průměr také některé nevýhody. Nejvýraznější nevýhodou je, že podávané informace mohou být zkreslené extrémní (výraznou maximální nebo minimální) hodnotou. [41]

Variační rozpětí

Jedná se o nejjednodušší ukazatel variability souboru. Variační rozpětí se určuje jako rozdíl maximální a minimální hodnoty ve sledovaném souboru hodnot, tedy:

$$R = x_{max} - x_{min} \quad [-] \quad (8)$$

- R je variační rozpětí [-],
- x_{max} je maximální hodnota v souboru [-],
- x_{min} je minimální hodnota v souboru [-].

Variační rozpětí je ukazatel jednoduchý. Jeho hodnota ovšem nemusí být dostatečně výstižná, protože závisí pouze na dvou extrémních hodnotách, které mohou být „nahodilé“. [41]

Směrodatná odchylka

Hodnota je definována jako druhá odmocnina z rozptylu a jedná se tedy o míru rozptylu hodnot sledovaného znaku kolem průměru. Vzorec pro výpočet směrodatné odchylky:

$$\sigma = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad [-] \quad (9)$$

- σ je směrodatná odchylka [-],
- s^2 je rozptyl hodnot [-],
- x_i je naměřená hodnota [-],
- \bar{x} je aritmetický průměr [-],
- n je počet naměřených hodnot [-]. [41]

Variační koeficient

Tato hodnota je dána poměrem směrodatné odchylky a aritmetického průměru:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad [-] \quad (10)$$

- v je variační koeficient [-],
- σ je směrodatná odchylka [-],
- \bar{x} je aritmetický průměr [-].

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (11)$$

- v je variační koeficient [%],
- σ je směrodatná odchylka [-],
- \bar{x} je aritmetický průměr [-].

Variační koeficient se uvádí desetinným číslem (10), nebo po vynásobení stem v procentech (11). [41]

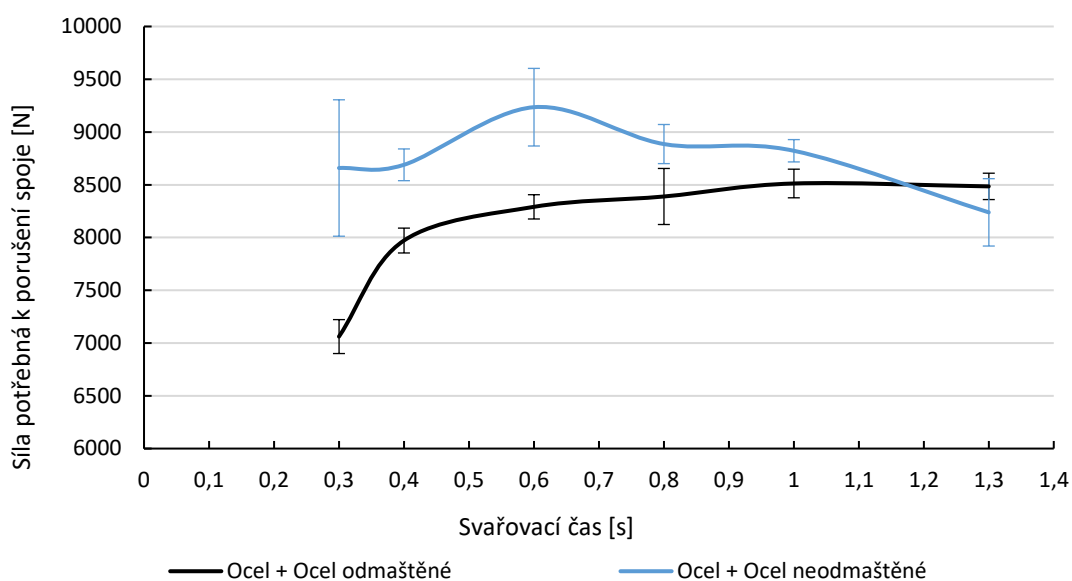
5.2 Dílčí zhodnocení

Toto zhodnocení obsahuje souhrn a vyhodnocení naměřených dat pro každou skupinu vzorků experimentu samostatně. Naměřená data byla vynesena do grafů závislosti síly potřebné k porušení vzorku na svařovacím času, ve které je vynesena aritmetický průměr a 95 % interval spolehlivosti. U zkušebních vzorků svařených ze dvou plechů o tloušťce 1,5 mm je výrobcem bodové svářečky doporučená přítláčná síla 1,5 kN. U všech zkušebních vzorků skupin 1, 2, 3, 4, 5 a 6 byla tedy přítláčná síla nastavena na hodnotu 1,5 kN a měněn byl pouze svařovací čas.

5.2.1 Skupina číslo 1

V rozmezích svařovacích časů 0,30 až 1,0 s byla zvyšováním svařovacího času zvyšována pevnost spoje (Obr. 30). Od hodnoty svařovacího času 0,30 s do hodnoty 1,30 s docházelo ve všech případech k porušení svarového spoje vytržením materiálu, tzn. že tepelně ovlivněný materiál v oblasti spoje měl nižší pevnost než vytvořený svar. Z tohoto důvodu nedocházelo při zvyšování svařovacího času k velkým změnám pevnosti spojů. Svařovaný materiál byl tedy omezujícím článkem vytvořeného spoje.

Obr. 30 Pevnost zkušebních vzorků ocel + ocel odmaštěné a ocel + ocel neodmaštěné



Zdroj: Vlastní výpočty

Při svařování vzorků dle údajů výrobce bodové svářečky docházelo k porušení spoje při průměrné síle 8291 N. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při svařovacím času 1,0 s, kdy byla na porušení spoje potřeba průměrná síla 8512 N. Nárůst průměrné pevnosti oproti doporučenému svařovacímu času tedy byl 2,7 %.

Tabulka 5 Výsledky měření – zkušební vzorky ocel + ocel odmaštěné

Svařovací čas [s]	Síla (aritmetický průměr) [N]	Výběrová směrodatná odchylka [N]	Variační koeficient [%]	Variační rozpětí [N]
0,30	7061	192	2,7	499
0,40	7972	141	1,8	379
0,60	8291	138	1,7	378
0,80	8389	318	3,8	916
1,0	8512	162	1,9	458
1,30	8485	149	1,8	455

Zdroj: Vlastní výpočty

Nejvyrovnanějších výsledků, a tedy nejnižší variační koeficient, bylo dosaženo při svařovacím času 0,60 s, tedy při čase doporučeném od výrobce bodové svářečky a to 1,7 %. Avšak při tomto čase nebylo dosaženo nejvyšší průměrné síly potřebné k porušení materiálu. Z vyhodnocených výsledků (Tab. 5) vyplývá, že u jednotlivých svařovacích časů bylo dosaženo velmi vyrovnaných hodnot pevností jednotlivých spojů.

5.2.2 Skupina číslo 2

V rozmezích svařovacích časů 0,30 až 0,60 s byla zvyšováním svařovacího času zvyšována pevnost spoje (Obr. 30). Od hodnoty svařovacího času 0,30 s do hodnoty 1,30 s docházelo u všech zkoušek, vyjma vzorku N.5.2, kde došlo k destrukci spoje v bodovém svaru, k porušení svařovaného spoje vytržením materiálu, tzn. že tepelně ovlivněný materiál v oblasti spoje měl nižší pevnost než vytvořený svar. Z tohoto důvodu nedocházelo při zvyšování svařovacího času k velkým změnám pevnosti spojů. Svařovaný materiál byl tedy omezujícím článkem vytvořeného spoje.

Při svařování vzorků dle údajů výrobce bodové svářečky docházelo k porušení spoje při průměrné síle 9235 N. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při svařovacím času 0,60 s, tedy při čase doporučeném od výrobce bodové svářečky.

Tabulka 6 *Výsledky měření – zkušební vzorky ocel + ocel neodmaštěné*

Svařovací čas [s]	Síla (aritmetický průměr) [N]	Výběrová směrodatná odchylka [N]	Variační koeficient [%]	Variační rozpětí [N]
0,30	8659	773	8,9	2312
0,40	8689	180	2,1	501
0,60	9235	440	4,8	1174
0,80	8886	222	2,5	720
1,0	8822	127	1,4	348
1,30	8238	382	4,6	1052

Zdroj: Vlastní výpočty

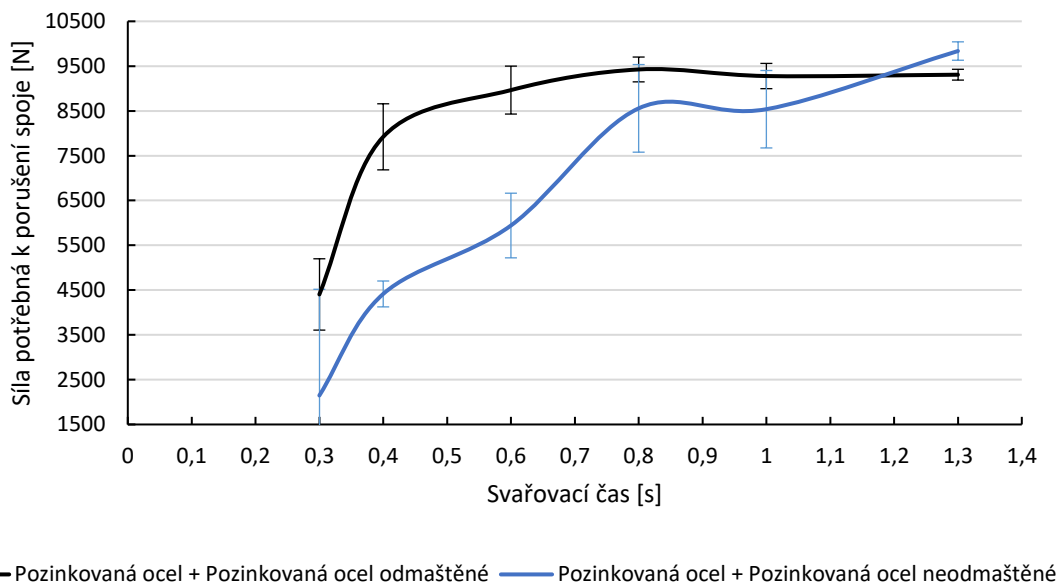
Nejvyrovnanějších výsledků, a tedy nejnižší variační koeficient, bylo dosaženo při svařovacím času 1,0 s a to 1,4 %. Avšak při tomto čase nebylo dosaženo nejvyšší průměrné síly potřebné k porušení materiálu. Z vyhodnocených výsledků (Tab. 6) vyplývá, že u svařovacích časů 0,40 s až 1,30 s bylo dosaženo vyrovnaných hodnot pevností jednotlivých spojů.

5.2.3 Skupina číslo 3

V rozmezích svařovacích časů 0,30 až 0,80 s byla zvyšováním svařovacího času zvyšována pevnost spoje (Obr. 31). Od hodnoty svařovacího času 0,80 s docházelo u všech zkoušek k vytržení materiálu, tzn. nižší pevnost tepelně ovlivněného materiálu v oblasti spoje, než je

vytvořený svar. Z tohoto důvodu nedocházelo při zvyšování svařovacího času od hodnoty 0,80 s k velkým změnám pevnosti spojů. Svařovaný materiál byl tedy omezujícím článkem.

Obr. 31 Pevnost zkušebních vzorků pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné a pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné



Zdroj: Vlastní výpočty

Při svařování vzorků dle údajů výrobce bodové svářečky docházelo k porušení spoje při průměrné síle 8965 N. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při svařovacím času 0,80 s, kdy byla na porušení spoje potřebná průměrná síla 9426 N. Nárůst průměrné pevnosti oproti doporučenému svařovacímu času tedy byl 5,1 %. Vzhledem k tomu, že od svařovacího času 0,80 s docházelo k vytržení materiálu, nezdá se být vhodné, aby se tento čas překračoval.

Tabulka 7 Výsledky měření – zkušební vzorky pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné

Svařovací čas [s]	Síla (aritmetický průměr) [N]	Výběrová směrodatná odchylka [N]	Variační koeficient [%]	Variační rozpětí [N]
0,30	4403	952	21,6	2487
0,40	7922	882	11,1	2414
0,60	8965	640	7,1	2001
0,80	9426	332	3,5	812
1,00	9278	337	3,6	1039
1,30	9309	144	1,5	435

Zdroj: Vlastní výpočty

Nejvyrovnanějších výsledků, a tedy nejnížší variační koeficient, bylo dosaženo při svařovacím času 1,30 s a to 1,5 %. Avšak, při tomto čase, nebylo dosaženo, nejvyšší průměrné síly potřebné k porušení materiálu. Při svařovacím času 0,80 s, kdy začalo docházet k porušení materiálu, byl variační koeficient 3,5 %. Z vyhodnocených výsledků (Tab. 7) vyplývá, že

u svařovacích časů 0,60 s až 1,30 s bylo dosaženo vyrovnaných hodnot pevností jednotlivých spojů. Velmi vysokých hodnot variačního koeficientu bylo dosaženo u svařovacích časů 0,30 s a 0,40 s.

5.2.4 Skupina číslo 4

V celém rozmezí svařovacích časů byla zvyšováním svařovacího času zvyšována pevnost spoje (Obr. 31). Při hodnotě svařovacího času 1,30 s docházelo u všech zkoušek k vytržení materiálu, tzn. nižší pevnost tepelně ovlivněného materiálu v oblasti spoje, než je vytvořený svar.

Při svařování vzorků dle údajů výrobce bodové svářečky docházelo k porušení spoje při průměrné síle 5942 N. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při svařovacím času 1,30 s, kdy byla na porušení spoje potřebná průměrná síla 9837 N. Nárůst pevnosti oproti doporučenému svařovacímu času tedy byl 65,6 %. Vzhledem k tomu, že při svařovacím času 1,30 s docházelo k vytržení materiálu, nezdá se být vhodné, aby se tento čas překračoval.

Nejvyrovnanějších výsledků, a tedy nejnižší variační koeficient, bylo dosaženo při svařovacím času 1,30 s a to 2,5 %. Při svařovacím času 1,30 s začalo docházet k porušení materiálu.

Tabulka 8 Výsledky měření – zkušební vzorky pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné

Svařovací čas [s]	Síla (aritmetický průměr) [N]	Výběrová směrodatná odchylka [N]	Variační koeficient [%]	Variační rozpětí [N]
0,30	2147	2564	119,4	7396
0,40	4414	346	7,8	945
0,60	5942	863	14,5	3136
0,80	8557	1170	13,7	3153
1,0	8539	1034	12,1	2791
1,30	9837	246	2,5	764

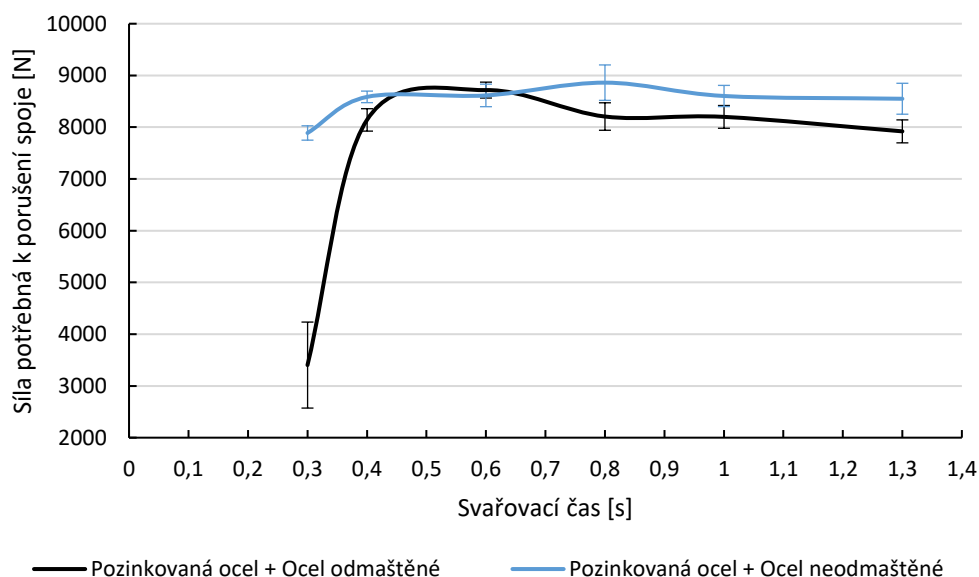
Zdroj: Vlastní výpočty

Z vyhodnocených výsledků (Tab. 8) vyplývá, že se zvyšováním svařovacího času docházelo k vyrovnávání výsledku a ke snižování variačního koeficientu. U svařovacího času 0,30 s bylo dosaženo výsledku variačního koeficientu 119,4 % a to z důvodu, že u většiny vzorků docházelo k porušení spoje při velmi malé síle a při zkoušce vzorku N.5.2 vyšla nadprůměrná síla 7761 N, která je o 261 % větší než průměrná síla potřebná k porušení spoje u tohoto času. U vzorku N.5.1 došlo k porušení spoje při utahování vzorku do zkušebního stroje a nebylo tedy možné zapsat jeho výsledek.

5.2.5 Skupina číslo 5

V rozmezích svařovacích časů 0,30 s až 0,60 s byla zvyšováním svařovacího času zvyšována pevnost spoje (Obr. 32). Od hodnoty svařovacího času 0,60 s docházelo u všech zkoušek k vytržení materiálu, tzn. nižší pevnost tepelně ovlivněného materiálu v oblasti spoje, než je vytvořený svar. Svařovaný materiál byl tedy omezujícím článkem.

Obr. 32 Pevnost zkušebních vzorků ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné a ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné



Zdroj: Vlastní výpočty

Při svařování vzorků dle údajů výrobce bodové svářečky docházelo k porušení spoje při průměrné síle 8717 N. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při svařovacím času 0,60 s, tedy při čase doporučeném od výrobce bodové svářečky. Vzhledem k tomu, že od svařovacího času 0,60 s docházelo k vytržení materiálu, nezdá se být vhodné, aby se tento čas překračoval.

Tabulka 9 Výsledky měření – zkušební vzorky ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné

Svařovací čas [s]	Síla (aritmetický průměr) [N]	Výběrová směrodatná odchylka [N]	Variační koeficient [%]	Variační rozpětí [N]
0,30	3403	994	29,2	3317
0,40	8141	259	3,2	799
0,60	8717	184	2,1	489
0,80	8206	318	3,9	887
1,0	8200	263	3,2	806
1,30	7920	265	3,4	673

Zdroj: Vlastní výpočty

Nejvyrovnanějších výsledků, a tedy nejnižší variační koeficient, bylo dosaženo při svařovacím času 0,60 s a to 2,1 %. Z vyhodnocených výsledků (Tab. 9) vyplývá, že

u svařovacích časů 0,40 s až 1,30 s bylo dosaženo velmi vyrovnaných hodnot pevností jednotlivých spojů. U svařovacího času 0,30 s bylo dosaženo velmi vysokých hodnot variačního koeficientu, a to z důvodu, že u vzorku O.5.7 byla naměřena síla potřebná k porušení spoje větší o 63,6 %, než průměrná síla potřebná k porušení spoje u tohoto času.

5.2.6 Skupina číslo 6

V rozmezích svařovacích časů 0,30 s až 0,80 s byla zvyšováním svařovacího času zvyšována pevnost spoje (Obr. 32). Od hodnoty svařovacího času 0,30 s do hodnoty 1,30 s docházelo u všech zkoušek, vyjma vzorku N.5.5, kdy došlo k destrukci spoje v bodovém svaru, k vytržení materiálu, tzn. nižší pevnost tepelně ovlivněného materiálu v oblasti spoje, než je vytvořený svar. Z tohoto důvodu nedocházelo při zvyšování svařovacího času k velkým změnám pevnosti spojů. Svařovaný materiál byl tedy omezujícím článkem.

Při svařování vzorků dle údajů výrobce bodové svářečky docházelo k porušení spoje při průměrné síle 8614 N. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při svařovacím času 0,80 s, kdy byla na porušení spoje potřebná průměrná síla 8861 N. Nárůst pevnosti oproti doporučenému svařovacímu času tedy byl 2,9 %. Nejvyrovnanějších výsledků, a tedy nejnižší variační koeficient, bylo dosaženo při svařovacím času 0,40 s a to 1,6 %. Z vyhodnocených výsledků (Tab. 10) vyplývá, že u jednotlivých svařovacích časů bylo dosaženo velmi vyrovnaných hodnot pevností jednotlivých spojů.

Tabulka 10 Výsledky měření – zkušební vzorky ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné

Svařovací čas [s]	Síla (aritmetický průměr) [N]	Výběrová směrodatná odchylka [N]	Variační koeficient [%]	Variační rozpětí [N]
0,30	7888	166	2,1	463
0,40	8586	133	1,6	322
0,60	8614	260	3,0	687
0,80	8861	409	4,6	1178
1,0	8603	245	2,8	634
1,30	8550	357	4,2	1133

Zdroj: Vlastní výpočty

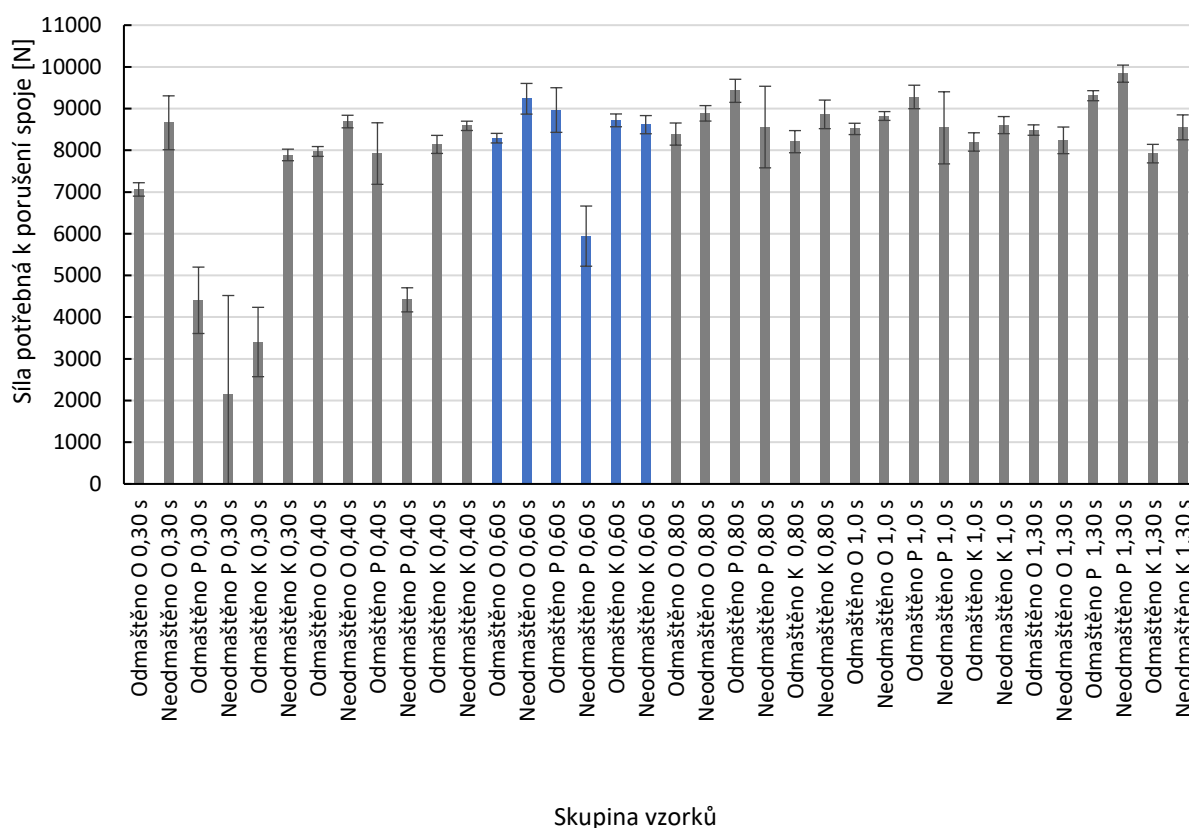
5.3 Souhrnné zhodnocení

Záměrem experimentu bylo zjistit, zda má daný způsob přípravy povrchu před svařováním statisticky významný vliv na velikost síly potřebné k porušení svarového spoje. Toto vyhodnocení, bylo provedeno pro všechny svařovací časy, a to konkrétně pro 0,30 s, 0,40 s,

0,60 s, 0,80 s, 1,0 s a 1,30 s. Naměřená a vyhodnocená data byla zanesena do grafů, kde byl vynesena aritmetický průměr a 95 % interval spolehlivosti naměřených dat.

Obr. 33 zobrazuje graf porovnání naměřených hodnot pro skupiny vzorků (O – ocel + ocel, P – pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel, K – kombinace pozinkovaná ocel + ocel) při svařovacím času 0,30 s, 0,40 s, 0,60 s, 0,80 s, 1,0 s a 1,30 s. V grafu jsou modrou barvou odlišeny hodnoty při svařovacím času 0,60 s, tedy při času doporučeném od výrobce bodové svářečky.

Obr. 33 Graf porovnání naměřených hodnot při všech svařovacích časech



Zdroj: Vlastní výpočty

Skupina vzorků s neupraveným povrchem svarových ploch byla zvolena jako kontrolní skupina, vzhledem k níž byla porovnávána skupina vzorků s odmaštěným povrchem svarových ploch. Cílem porovnávání bylo zjistit, zda má příprava povrchu odmaštěním před svařováním statisticky významný vliv na velikost síly potřebné k porušení svarového spoje. Pro tento účel byl použit test významnosti rozdílu dvou rozptylů (F-test) a test významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů (t-test).

Vliv přípravy povrchu odmaštěním před svařováním na variabilitu naměřených hodnot byla zjišťována pomocí F-testu. Výpočet vychází z dat dvou rozptylů základního souboru. Data jsou vzájemně porovnávány pomocí podílu většího z rozptylů ku menšímu z rozptylů. Testována byla nulová hypotéza o rovnosti dvou rozptylů. Takto definované testovací kritérium se porovnává s tabulkovou kritickou hodnotou. Ke zjištění, zda má příprava povrchu odmaštěním statisticky významný vliv na velikost střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje byl použit t-test. Pomocí F-testu byla nejprve ověřena rovnost rozptylů a následně bylo stanoveno testovací kritérium nepárového t-testu pro shodné nebo různé rozptyly. Testována je nulová hypotéza o rovnosti střední hodnoty měření u vzorků s neodmaštěným povrchem svarových ploch a střední hodnoty měření u vzorků s odmaštěným povrchem svarových ploch. [41]

Nepárový t-test pro shodné rozptyly vychází ze vzorce:

$$T = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}}} [-] \quad (12)$$

- T je testovací kritérium [-],
- \bar{x}_1 a \bar{x}_2 jsou aritmetické průměry daných výběrů [-],
- n_1 a n_2 je počet naměřených hodnot [-],
- s_1^2 a s_2^2 jsou výběrové rozptyly [-]. [43]

Nepárový t-test pro různé rozptyly vychází ze vzorce:

$$T = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} [-] \quad (13)$$

- T je testovací kritérium [-],
- \bar{x}_1 a \bar{x}_2 jsou aritmetické průměry daných výběrů [-],
- n_1 a n_2 je počet naměřených hodnot [-],
- s_1^2 a s_2^2 jsou výběrové rozptyly [-]. [43]

Vypočtené testovací kritérium se v obou případech porovnává s tabulkovou kritickou hodnotou a stanoví se, zda může být zamítnuta nulová hypotéza či nikoliv. U obou testů byla zvolena hladina významnosti 0,05. Popsané testy byly vypracovány pomocí doplňku Analýza dat programu Microsoft Excel. [43]

5.3.1 Porovnání při svařovacím čase 0,30 s

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že mezi rozptyly docházelo ke statisticky významnému snížení variability a zamítáme nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 18,5 % a zamítáme nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z pozinkovaných ocelových plechů, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že mezi rozptyly docházelo ke statisticky významnému snížení variability a zamítáme nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému zvýšení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 105,1 % a zamítáme nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového pozinkovaného a ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že mezi rozptyly docházelo ke statisticky významnému zvýšení variability a zamítáme nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 56,9 % a zamítáme nulovou hypotézu.

5.3.2 Porovnání při svařovacím čase 0,40 s

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že rozdíl mezi rozptyly je statisticky nevýznamný a nelze zamítnout nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 8,3 % a zamítáme nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z pozinkovaných ocelových plechů, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů

zjištěno, že mezi rozptyly docházelo ke statisticky významnému zvýšení variability a zamítáme nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému zvýšení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 79,5 % a zamítáme nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového pozinkovaného a ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že rozdíl mezi rozptyly je statisticky nevýznamný a nelze zamítnout nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 5,2 % a zamítáme nulovou hypotézu.

5.3.3 Porovnání při svařovacím čase 0,60 s

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že mezi rozptyly docházelo ke statisticky významnému snížení variability a zamítáme nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 10,2 % a zamítáme nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z pozinkovaných ocelových plechů, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že rozdíl mezi rozptyly je statisticky nevýznamný a nelze zamítnout nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému zvýšení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 50,9 % a zamítáme nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového pozinkovaného a ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že rozdíl mezi rozptyly je statisticky nevýznamný a nelze zamítnout nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem

testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky nevýznamné změně střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje a nelze zamítnout nulovou hypotézu.

5.3.4 Porovnání při svařovacím čase 0,80 s

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že rozdíl mezi rozptyly je statisticky nevýznamný a nelze zamítnout nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 5,6 % a zamítáme nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z pozinkovaných ocelových plechů, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že mezi rozptyly docházelo ke statisticky významnému snížení variability a zamítáme nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky nevýznamné změně střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje a nelze zamítnout nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového pozinkovaného a ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že rozdíl mezi rozptyly je statisticky nevýznamný a nelze zamítnout nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 7,4 % a zamítáme nulovou hypotézu.

5.3.5 Porovnání při svařovacím čase 1,0 s

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že rozdíl mezi rozptyly je statisticky nevýznamný a nelze zamítnout nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému

snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 3,5 % a zamítáme nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z pozinkovaných ocelových plechů, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že mezi rozptyly docházelo ke statisticky významnému snížení variability a zamítáme nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky nevýznamné změně střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje a nelze zamítnout nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového pozinkovaného a ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že rozdíl mezi rozptyly je statisticky nevýznamný a nelze zamítnout nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 4,7 % a zamítáme nulovou hypotézu.

5.3.6 Porovnání při svařovacím čase 1,30 s

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že mezi rozptyly docházelo ke statisticky významnému snížení variability a zamítáme nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky nevýznamné změně střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje a nelze zamítnout nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z pozinkovaných ocelových plechů, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že rozdíl mezi rozptyly je statisticky nevýznamný a nelze zamítnout nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 5,4 % a zamítáme nulovou hypotézu.

Při vzájemném porovnávání naměřených dat skupiny vzorků tvořených z ocelového pozinkovaného a ocelového plechu, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových rozptylů zjištěno, že rozdíl mezi rozptyly je statisticky nevýznamný a nelze zamítnout nulovou hypotézu. Při vzájemném porovnávání naměřených dat, bylo výsledkem testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů zjištěno, že odmaštění povrchu svarových ploch vedlo ke statisticky významnému snížení střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje o 7,4 % a zamítáme nulovou hypotézu.

5.4 Ekonomické zhodnocení

Při výpočtu jednoho svaru se vychází z ceny elektrické energie, příkonu bodové svářečky, svařovacího času, hodinové sazby svářeče a počtu svarů za hodinu. Konstantní cena po celou dobu svařování se předpokládá u elektrické energie a hodinové sazby svářeče. Z důvodu konstantního proudu bodové odporové svářečky se nemění ani příkon. Vliv na změny ceny svaru má tedy jen svařovací čas a z toho se odvíjející počet svarů při různých svařovacích časech. Dále je ekonomické zhodnocení zaměřeno na stanovení rozdílu nákladů na vytvoření jednoho svarového spoje v závislosti na úpravě povrchu odmaštěním a bez odmaštění.

Pro výpočet ceny za jeden zkušební svar bez odmaštění byl použit vzorec:

$$N_{s1} = N_{kWh} \cdot P \cdot t + \frac{N_{sv}}{p} \text{ [Kč/ks]} \quad (14)$$

- N_{s1} jsou náklady na jeden zkušební svar bez odmaštění [Kč/ks],
- N_{kWh} je cena za kWh [Kč],
- P je příkon bodové svářečky [kW],
- t je svařovací čas [h],
- N_{sv} jsou hodinové náklady svářeče [Kč/h],
- p je počet svarů za hodinu při daném svařovacím čase [ks/h].

Pro výpočet nákladů na odmaštění jednoho zkušební vzorku byl použit vzorec:

$$N_{odmaštění} = C_{aceton} \cdot S_{aceton} + N_o \cdot t_o \text{ [Kč]} \quad (15)$$

- $N_{odmaštění}$ jsou náklady na odmaštění [Kč],
- C_{aceton} je cena acetonu [Kč/l],
- S_{aceton} je spotřeba acetonu na odmaštění jednoho vzorku [l],
- N_o jsou náklady na mzdu obsluhy [Kč/h],
- t_o je doba potřebná k odmaštění jednoho vzorku [h].

Náklady na jeden zkušební svar s odmaštěným povrchem jsou vypočítány dle vzorce:

$$N_{s2} = 2 \cdot N_{odmaštění} + N_{s1} \text{ [Kč]} \quad (16)$$

- N_{s2} jsou náklady na jeden zkušební svar při odmaštění [Kč/ks],
- $N_{odmaštění}$ jsou náklady na odmaštění [Kč],
- N_{s1} jsou náklady na jeden zkušební svar bez odmaštění [Kč/ks].

Podle zjištěných údajů byla určena průměrná cena za 1 kWh na 4,1 Kč, hodinové náklady svářeče zaměstnaného na hlavní pracovní poměr na 400 Kč, příkon svařovacích kleští 6 kW. Do výpočtu nejsou započítávány režijní náklady, náklady na údržbu atd. Pro účely diplomové práce se při výpočtu ceny za jeden svar vychází z orientačních hodnot daných výrobcem bodové odporové svářečky a při svařování odmaštěných vzorků byla hodnota doby odmaštění určena jako 15 s. Při svařovacím času 0,30 s není výrobcem bodové odporové svářečky doporučena orientační kadence svařování, proto byla pomocí interpolace stanovena hodnota na 128 svarů za hodinu. Teoreticky je tedy možné, při již připravených vzorcích pro svařování, vytvořit jeden spoj každých cca 28 s. Zvyšováním svařujícího času se kadence svařování snižuje. Pro svařovací čas 1,30 s je dána výrobcem bodové odporové svářečky orientační kadence svařování 28 svarů za hodinu. Teoreticky je tedy možné, při již připravených vzorcích pro svařování, vytvořit jeden spoj každých cca 129 s. Cena organického rozpouštědla (acetonu) na odmaštění je 70 Kč/l a celkem ho pro účely experimentu bylo použito 0,5 l. Při výpočtech se neuvažuje s opravnými koeficienty pro manipulaci a dále se nepočítá s koeficientem využití času. Je počítáno také s tím, že vzorky bude mít svářeč připraveny a nebudou vznikat další prostoje na přípravu, úpravu povrchu, přemístění apod.

Tabulka 11 Náklady na jeden svar bez odmaštění povrchu a náklady na jeden svar s úpravou povrchu odmaštěním

N_{kWh} [Kč/kWh]	P [kW]	t [s]	N_{sv} [Kč]	p [ks/h]	N_{s1} [Kč]	Změna nákladů N_{s1} [%]	N_{s2} [Kč]	Změna nákladů N_{s2} [%]
4,1	6	0,30	400	128	3,13	-56,2	6,70	-37,5
4,1	6	0,40	400	104	3,85	-46,1	7,43	-30,8
4,1	6	0,60	400	56	7,15	0,0	10,72	0,0
4,1	6	0,80	400	35	11,43	+60,0	15,01	+40,0
4,1	6	1,0	400	32	12,51	+75,0	16,08	+50,0
4,1	6	1,30	400	28	14,29	+99,9	17,87	+66,7

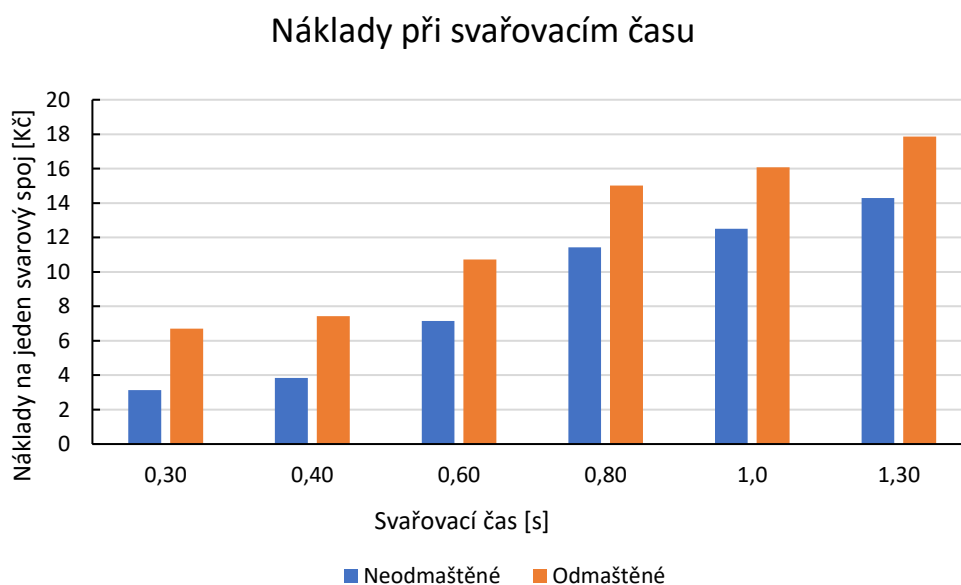
Zdroj: Vlastní výpočty

Příklad změny nákladů je uvedena v Tab. 11 pro dvojici plechů s neodmaštěným povrchem a s úpravou povrchu odmaštěním o tloušťce 1,5 mm + 1,5 mm. Parametry doporučené

výrobce bodové svářečky jsou v tabulce zvýrazněny modrošedou barvou. Při svařování plechů za těchto parametrů vychází náklady na jeden svar bez odmaštění na 7,15 Kč a s odmaštěním 10,72 Kč. Dále jsou v Tab. 11 uvedeny procentuální změny cen na jeden svar dle svařovacího času.

Obr. 34 představuje vliv přípravy povrchu svarových ploch odmaštěním na velikost nákladů na jeden svarový spoj. Při svařovacím čase 0,30 s byl nárůst nákladů při svařování odmaštěných vzorků oproti neodmaštěným o 114,1 %, při svařovacím čase 0,40 s byl nárůst nákladů při svařování odmaštěných vzorků oproti neodmaštěným o 93 %, při svařovacím čase 0,60 s byl nárůst nákladů při svařování odmaštěných vzorků oproti neodmaštěným o 49,9 %, při svařovacím čase 0,80 s byl nárůst nákladů při svařování odmaštěných vzorků oproti neodmaštěným o 31,3 %, při svařovacím čase 1,0 s byl nárůst nákladů při svařování odmaštěných vzorků oproti neodmaštěným o 28,5 % a při svařovacím čase 1,30 s byl nárůst nákladů při svařování odmaštěných vzorků oproti neodmaštěným o 25 %.

Obr. 34 Graf souhrnného hodnocení nákladů při svařovacím čase



Zdroj: Vlastní výpočty

Dále je nutné se zamyslet nad volbou svařovacího času. Zvyšováním svařovacího času do určité hodnoty dochází ke zvýšení únosnosti, ale tato skutečnost vede ke zvyšování nákladů na výrobu spoje. V tomto ohledu docházelo k nejlepším výsledkům při svařovacím čase 0,60 s, který je výrobcem svařovacích kleští doporučen pro svařování plechů o tloušťce 1,5 mm +1,5 mm. Dalším zvyšováním svařovacího času docházelo k nárůstu nákladů na výrobu jednoho spoje vzhledem k nárůstu průměrné síly nutné k jeho porušení.

Ekonomické zhodnocení výhodnosti provedení spojení kombinací plechů ocelových a plechů ocelových pozinkovaných bylo posuzováno porovnáním vlivu na pevnost těchto spojení. Ceny plechových tabulí o rozměrech 1 000 mm × 2 000 mm a následné ceny za jeden zkušební plech uvádí Tab. 12. Jeden zkušební vzorek byl vytvořen svařením dvou plechů při možné kombinaci ocel + ocel, pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel a ocel + pozinkovaná ocel.

Tabulka 12 Ceny plechových tabulí a zkušebních vzorků

Druh materiálu	Cena za tabuli 1 000 × 2 000 mm [Kč]	Cena za jeden zkušební plech [Kč]
Ocel	1277	1,6
Pozinkovaná ocel	1423	1,8

Zdroj: <https://www.vykov.cz/prachatice/plechy>

Pro porovnání je využito středních hodnot pevností spojů naměřených v kapitole 5.2 Dílčí zhodnocení. Maximální střední hodnoty pevností jsou v Tab. 13 vyznačeny modrošedou barvou.

Tabulka 13 Porovnání pevností spojů

	Svařovací čas [s]					
	0,30	0,40	0,60	0,80	1,0	1,30
Skupina č.1 Síla (aritmetický průměr) [N]	7061	7972	8291	8389	8512	8485
Skupina č.2 Síla (aritmetický průměr) [N]	8659	8689	9235	8886	8822	8238
Skupina č.3 Síla (aritmetický průměr) [N]	4403	7922	8965	9426	9278	9309
Skupina č.4 Síla (aritmetický průměr) [N]	2147	4414	5942	8557	8539	9837
Skupina č.5 Síla (aritmetický průměr) [N]	3403	8141	8717	8206	8200	7920
Skupina č.6 Síla (aritmetický průměr) [N]	7888	8586	8614	8861	8603	8550

Zdroj: Vlastní výpočty

Z Tab. 13 vyplývá, že při svařování vzorků bez povrchové úpravy byla nejvyšší pevnost dosažena při kombinaci materiálů pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel a svařovacím času 1,30 s. Z Tab. 13 dále vyplývá, že při svařování vzorků s odmaštěným povrchem vzorků byla nejvyšší pevnost dosažena při kombinaci materiálů pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel a svařovacím času 0,80 s. Cena za tabuli pozinkovaného ocelového plechu je sice dle Tab.12 oproti tabuli ocelového plechu o 11,4 % vyšší, ale s tímto materiálem bylo dosaženo nejvyšších středních hodnot pevností spojů, a to jak s povrchovou úpravou odmaštěním, tak i bez povrchové úpravy. V praxi by měl tedy konstruktér zvážit využití ocelových pozinkovaných materiálů.

6 Závěr

V diplomové práci jsou hodnocené spoje vytvořené bodovým odporovým svařováním. Cílem experimentu bylo stanovit velikost síly potřebné k porušení svarového spoje v závislosti na úpravě povrchu svařovaného plechu, na druhu materiálu svařovaného plechu a délce svařovacího času. Dále z naměřených výsledků statisticky vyhodnotit významnost vlivu přípravy povrchu před svařováním na variabilitu naměřených hodnot síly a na velikost střední hodnoty síly potřebné k porušení svarového spoje.

Pro vytvoření zkušebních vzorků bylo použito 288 kusů plechů z nízkouhlíkové oceli o rozměrech 100 mm × 25 mm a 288 kusů plechů o rozměrech 100 mm × 25 mm z pozinkované oceli. Všechny plechy měly tloušťku 1,5 mm a byly nastříhány z plechových tabulí o rozměrech 1 000 × 2 000 mm.

Zkušební vzorky byly vytvořeny přeplátováním z dvojic plechů ocel + ocel, pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel, pozinkovaná ocel + ocel. Velikost přeplátování byla 25 ± 3 mm. Zkušební vzorky byly vytvořeny bez úpravy povrchů tedy neodmaštěné nebo s povrchovou úpravou materiálu odmaštěním. Celkem tedy vzniklo šest skupin vzorků. Vzorky byly svařeny při svařovacím času 0,30 s, 0,40 s, 0,60 s, 0,80 s, 1,0 s a 1,30 s, které umožňovala bodová svářečka (svařovací kleště) BV 2.5.21. Pro každou hodnotu svařovacího času bylo vytvořeno osm zkušebních vzorků. Přítlačná síla elektrod byla přibližně 1,5 kN a svařovací proud měl konstantní hodnotu 6,4 kA. Celkem bylo vytvořeno 288 vzorků zkušebních vzorků, které byly následně podrobeny zkoušce smykem na univerzálním zkušebním stroji LabTest 5.50ST.

Výsledky zkoušek ukázaly, že docházelo k porušení vytvořeného spoje třemi různými způsoby. Jedním způsobem byla destrukce svařovaného materiálu, ke kterému došlo v 76 % případů, druhým byla destrukce vytvořeného svaru, ke kterému došlo v 10 % případů a třetím výsledkem zkoušky byl vzorek bez porušení materiálu a bez porušení svarové čočky, ke kterému došlo v 14 % případů. K třetímu typu výsledku docházelo z důvodu nastavení poklesu síly na 50 %. Při dodatečném nastavení poklesu síly na 5 % docházelo u všech vzorků k následné destrukci vytvořeného svaru. U skupiny vzorků ocel + ocel odmaštěné docházelo k porušení materiálu při všech svařovacích časech, u skupiny vzorků ocel + ocel neodmaštěné docházelo k porušení materiálu při všech svařovacích časech s výjimkou vzorku N.5.2, kdy došlo k porušení vytvořeného svaru a u skupiny ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné docházelo k porušení materiálu při všech svařovacích časech s výjimkou vzorku N.5.5, kdy došlo

k porušení vytvořeného svaru. U skupiny vzorků pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné, pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel neodmaštěné a ocel + pozinkovaná ocel odmaštěné docházelo k porušení materiálu až při vyšších svařovacích časech.

Z vypočtených hodnot statistických charakteristik variability v rámci jednotlivých skupin vzorků byla ve většině případů stanovena nízká rozptýlenost naměřených hodnot kolem jejich aritmetického průměru pro jednotlivé svařovací časy. Z toho vyplývá, že vypočtené aritmetické průměry dobře reprezentují dosaženou úroveň síly potřebné k porušení svarového spoje. Výjimkou byl svařovací čas 0,30 s u skupin č.3, č.4 a č.5, kde byla naměřena velká hodnota variačního koeficientu. U skupiny č. 3 byl naměřen variační koeficient 21,6 % a to z důvodu, že u vzorku O.5.1 byla naměřena síla potřebná k porušení spoje o 22,7 % větší než síla průměrná a u vzorku O.5.8 byla naměřena síla potřebná k porušení spoje o 37,4 % větší než síla průměrná. Tím docházelo k ovlivnění variačního koeficientu. U skupiny č. 4 byl naměřen variační koeficient 119,4 % a to z důvodu, že u vzorku N.5.2 byla naměřena síla potřebná k porušení spoje o 261,5 % větší než síla průměrná a tím docházelo k ovlivnění variačního koeficientu. U skupiny č.5 byl naměřen variační koeficient 29,2 % a to z důvodu, že u vzorku O.5.7 byla naměřena síla potřebná k porušení spoje o 63,6 % větší než síla průměrná a tím docházelo k ovlivnění variačního koeficientu. Z těchto důvodů je svařovací čas 0,30 s nevhodný k praktickému využití.

Dále byly výsledky testovány na statistickou významnost vlivu přípravy povrchu svarových ploch na variabilitu naměřených hodnot pomocí testu významnosti rozdílu dvou rozptylů (F-test) a na velikost střední hodnoty síly nutné k porušení svarového spoje pomocí testu významnosti rozdílu dvou výběrových průměrů (t-test). Výsledky tohoto testování pro jednotlivé skupiny a časy svařování jsou popsány v kapitole 5.3 Souhrnné zhodnocení.

Z výsledku F-testu vyplývá, že úprava povrchu odmaštěním měla statisticky významný vliv na variabilitu naměřených dat u skupin vzorků ocel + ocel, kde docházelo ke snížení variability dat u svařovacích časů 0,30 s, 0,60 s a 1,30 s a pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel, kde docházelo ke snížení variability dat u svařovacích časů 0,30 s, 0,80 s a 1,0 s.

Výsledky t-testu ukazují, že úprava povrchu odmaštěním má statisticky významný vliv na střední hodnotu síly potřebné k porušení svarového spoje u skupiny vzorků pozinkovaná ocel + pozinkovaná ocel. Střední hodnota síly se u těchto vzorků zvyšovala při svařovacím času 0,30 s o 105,1 %, 0,40 s o 79,5 % a 0,60 s o 50,9 %.

Z ekonomického zhodnocení vyplývá, že na cenu jednoho svaru mělo vliv množství spotřebované energie, úprava povrchu a kadence svařování (počet bodů za hodinu). Vypočtené hodnoty cen nákladů na jeden svar se pohybovaly v rozmezí 3,13 Kč při nejkratším svařovacím času bez odmaštění do 17,87 Kč, při nejdelším svařovacím času s odmaštěním. Náklady nejvýznamněji ovlivňuje svařovací čas a s ním související kadence svařovacích kleští. Zvyšování svařovacího času vede do určité hodnoty ke zvyšování únosnosti spoje. Tato skutečnost je doprovázena neúměrným růstem nákladů na výrobu spoje. Pokud je požadována od spoje maximální únosnost, je toto zvyšování nákladů opodstatněné. Pokud není maximální únosnost požadována, je třeba zamyslet se nad volbou těchto parametrů.

Z ekonomického hodnocení druhu materiálu se zdá být vhodné použití pozinkovaných ocelových plechů. Materiálové náklady jsou sice o 11,4 % vyšší, ale u vzorků svařených z tohoto materiálu vycházela nejvyšší střední hodnota pevností spojů při povrchové úpravě plochy odmaštěním, tak i bez povrchové úpravy.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] KOLAŘÍK, Ladislav. Současný vývoj v oblasti svařování. *Https://www.mmspektrum.com/* [online]. 2018 [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasny-vyvoj-v-oblasti-svarovani.html>
- [2] Historie svařování. *Www.svarbazar.cz* [online]. 2006 [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006061401>
- [3] SUCHÁNEK, Jan, Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ a Petr VONDROUŠ. *Fundamentals of technology I. 2.* přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2019. ISBN 978-80-01-06665-2.
- [4] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka*. Praha: Scientia, 1998. ISBN 80-7183-054-2.
- [5] BLAŠČÍK, František. *Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarania*. Bratislava: Alfa, 1988.
- [6] BERNASOVÁ, Eva. *Svařování*. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1987.
- [7] BERNASOVÁ, Eva, Zdeněk HOLOUBEK a Karel DOKOUPIL. *Zváranie pre 2. a 3. ročník stredných odborných učilíšť*. Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 80-05-00171-1
- [8] KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [9] Bodové svařování. *Https://www.rockweld.cz/* [online]. 2013 [cit. 2020-09-08]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/bodove-svarovani/>
- [10] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1975. Řada strojírenské literatury.
- [11] LIPA, Milan. *Bodové a švové zvaranie*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatury, 1966. Knižnica výskumného ústavu zvaračského v Bratislave.
- [12] LIPA, Milan. *Technológia odporového zvarania*. Bratislava: Slovenská vedeckotechnická spoločnosť, 1975.
- [13] LIPA, Milan. *Odporové stykové zvaranie*. Bratislava: Výskumný ústav zvaračský, 1969.
- [14] ZHANG, Hongyan a Jacek SENKARA. *Resistance welding: fundamentals and applications*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2012. ISBN 978-1-4398-5371-9.
- [15] BROŽEK, Milan. *Strojírenská technologie I: (návodů ke cvičením)*. Vyd. 2., přeprac., rozš. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2008. ISBN 978-80-213-1780-2.
- [16] Odporové svařování. *Https://www.schinkmann.cz* [online]. Praha [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>

- [17] Bodovky a bodování. *Https://www.svarbazar.cz* [online]. 2008 [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008033102>
- [18] Stojanové bodovky. *Https://www.schinkmann.cz* [online]. [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/stojanove-bodovky>
- [19] MILOSLAV, Kočí. VERLAG DASHÖFER. Metody svařování. *Https://www.techportal.cz/* [online]. 2009, 22.10.2009 [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/uvod-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Egny2sdjJ1sR6DtrKglun-qkukZUzLWmsA/?query=odporov%E9%20sva%F8ov%E1n%ED&serp=1>
- [20] Značení metod svařování. *Https://www.svarbazar.cz* [online]. 2006, 11.7.2006 [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006071101>
- [21] BARTÁK, Jiří. Přehled vybraných metod a jejich číselné značení. In: *Https://www.dashofer.cz* [online]. Verlag Dashofer, 2011, červen 2011 [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: https://www.dashofer.cz/download/pdf/svk/Prehled_metod_svarovani_a_jejich_ciselne_znace ni.pdf
- [22] KUBÍČEK, Jaroslav. Technologie svařování. In: *Http://ust.fme.vutbr.cz* [online]. 2009 [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/ctv_technologie_vyroby_I_svarovani_kubicek.pdf
- [23] BROŽEK, Milan. *Resistance spot welding of steel sheets of different thickness. Engineering for rural development.* 2015, str. 72-77.
- [24] Spot welding robots. *Https://www.robots.com* [online]. [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: <https://www.robots.com/applications/spot-welding>
- [25] SALEEM, Jawad, Abdul MAJID, Kent BERTILSSON a T. CARLBERG. *3 Dimensional Finite Element Simulation of Seam Welding Process. ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA* [online]. 2013, 73-78 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: doi: 10.5755/j01.eee.19.8.5398
- [26] KOPELIOVICH, Dmitri. Resistance welding. *Https://www.substech.com* [online]. 2012, 1.6.2012 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw
- [27] BARTÁK, Jiří. Svařování na lisu výstupkové. In: *Https://www.techportal.cz* [online]. Verlag Dashöfer, 2012, 1.11.2012 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/svarovani-na-lisu-vystupkove-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EmVQ-tjtEQspD317aq8nI33VRYFLS2WAvA/?query=v%FDstupkov%E9%20sva%F8ov%E1n%ED&serp=1&justlogged=1>
- [28] MINAŘÍK, Václav. *Přehled metod svařování.* 3. aktualizované vyd. Ostrava: ZEROSS, 2011. ISBN 80-86698-18-1."

- [29] SUMMERVILLE, Cameron, Paul COMPSTON a Matthew DOOLAN. *A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques*. *Procedia Manufacturing* [online]. 2019, 2019, 305-312 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.142
- [30] RAMESH, Singh. *Applied Welding Engineering* [online]. 2. Elsevier Science & Technology, 2015. ISBN 9780128041765.
- [31] PHILLIPS, David. *Welding Engineering: An Introduction*. 1. John Wiley & Sons, Incorporated, 2016. ISBN 9781119191407.
- [32] O'BRIEN, Annette a Carlos GUZMAN. *Welding Handbook*. 00003. Welding Handbook. 2007. ISBN 9780871710536. Dostupné také z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&an=1839115&scope=site>
- [33] HOLUB, Štěpán. *NDT kontrola odporových bodových svarů*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ladislav Kolařík.
- [34] KOLAŘÍK, Ladislav. Technologie svařování: Svařování elektrickým odporem. In: [Http://u12133.fs.cvut.cz](http://u12133.fs.cvut.cz) [online]. 2016, 2016 [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/predmety/detail/111>
- [35] TREJTNAR, Josef. Normy pro destruktivní zkoušení svarů. In: [Https://www-techportal-cz.ezproxy.techlib.cz](https://www-techportal-cz.ezproxy.techlib.cz) [online]. Verlag Dashöfer, 2020, 24.2.2020 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <https://www-techportal-cz.ezproxy.techlib.cz/33/normy-pro-destruktivni-zkouseni-svaru-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EmVQ-tjtEQsp9ACLtwvfO5sCD-vMUnwPlw/?query=zkou%B9ky%20svar%F9&serp=1>
- [36] TREJTNAR, Josef. Normy pro nedestruktivní zkoušení svarů. In: [Https://www-techportal-cz.ezproxy.techlib.cz](https://www-techportal-cz.ezproxy.techlib.cz) [online]. Verlag Dashöfer, 2020, 2.3.2020 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <https://www-techportal-cz.ezproxy.techlib.cz/33/normy-pro-nedestruktivni-zkouseni-svaru-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EmVQ-tjtEQsp9ACLtwvfO5sMO6VlftQMFg/?query=zkou%B9ky%20svar%F9&serp=1&justlogged=1>
- [37] NIEDERMEIER, Ota. *Bodové svařování ocelových plechů*. Praha, 2017. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita. Vedoucí práce Milan Brožek.
- [38] Aceton. [Https://www.cswiki.cz](https://www.cswiki.cz) [online]. 2015, 6.11.2015 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://www.cswiki.cz/wiki/Aceton#Chemick%C3%A9_vlastnosti
- [39] Kupní smlouva univerzálního zkušebního stroje LabTest 5.50ST. In: [Https://zakazky.czu.cz/](https://zakazky.czu.cz/) [online]. 2012, 27.9.2012 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://zakazky.czu.cz/>
- [40] BARTÁK, Jiří. *Svařování kovů v praxi: materiály, výpočty, technologie, požadavky na jakost, bezpečnost práce*. Praha: Dashöfer, c2008-. ISSN 1803-2834.
- [41] KLADIVO, Petr. *Základy statistiky* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013 [cit. 2021-02-10]. ISBN 978-80-244-3842-9. Dostupné z: <https://geography.upol.cz/soubory/studium/e-ucebnice/978-80-244-3842-9.pdf>

[42] RWMA Materials – Descriptions and Common Applications. *Https://www.tuffaloy.com* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.tuffaloy.com/technical/rwma-material-specifications/rwma-materials-descriptions-and-common-application>

[43] Biostatistika: Parametrické testy – Studentův ttest. *Https://cit.vfu.cz/stat/FVHE/prednasky.htm* [online]. Brno: Veterinární univerzita Brno [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/stat/FVHE/Teorie/Predn3/ttest.htm>