



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Vliv typu povlaku na opotřebení svařovacích
elektrod při odporovém svařování**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Martin Dukát

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: N 2301 Strojní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 3911T035 Výrobní a materiálové inženýrství

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dukát** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **461760**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv typu povlaku na opotřebení svařovacích elektrod při odporovém svařování

Název diplomové práce anglicky:

The coating type influence on welding electrodes wear at resistance spot welding

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je rozbor problematiky opotřebení svařovacích elektrod a způsobu jeho hodnocení. Porovnání velikosti opotřebení pro různé typy povlaků (AISI, žárový Zn, galvanický Zn).
- Popis technologie bodového svařování elektrickým odporem se zaměřením na výrobu automobilových karosérií, zařízení, elektrodové čepičky
- Přehled povrchových úprav používaných pro automobilový průmysl
- Návrh experimentu pro ověření vlivu povlaku na opotřebení elektrodových čepiček
- Svaření zkušebních vzorků a vyhodnocení experimentu
- Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Plíva, L.: Odporové svařování. SNTL, Praha, 1975
- [2] Zhang, H., Senkara, J.: Resistance Welding: Fundamentals and Applications, CRC Press, 2nd. Edition, 2011
- [3] V. Voroběv. Termografické hodnocení kvality odporových svarových spojů, ČVUT FS, DP, 2019
- [4] ČSN EN ISO 8166: Oporové svařování - Způsob hodnocení životnosti bodových svařovacích elektrod, při konstantním nastavení stroje. ČNI, Praha, 2004
- [5] databáze WoS a Scopus

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **15.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **06.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2021**

doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Marie Kolaříkové, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval všem zúčastněným, kteří mi s vypracováním práce pomohli. Především děkuji vedoucí diplomové práce doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích.

Anotace

Název diplomové práce:	Vliv typu povlaku na opotřebení svařovacích elektrod při odporovém svařování
Autor práce:	Bc. Martin Dukát
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.
Akademický rok:	2020/2021
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	83 stránek, 36 tabulek, 32 obrázků
Klíčová slova:	Bodové svařování, Odporové svařování, Opotřebení, Povlaky

Abstrakt

Tato diplomová práce zkoumá chování elektrod v průběhu jejich životního cyklu při odporovém bodovém svařování srovnatelných materiálů s různými typy povlaků. Teoretická část se zabývá charakteristikou procesů bodového svařování, problematikou spojenou s hodnocením svarů a opotřebení svařovacích elektrod, materiály využívanými v automobilovém průmyslu a dostupnými povlaky na světovém trhu povrchových úprav. V experimentální části je popsán realizovaný postup analýzy opotřebení svařovacích elektrod při použití různých povlaků. Výsledkem je vyhodnocení naměřených hodnot a závěrečné shrnutí experimentu.

Annotation

Title of the final thesis: The influence of the type of coating on the wear of welding electrodes during resistance welding

Author: Bc. Martin Dukát

Supervisor: doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.

Academic year: 2020/2021

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Extent: 83 pages, 36 tables, 32 pictures

Keywords: Spot welding, Resistance welding, Electrodes, Coating

Abstract

This diploma thesis examines the behavior of the electrodes and their wear during resistance spot welding of similar materials with different types of coatings. The theoretical part deals with the characteristics of spot welding processes, issues related to the evaluation of welds and wear of welding electrodes, materials used in the automotive industry and available coatings on the world market of surface treatments. The experimental part describes the implemented procedure for analysis of welding electrode wear using different coatings. The result is the evaluation of the measured values and the final summary of the experiment.

Obsah

1.	Úvod	10
2.	Odporové svařování	11
2.1	Metody odporového svařování	11
2.1.1	Bodové svařování	12
2.1.2	Švové svařování	17
2.1.3	Výstupkové svařování	18
2.1.4	Stykové svařování	18
2.2	Značení metod odporového svařování	20
2.3	Svařovací parametry	21
2.3.1	Svařovací proud	22
2.3.2	Přítlačná síla elektrod	22
2.3.3	Svařovací čas	22
2.3.4	Svařovací program	23
2.3.5	Doporučené svařovací parametry	24
2.3.6	Svařovací režimy	25
2.4	Vznik tepla	26
2.5	Geometrie bodového svaru	27
2.6	Elektrody pro odporové svařování	29
2.6.1	Materiály svařovacích elektrod	29
2.6.2	Konstrukce svařovacích elektrod	30
2.6.3	Životnost elektrod	31
2.6.4	Zkoušky životnosti elektrod	32
2.6.5	Hodnocení kvality bodových odporových svarů	34
3.	Materiály v automobilovém průmyslu	39
3.1	Požadavky na materiály	39
3.2	Ocelové plechy pro automobilový průmysl	39

3.2.1	Běžná uhlíková ocel (Mild steel)	40
3.2.2	Nízko-pevnostní ocel bez intersticií	40
3.2.3	Vysoko-pevnostní oceli bez intersticií.....	40
3.2.4	Bake-hardening oceli	40
3.2.5	Vysoko-pevnostní mikrolegované oceli	41
3.2.6	Dvoufázové oceli	41
3.2.7	TRIP oceli	41
3.2.8	Vícefázové oceli (Complex Phase).....	42
3.2.9	Martenzitické oceli	42
3.3	Plechý ze slitin hliníku	43
4.	Povrchové úpravy v automobilovém průmyslu	44
4.1	Druhy povlaků	44
4.2	Technologie nanášení povlaků	44
4.2.1	Žárové zinkování	45
4.2.2	Elektrolytické zinkování	45
4.2.3	Tloušťka povlaku	45
4.3	Výrobci povlakovaných ocelí	46
4.3.1	Společnost ArcelorMittal	46
4.3.2	Společnost Thyssenkrupp	47
4.3.3	Společnost United States Steel	48
4.3.4	Společnost TATA Steel	48
5.	Experimentální část	49
5.1	Návrh experimentu	49
5.1.1	Specifikace materiálů.....	50
5.1.2	Příprava vzorků.....	51
5.1.3	Rozdělení vzorků	51
5.2	Svařovací zařízení.....	52

5.2.1	Elektrodové čepičky	53
5.2.2	Kalibrační křivka – optimalizace parametrů.....	53
5.2.3	Svařovací parametry	54
5.3	Střížná zkouška.....	54
5.4	Výsledky experimentu a diskuze.....	56
5.4.1	Průběh svařovacího proudu	56
5.4.2	Maximální síla potřebná na přetržení vzorku	58
5.4.3	Velikost svarových čoček	60
5.4.4	Metalografická zkouška.....	61
5.4.5	Fotografie svarových čoček.....	63
5.4.6	Opotřebení elektrodových čepiček	66
6.	Závěr.....	69
7.	Bibliografie.....	70
8.	Seznam tabulek	73
9.	Seznam obrázků	75
10.	Seznam grafů.....	76
11.	Seznam příloh.....	77

1. Úvod

Odporové bodové svařování je v průmyslu jednou z nejpoužívanějších technologií pro spojování součástí i celých konstrukcí. Toto postavení má především díky širokému využití a vysoké efektivitě. Metoda bodového svařování nachází uplatnění především v hromadné a velkosériové výrobě přeplátovaných dílců z tenkých plechů. Jedná se o proces, kdy svarový spoj vzniká působením tlaku svařovacích elektrod za současného průchodu svařovacího proudu.

V posledních letech výrazně vzrostly požadavky na korozní odolnost součástí. Z tohoto důvodu, především v automobilovém průmyslu, se začaly používat povlakované materiály, které splňují přísně kritéria moderního průmyslu. Používané povlaky zkvalitňují výsledné produkty a zefektivňují proces výroby. Na tyto úpravy a modifikace materiálů úzce navazuje jejich zpracování požadovanou technologií. Proto musí být povlakované materiály podrobeny analýzám a zkouškám, jak se v průběhu svařování chovají a jaký vliv mají na svařovací parametry, opotřebení svařovacích elektrod a výslednou kvalitu bodových svarů.

Tato práce je zaměřena na zkoumání vlivu typu zinkového povlaku na opotřebení svařovacích elektrod, průběh svařovacího proudu a výslednou kvalitu svarové čočky při odporovém bodovém svařování. Úvod práce je věnován problematice týkající se odporového svařování. Jsou popsány postupy zkoušení opotřebení elektrod a uvedeny pojmy, které se následně objevují při realizaci experimentu. V experimentu jsou porovnávány dva druhy povlaků, a to povlaky galvanického a žárového zinku. Byly vybrány materiály DX54D Z100 MBO a DC05 + ZE, používané v automobilovém průmyslu. Tyto materiály jsou si jak svým chemickým složením, tak i tloušťkou velmi podobné. Součástí experimentu bylo vyrobení sad elektrodových čepiček s konkrétní mírou opotřebení. Dále byly těmito elektrodovými čepičkami svařeny vzorky, které byly podrobeny stříhové zkoušce, metalografické analýze a měření svarové čočky. Tyto získaná data jsou vyhodnocena a popsána.

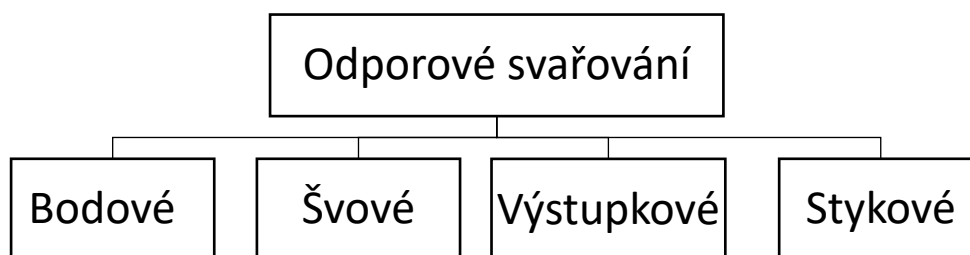
2. Odporové svařování

Metoda odporového svařování je významná technologie trvalého spojování materiálů, jejíž využití nalézá uplatnění v mnoha oblastech strojírenství a průmyslu. První pokusy bodového svařování jsou datovány do roku 1877, avšak kvůli nedostatečně kvalitnímu vybavení nemohla být tato metoda v průmyslu uplatněna. Výraznější zastoupení této technologie se datuje od roku 1925, kdy nastává podstatný rozmach ve svařování kovů. Odporové svařování nachází uplatnění v mechanizovaných a robotizovaných pracovištích sériové výroby, ale i v malosériových provozech [1]. V dnešní době je metoda díky své vysoké efektivitě a krátkým procesním časům nejvíce zastoupena v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu a při svařování tenkých plechů.

Princip technologie odporového svařování je založen na průchodu elektrického proudu vysoké intenzity svařovaným místem při současném působení tlaku svařovacích elektrod [1]. Odporové svařování je podle ČSN 05 0003 definováno jako: „Svařování s použitím tlaku, při kterém se využívá teplo vznikající průchodem elektrického proudu skrz svařované součásti“ [2]. Svařovaný materiál se lokálně ohřeje odporovým teplem při průchodu elektrického proudu, kdy následuje fáze natavení materiálu a působením tlaku v místě svaru dojde k vytvoření bodového svaru. Proud je do svařovaného materiálu přiváděn elektrodami, kterou jsou nejčastěji z mědi nebo ze slitiny mědi, která vykazuje vysokou elektrickou vodivost [1].

2.1 Metody odporového svařování

Na základě pracovního postupu a konstrukčního řešení je odporové svařování rozděleno do čtyř základních skupin. V následující kapitole budou principy těchto jednotlivých metod stručně popsány. Detailněji však bude popsána metoda bodového svařování, jelikož je zapotřebí této problematice důkladně porozumět pro realizaci experimentu [2]. Rozdělení metod bodového svařování je zobrazeno na obr. č. 1.

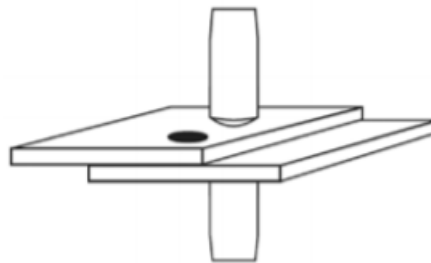


Obrázek 1: Rozdělení metod odporového svařování [2]

2.1.1 Bodové svařování

Bodové svařování je dle normy ČSN EN ISO 17677-1 definováno jako: „Způsob odporového svařování, při kterém se svar ve tvaru čocky zhotoví na přeplátovaných dílech mezi bodovacími svařovacími elektrodami, přičemž svar má přibližně stejnou plochu jako kontaktní plocha elektrod, síla pak působí na svar nepřetržitě během celého procesu“ [2].

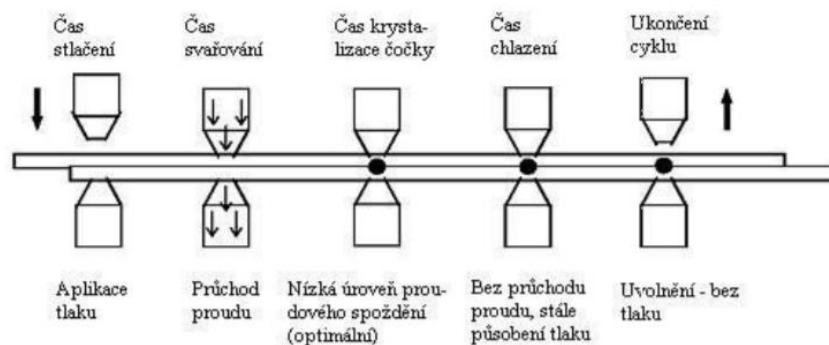
Elektrody jsou většinou zhotoveny z mědi nebo ze slitin podobných vlastností a jsou uvnitř chlazeny vodou, aby bylo dosaženo lepších mechanických vlastností a jemné krystalizace ve svaru. Proudů jsou časově omezovaly elektromagnetickými stykači od 0,02s do 0,1s nebo v posledních letech rozšířenými elektronickými prvky. Schématické znázornění technologie bodového svařování je znázorněno na obr. č. 2 [1].



Obrázek 2: Schéma bodového svařování [8]

Před samotným procesem bodového svařování je zapotřebí správně nastavit výchozí svařovací parametry (proud, přítlak elektrod, čas). Jedním z projevů, potvrzující správně nastavené parametry, je dosažení tzv. tepelné rovnováhy. Ta vede k vytvoření symetrického tvaru vznikajících svarů. Na tyto parametry je úzce navázána životnost elektrod a jejich opotřebení. Míra opotřebení elektrod také přímo ovlivňuje kvalitu svarů [3].

Průběh procesu zhotovení bodového svaru je zobrazen na obr. 3. Samotný cyklus začíná tím, že se svařovaný materiál přiloží mezi 2 elektrody na nepohyblivou (zpravidla spodní) elektrodu v požadovaném místě spoje. Nejčastěji jsou plechy v pozici přeplátované.



Obrázek 3: Průběh cyklu zhotovení bodového svaru [8]

Po sepnutí spínače začnou elektrody proti sobě působit přednastavenou silou, která zajistí dokonalé přilehnutí ploch materiálu. Poté se na elektrody přivede elektrický proud ze sekundárního vinutí. Na vzniku potřebného tepla pro svařování se podílí elektrický odpor, který je tvořen měrným odporem materiálu elektrod, měrným odporem materiálu svařovaných dílů, kontaktním odporem mezi čelem elektrody a povrchem plechu a přechodovým odporem mezi svařovanými díly [3].

2.1.1.1 Rozdělení odporů při bodovém svařování

Proud, který prochází skrz svařované materiály, musí překonat několik dílčích odporů:

- odpor materiálu elektrod (R_1 , R_7)
- přechodové odpory mezi elektrodami a svařovanými díly (R_2 , R_6)
- odpory materiálu svařovaných dílů (R_3 , R_5)
- přechodový odpor mezi díly (R_4).

Součtem uvedených dílčích odporů dostáváme celkový činný odpor R , který je použit v rovnici Joule-Lenzova zákona [3]:

$$\Sigma = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 [\Omega] \quad (1)$$

• Přechodový odpor na styku elektrod a materiálu (R_2 , R_6)

Velikost těchto odporů je závislá na velikosti styčné plochy, resp. na průměru a tvaru elektrod. Dále na drsnosti a čistotě styčných ploch a na měrném tlaku mezi povrchem plechu a elektrodou. Z hlediska odporového svařování jsou tyto přechodové odpory nežádoucí a obecně při návrhu postupu je snaha je minimalizovat. To je jeden z důvodů, proč se používají elektrody s velkou elektrickou vodivostí a využívá se chlazení [14].

Přechodový odpor je na začátku svařování největší, a tak nejvíce ovlivňuje proces. S rostoucí teplotou přechodový odpor klesá a dominantním začíná být odpor měrný [3].

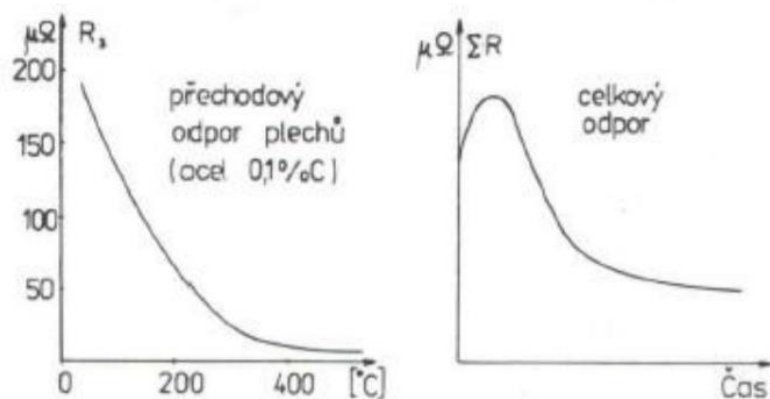
• Měrný odpor svařovaných dílů a elektrod (R_3 , R_5)

Velikost těchto odporů je závislá na tloušťce materiálu a na efektivním průřezu, kterým protéká proud. Tento průřez závisí na velikosti styčných ploch elektrod a na měrném odporu materiálu, který se s rostoucí teplotou zvětšuje [14].

Měrný elektrický odpor materiálu se postupně zvyšuje s rostoucí teplotou a původně plošný zdroj tepla se mění na objemový. Tato první fáze je rozhodující pro vytvoření objemového zdroje tepla a u ocelí s nízkým obsahem uhlíku trvá do 10 % z celkového svařovacího času [3].

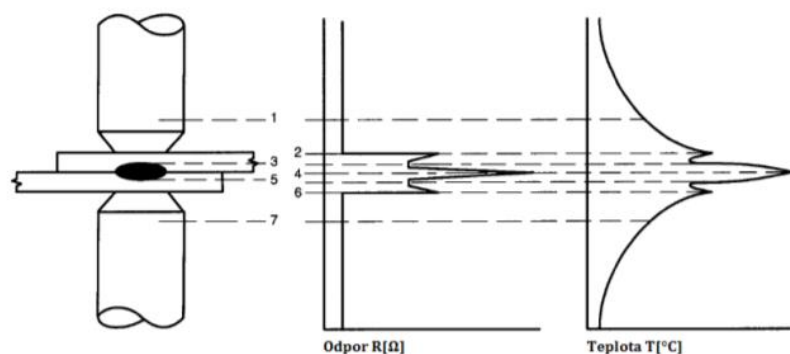
- **Přechodový odpor svařovaných materiálů (R_4)**

Velikost tohoto odporu závisí zejména na tloušťce a měrném odporu vrstvy oxidů a možných nečistot na povrchu svařovaného materiálu. Dále tento odpor ovlivňuje nerovnost povrchů, přítlačná síla elektrod a teplota. S rostoucí teplotou odpor R_4 klesá do chvíle, kdy na styku plechů vznikne tekutá fáze a odpor náhle vzroste. Průběh odporu je na obr. č. 4.



Obrázek 4: Průběh odporů v závislosti na teplotě a na čase [3]

Rozložení a velikosti dílčích odporů, včetně teplot s místem výskytu jsou zobrazeny na obr. č. 5. Celková velikost odporu svařovací soustavy je rovna součtu jednotlivých odporů.



Obrázek 5: Rozložení dílčích odporů a teplot [7]

1,7 – odpor materiálu elektrod; 2,6 – kontaktní odpory mezi elektrodou a svařovaným plechem; 3,5 – odpor materiálu svařovaných dílů; 4 – přechodový odpor mezi svařovanými díly

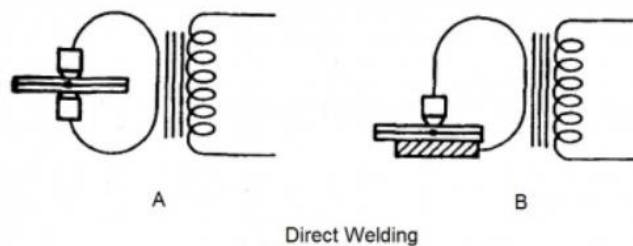
Svařovací teplo může být soustředěno do jiného místa z důvodu přítomnosti nečistot materiálu, deformací a nevhodně zvolených tlaků svařovacích elektrod. V tomto případě se může svar vytvořit na jiném místě, než je plánováno [5]

2.1.1.2 Rozdělení bodového svařování

Bodové svařování se rozlišuje podle způsobu zhotovení svaru na dva druhy, a to přímé a nepřímé svařování. Tyto způsoby jsou popsány níže.

- **Přímé bodové svařování**

Svarová čočka se tvoří přímo mezi elektrodami, jak je možno vidět na obr. č. 6. Elektrody jsou v tomto případě orientovány v jedné ose proti sobě. Mezi těmito elektrodami vzniká ve většině případů pouze jeden svar [4].



Obrázek 6: Přímé bodové svařování [26]

a) Jednobodové svařování protiběžnými elektrodami:

Při jednobodovém způsobu má stroj většinou protiběžné elektrody, kdy spodní je většinou pevná a horní přitlačná pohyblivá. Proces svařování probíhá po jednom bodovém svaru [4].

b) Dvoubodové svařování v paralelním zapojení

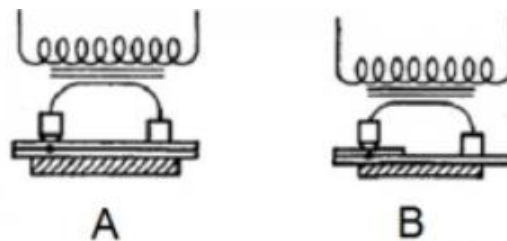
Hlavním principem druhého způsobu je dvoubodové svařování v paralelním zapojení, kdy na jediný transformátor jsou paralelně připojeny dva páry protiběžných elektrod. Díky dvěma větvím svařovacího proudu dochází ke svařování na dvou místech současně. Pro tuto variantu je zapotřebí výkonnější transformátor a samostatné přitlačování každého páru elektrod, aby se dosahovalo stejných sil. V tomto ideálním případě by měl mít každý bod stejnou proudovou hustotu [4].

c) Dvojbodové svařování v sériovém zapojení

Tento způsob je v praxi využíván ojediněle. Podstatou tohoto zapojení je použití dvou samostatných transformátorů o stejném výkonu, kdy sekundární obvod jednoho transformátoru je uzavřený přes svařované dílce a sekundární obvod druhého transformátoru. Při tomto způsobu je zapotřebí dávat pozor na správnou polaritu [4].

- **Nepřímé bodové svařování**

Na obrázku č. 7 je možné vidět, že svarová čochka nevzniká přímo mezi elektrodami. Elektrody jsou většinou orientovány souběžně, proud při přechodu z jedné elektrody na druhou prochází ještě přes vodivou podložku nebo můstek [4].

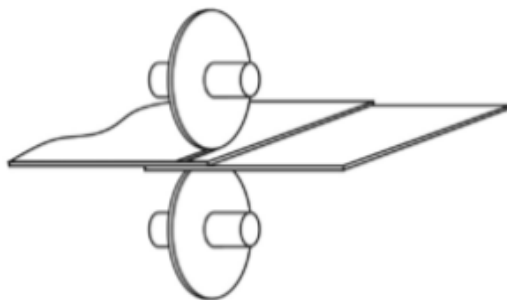


Obrázek 7: Nepřímé bodové svařování [26]

- a) **Dvojbodové:** souběžnými elektrodami.
- b) **Jednotlivými body:** souběžnými elektrodami, kdy pouze jedna z nich přivádí proud.
- c) **Dvojbodové:** protiběžnými elektrodami a souběžným můstkem.

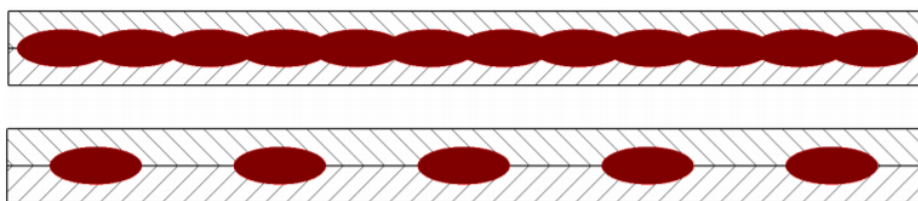
2.1.2 Švové svařování

Švové svařování je dle normy ČSN EN ISO 17677-1 definováno jako: „Způsob odporového svařování, při kterém svařovací síla působí nepřetržitě a proud je dodáván buď stále nebo přerušovaně, čímž vzniká souvislý svar. Svařované díly jsou stlačovány mezi dvěma elektrodovými kotouči a elektrodovou podložkou.“ Kotouče přenášejí sílu a během tvorby svarového spoje se plynule nebo přerušovaně otáčejí. Na obr. č. 8 je znázorněn základní princip technologie švového svařování [2].



Obrázek 8: Švové svařování

Podle doby privádění svařovacího proudu lze švové svařování rozdělit na svařování průběžné a přerušované (obr. č. 9).



Obrázek 9: Švový průběžný a přerušovaný svar [4]

Při průběžném svařování prochází svařovací proud mezi kladkami nepřetržitě. Oproti tomu u přerušovaného je svařovací proud dodáván pouze v určitých časových intervalech. Přerušované svařování je výhodnější, jelikož pomocí volby svařovací rychlosti a časového intervalu, kdy kladkami prochází proud lze ovlivnit rozmístění jednotlivých bodů, které mohou být buď jednotlivé, nebo se mohou vzájemně překrývat. Průběžné svařování používáme především pro svařování tenkých ocelových plechů a pro průběžné spoje, které jsou zastoupeny při výrobě pивních sudů. Zatímco přerušované svařování je vhodné pro svařování tlustějších plechů, barevných kovů a lehkých slitin [1].

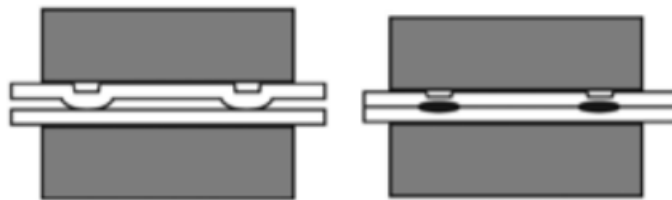
Při švovém přerušovaném svařování se do svařovacího procesu vnáší jeden parametr navíc. Tento parametr je nazván modulace. Nastavením se udává okamžik, kdy má dojít ke

spuštění proudu a v jakém intervalu. Modulací a přerušováním proudu se předchází přehřátí švového svaru. Díky modulaci a přerušování vzniká kvalitnější svar, lepší vzhled povrchu a je možno lépe dosáhnout tepelné rovnováhy ve svaru [1].

2.1.3 Výstupkové svařování

Výstupkové svařování je podle ČSN EN ISO 17677-1 definováno jako: „Způsob odporového svařování, při kterém síla a proud vytvářející svar nebo svary jsou lokalizovány pomocí výstupku nebo výstupků zhotovených, případně přirozeně vytvořených na jedné nebo více stykových plochách (výstupky se během svařování zbortí).“ Svařovací proud a síla se obvykle přenáší pomocí přípravků, nebo čelistí [2].

Technologie výstupkového svařování je využívána v sériové a hromadné výrobě, především při svařování dílů menších rozměrů. Ukázka je zobrazena na obr. č. 10.



Obrázek 10: Technologie výstupkového svařování [8]

2.1.4 Stykové svařování

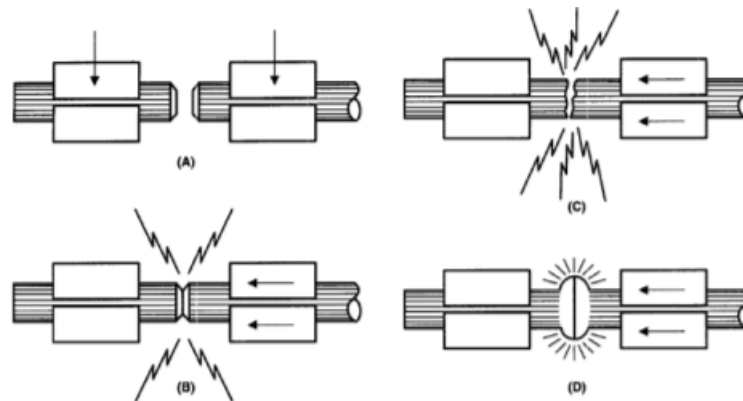
Stykové svařování je podle ČSN EN ISO 17677-1 definováno jako: „Způsob odporového svařování, při kterém se spojení svařovaných dílů uskutečňuje na celém povrchu stykových ploch“ [2].

Odporové stykové svařování je podle typu ohřevu rozděleno na:

- a) **Pěchovací** - využívá odporového tepla vzniklého průchodem proudu mezi svařovanými součástmi.
- b) **Odtavovací** - hlavním zdrojem tepla je elektrický oblouk mezi svařovanými součástmi.

Při stykovém pěchovacím svařování se svařované díly přitlačí proti sobě čelní obrobenu plochou. V momentu, kdy je dosaženo požadovaného přitlačného tlaku, vstupuje do dílu svařovací proud a materiál se začne ohřívat. Výsledný svar vznikne stlačením ohříváných dílů [2].

Při stykovém svařování odtavením nejprve začne materiálem procházet proud. Při přiblížení pohyblivých čelistí dojde k postupnému natavování svařovaných dílů v místě styku. Nepřetržitým přibližováním dílů a dostatečným ohřevem svařovaných konců se natavené konce stlačí k sobě za zvýšené rychlosti i síly. Díky tomuhle procesu se tavenina vytlačí do obvodového výronku a vznikne svar v plastickém stavu. Tento způsob se používá pro svařování trubek, výlisků, různých profilů, kde je možno dosáhnout dostatečné proudové hustoty [2]. Jeho průběh je na obr. č. 11.



Obrázek 11: Stykové svařování [8]

2.2 Značení metod odporového svařování

Základní značení metod odporového svařování je dáno normou ČSN EN ISO 4063 Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování a je popsáno na obr. č. 12. Každá metoda je označena číslem, které je maximálně tříciferné. Tento systém je využíván pro počítačové zpracování, výkresovou dokumentaci, pracovní podklady nebo pro sestavování postupů svařování [5].

Číslo metody	Česky	Anglicky
2	Odporové svařování	Resistance welding
21	Bodové odporové svařování	Spot welding
211	Nepřímé bodové svařování	Indirect spot welding
212	Přímé bodové svařování	Direct spot welding
22	Švové odporové svařování	Seam welding
221	Švové svařování s přeplátováním	Lap seam welding
222	Švové svařování s rozválcováním	Mash seam welding
225	Stykové švové svařování s páskem	Foil butt-seam welding
226	Přeplátované švové svařování s páskem	Seam welding with strip
23	Výstupkové svařování	Projection welding
231	Nepřímé výstupkové svařování	Indirect projection welding
232	Přímé výstupkové svařování	Direct projection welding
24	Odtavovací stykové svařování	Flash welding
241	Odtavovací stykové svařování s předehřevem	Flash welding with preheating
242	Odtavovací stykové svařování bez předehřevu	Flash welding without preheating
25	Stlačovací stykové svařování	Resistance butt welding
29	Ostatní způsoby odporového svařování	Otheir resistance welding processes
291	Vysokofrekvenční odporové svařování	HF resistance welding (high frequency)

Obrázek 12: Značení metod odporového svařování

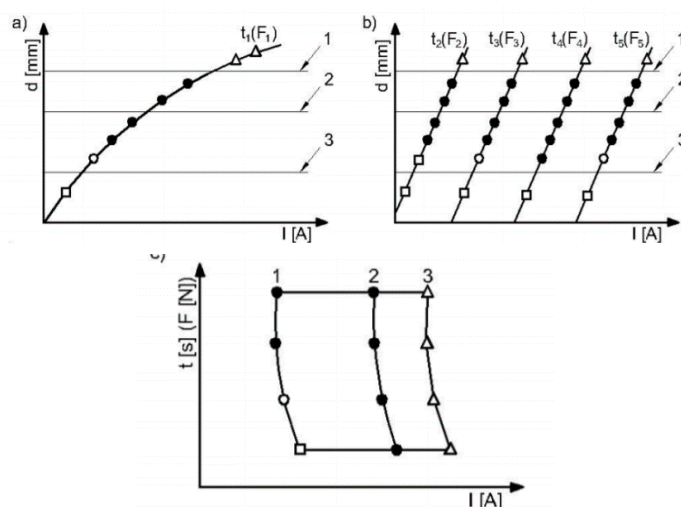
2.3 Svařovací parametry

Pro dosažení požadované jakosti svaru, je zapotřebí před zahájením samotného svařovacího procesu, určit podle požadavků na svarový spoj vhodné svařovací podmínky a odpovídající svařovací program. Mezi základní svařovací parametry, které přímo ovlivňují proces svařování, opotřebení vybavení a výslednou kvalitu svaru se řadí následující:

- přitlačná síla elektrod
- svařovací proud
- svařovací čas
- modulace.

Pro optimální výběr svařovacích podmínek je k dispozici diagram oblastí svařování, který je dle ČSN EN ISO 14327 definován jako: „Oblast svařovacího proudu, která dovoluje výrobu bodových svarů bez rozstříku s průměrem bodu rovným nebo větším než předem určená hodnota, buď při konstantní době svaru, nebo konstantní elektrodové síle“ [12].

„Jednotlivé diagramy bývají sestrojeny pomocí série růstových křivek svaru. Růstová křivka popisuje závislost svařovacího proudu na průměru svaru a bývá konstruována tak, že při určité hodnotě doby svaru, respektive elektrodové síly je zvyšován svařovací proud, aby docházelo k postupnému zvětšování průměru svaru od spodní mezní hranice, přes jmenovitý průměr svaru až po horní mez. Diagram oblasti svařování je určen vyhodnocením vad svarů, minimálního průměru svaru, průměru meze rozstříku a způsobu porušení svarů a vychází z diagramu růstových křivek“ [12]. Příklad diagramu je na obr. č. 17.



Obrázek 13: Diagram oblasti svařování

1-Mez rostříku, 2-Hodnota jmenovitého průměru svaru, \square Porušení v dělicí rovině, \circ částečně vytržený svar, Δ Rozstřík, \bullet Vytržený svar,

2.3.1 Svařovací proud

Svařovací proud je nejvýznamnější parametr ovlivňující proces odporového svařování. Při určování hodnoty svařovacího proudu se vychází ze základní proudové hustoty a z konstantní plochy elektrody. Pro orientační zjištění hodnoty proudu lze využít normu ČSN EN ISO 14373, která doporučuje konkrétní hodnoty svařovacích parametrů v závislosti na tloušťce plechu a typu materiálu.

Pro orientační zjištění hodnoty proudu lze využít následujícího empirického vztahu, který bere v potaz tloušťku jednoho svařovaného plechu t [mm].

$$I_s = 6500 \cdot t [A] \quad (2)$$

2.3.2 Přítlačná síla elektrod

Parametr přítlačné síly elektrod je roven součinu základního měrného tlaku a kontaktní plochy elektrody. Tlak elektrod je volen na základě rovinnosti a čistoty svařovaného povrchu. Při nerovnostech musí být zajištěno dosednutí elektrod a dokonalý průchod svařovacího proudu. Pro orientační zjištění hodnoty přítlačné síly lze využít normu ČSN EN ISO 14373, která doporučuje konkrétní hodnoty.

V případě svařování tuhých a zdeformovaných dílů se volí přítlačná síla elektrod vyšší, avšak nesmí být překročena mez kluzu použitého elektrodového materiálu, aby nedocházelo k deformacím a poškození. Správně nastavená přítlačná síla elektrod zamezuje nevhodným jevům jako např. výstřiku roztaveného jádra svaru, jiskření či výraznému opotřebením elektrod a při ochlazení působí na zjemnění krystalizace. Z tohoto důvodu je přítlačná síla ke konci procesu programově zvyšována, dokud teplota jádra svaru neklesne pod 400°C. Chlazené elektrody pomáhají odvést teplo z místa spoje a je tak docíleno nižší deformace. K dosažení nejkvalitnějších spojů jsou potřebné veliké přítlačné síly, které je možné měnit i v průběhu svařovacího cyklu [3].

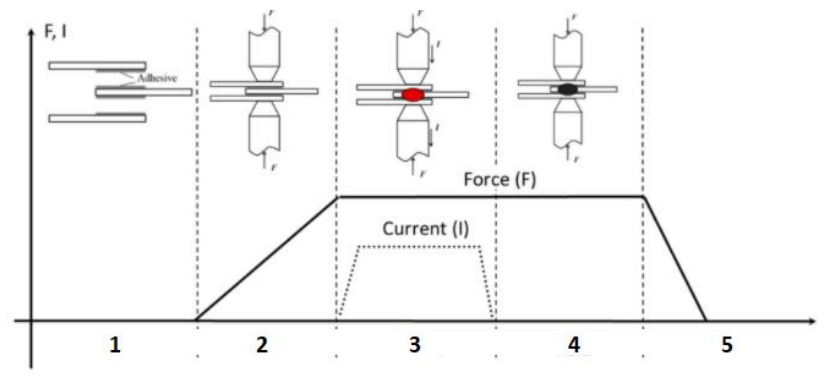
2.3.3 Svařovací čas

Svařovací čas udává interval průchodu elektrického proudu svařovaným materiálem. Délka závisí především na velikosti svařovacího proudu. Volba svařovacího času musí být zvolena tak, aby došlo k vytvoření svaru s odpovídající pevností bez zbytečného přehřátí. Vzhledem k redukci tepelných ztrát se volí krátké svařovací časy. Svařovací čas může mít vliv na vady ve svarovém spoji jako např. póry. Při použití pulsního svařování, je svařovací čas počítán od prvního pulsu až po ukončení pulsu posledního, včetně doby přerušení. Lze tedy

konstatovat, že se jedná o časový interval potřebný k vytvoření úplného svaru. V případě deformovaných a špatně očištěných povrchů se volí delší svařovací časy a nižší proudová hustota tak, aby nedocházelo k přetavení spoje a vystříknutí tekutého kovu. [6][8]

2.3.4 Svařovací program

Svařovací program řídí jednotlivé změny hodnot svařovacího proudu a svařovací síly v průběhu celého svařovacího cyklu. Ukázka standartního svařovacího programu pro bodové svařování je znázorněna na obr. č. 14.



Obrázek 14: Svařovací program bodového svařování [13]

Oblast 1 označuje vložení přeplátovaných plechů mezi otevřené elektrody. V oblasti 2 dochází k uzavření elektrod, jejich doteku se svařovaným materiálem a k začátku působení přítláčné síly elektrod. V oblasti 3 dochází k průchodu svařovacího proudu materiálem a jeho svařování. Počátek oblasti 4 znamená vypnutí svařovacího proudu, při zachování přítláčné síly elektrod. Proces bodového svařování je zakončen oblastí 5, kdy dochází k otevření elektrod a k vyjmutí svařovaných plechů [4].

2.3.5 Doporučené svařovací parametry

Již výše zmíněná norma ČSN EN ISO 14373 uvádí doporučené svařovací parametry. V tab. č. 1 jsou zobrazeny doporučené svařovací parametry pro ocelové plechy a v tabulce č. 2 pro ocelové plechy s povrchovou úpravou zinkem.

Tabulka 1: Doporučené svařovací parametry pro ocelové plechy

Tloušťka plechu		Průměr pracovní části elektrod [mm]	Svařovací parametry					
od [mm]	do [mm]		měkký režim			tvrdý režim		
			F _s [kN]	t _s [per.]	I _s [kA]	F _s [kN]	t _s [per.]	I _s [kA]
0,4	0,6	4	1,5-2,0	5-7	4-6	1,3-1,8	4-5	5-8
0,6	0,8	4	1,2-1,3	7-10	5-7	1,7-2,0	6-8	6-9
0,8	1,0	5	1,4-1,5	9-12	6-8	1,9-2,6	7-10	7-10
1,0	1,2	5	1,6-1,8	11-15	7-9	2,5-3,2	8-12	8-12
1,2	1,6	6	1,9-2,1	14-18	8-11	3,0-4,0	9-13	10-13
1,6	2,0	7	2,6-2,9	18-22	9-13	3,9-5,2	10-14	12-15
2,0	2,5	8	3,4-3,7	22-28	10-15	5,0-6,2	12-16	14-18
2,5	3,0	9	4,4-4,7	28-35	12-17	6,0-7,5	15-20	17-20

Tabulka 2: Doporučené svařovací parametry pro plechy se Zn povlakem

Tloušťka plechu		Průměr pracovní části elektrod [mm]	Svařovací parametry					
od [mm]	do [mm]		Žárově pozinkovaný plech			Elektrolyticky poz. plech		
			F _s [kN]	t _s [per.]	I _s [kA]	F _s [kN]	t _s [per.]	I _s [kA]
0,4	0,6	4	1,5-2,0	6-8	7-9	1,5-2,0	6-8	6-8
0,6	0,8	4	1,9-2,2	8-10	8-10	1,9-2,2	8-10	7-9
0,8	1,0	5	2,2-2,9	9-12	9-11	2,2-2,9	9-12	8-10
1,0	1,2	5	2,8-3,6	10-13	10-13	2,8-3,6	10-13	9-13
1,2	1,6	6	3,4-4,5	11-15	14-16	3,4-4,5	11-15	12-15
1,6	2,0	7	4,4-5,5	12-16	18-21	4,4-5,5	12-16	14-17
2,0	2,5	8	5,4-6,8	14-18	22-26	5,4-6,8	14-18	17-22
2,5	3,0	9	6,6-8,0	17-21	26-30	6,6-8,0	17-21	19-24

2.3.6 Svařovací režimy

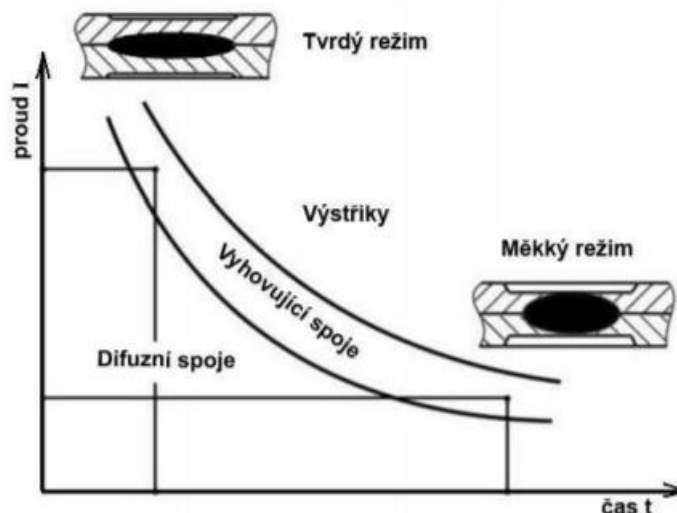
Svařovací režimy představují kombinace velikostí jednotlivých svařovacích parametrů. Rozdělení těchto svařovacích režimů je uvedeno v tab. č. 3. Grafické znázornění oblastí je na obr. č. 15.

Tabulka 3: Rozdělení svařovacích režimů [1]

Parametry	Měkký režim	Tvrký režim
Tlak	do 60 N/mm ²	nad 80 N/mm ²
Proudová hustota	do 150 A/mm ²	nad 200 A/mm ²
Svařovací čas	cca 1,5 s	3 a více period (0,16s)

Měkký svařovací režim je charakteristický nižším svařovacím proudem a tlakem, delším svařovacím časem a vyšší spotřebou energie. Vzhledem k této kombinaci parametrů je tento režim méně produktivní z hlediska doby zhotovení svaru. Výsledná pevnost svaru je menší než u tvrdého režimu. Elektrody zanechávají vtisky v materiálu a vykazují nižší životnost. Výhoda tohoto režimu je, že je minimalizována možnost zakalení materiálu a celkové náklady na pořízení jsou nižší než u tvrdého režimu [10].

Tvrký svařovací režim je charakteristický působením vyššího tlaku a svařovacího proudu. Svařovací čas je zde oproti měkkému režimu kratší. Díky tomu se dosahuje vyšší produktivity. Elektrody jsou méně tepelně namáhány, což vede k vyšší životnosti. Výsledkem je dosažení kvalitnějšího svaru s jemnozrnnou strukturou [10].



Obrázek 15: Oblasti tvrdého a měkkého svařování [10]

2.4 Vznik tepla

Celkové teplo Q vyprodukované při svařování mezi elektrodami za čas t je podle Joule-Lenzova zákona dáno rovnicí: [4]

$$Q = R \cdot \int_0^T I^2 dt \text{ [J]} \quad (3)$$

Kde,

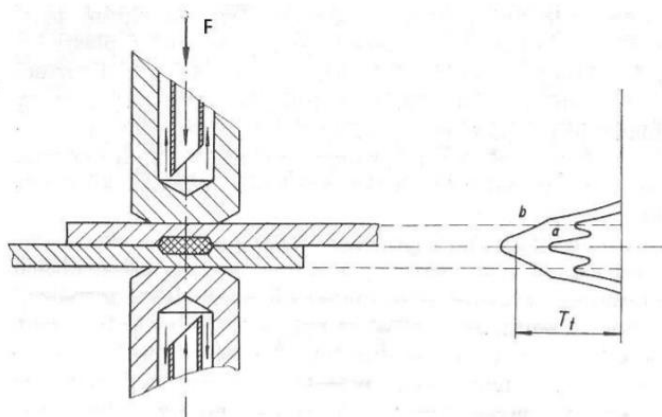
R je celkový činný odpor mezi elektrodami (pracovní odpor) [Ω]

I je proud protékající svařovanými díly [A]

t je čas průchodu proudu [s]

Tepelné procesy při ohřevu odporovým svařováním jsou výrazným fyzikálním jevem. Matematické vyjádření teplotního pole při bodovém svařování je velmi komplikované. Řešení je možné pouze při akceptování určitých okrajových podmínek, které avšak neodrážejí skutečný proces termofyzikálních vlastností svařovaných materiálů. Při svařování pozinkovaných ocelových plechů je zapotřebí uvažovat změny odporu při roztavení zinkové vrstvy [4].

Množství odvedeného tepla závisí na rozměru styčné plochy, součiniteli tepelné vodivosti, měrného tepla, měrné hmotnosti a času. Tento průběh teplot je zobrazen na obr. č. 16. V první fázi se nejvíce tepla soustřeďuje v oblasti styku plechů. Zde nabývá odpor nejvyšších hodnot, v ose svaru, kde je proudová hustota největší. Z této oblasti se teplo rozvádí dále do základního materiálu ve směru kolmém na plochu dotyku elektrody se svařovaným materiálem [4].

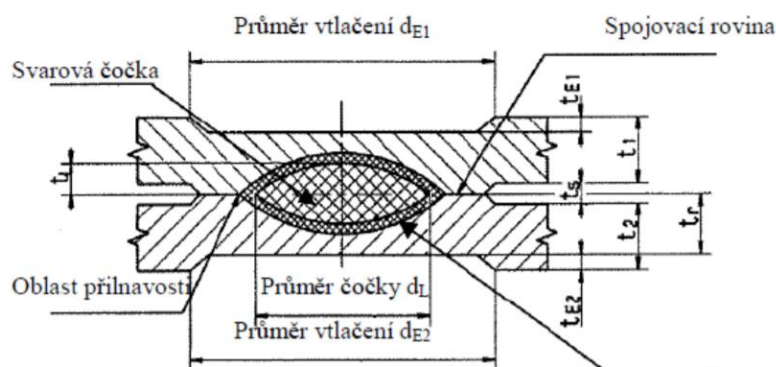


Obrázek 16: Průběh teplot při bodovém svařování [5]
a) na začátku svařování b) na konci svařování T_t – teplota natavení svařovaného materiálu

2.5 Geometrie bodového svaru

Bodově svařovaný spoj je vždy charakterizován souborem vlastností, které se podle požadavků na kvalitu posuzují měřitelnými veličinami [4]:

- Průměr čocky d_L
- Velikost vtlačení elektrod t_E – má být maximální 20 % tloušťky plechu.
- Průměr vtlačení d_E – platí vždy střední průměr vtlačení, zapříčiněného elektrodou.
- Hloubka vtlačení t_E – největší hloubka vtlačení, zapříčiněného elektrodou.
- Rozměr spáry t_S – smí být maximálně 20 % střední tloušťky z obou plechů. Při individuálních požadavcích na hlučnost a těsnost je možná výjimka.
- Průměr svarového bodu d_p - je při stříhovém lomu střední průměr plochy lomu ve spojovací rovině plechů bez vzniklé oblasti přilnavosti. U vytrhnutého lomu je d_p střední průměr základní plochy vytrhnutého výstupku.



Obrázek 17: Svarový bod [4]

Při rozdílných tloušťkách plechu je pro stanovení průměru svarového bodu, respektive svarové čocky primární tenčí plech. U dílenských zkoušek může dojít k vytržení svarových bodů a ke vzniku výčnělků, jejichž průměr je v závislosti na vytvrzení materiálu při svařování větší než svarová čocka [4].

Při stanovení průměru bodu se pomocí posuvného měřidla změří průměr d_1 a d_2 . Z těchto dvou měření se stanoví průměrná hodnota. Pro nepovlakované a povlakované plechy platí vztah [4]:

$$d_p = 1,15 \cdot d_L \quad (4)$$

Kde,

d_p je průměr svarového bodu [mm]

d_L je průměr svarové čočky [mm]

Tabulka 4: Stanovení tloušťky plechu a průměru čočky

Minimální tloušťka plechu t_1 [mm]	Průměr čočky $d_{Lmin} \geq 3,5 \sqrt{t_1}$ [mm]	Průměr bodu $d_{pmin} \geq 1,15 d_{Lmin}$ [mm]	Minimální tahová střižová síla F_{min} [kN]
0,5	2,5	2,9	1,2
0,6	2,7	3,1	1,5
0,7	2,9	3,3	1,9
0,8	3,1	3,6	2,3
0,9	3,3	3,8	2,7
1,0	3,5	4,0	3,2
1,25	3,9	4,5	4,2
1,5	4,3	4,9	5,1
1,75	4,6	5,3	6,1
2,0	5,0	5,7	7,2

2.6 Elektrody pro odporové svařování

Elektrody jsou vyměnitelné části každého odporového svařovacího stroje. Dostávají se do přímého styku se svařovanými díly. Svařovací elektrody mají při tvorbě svaru zásadní funkci přenosu svařovacího proudu na plochu svařovaného materiálu. Z velké části řídí hustotu proudu a udávají výslednou velikost svaru. Proto musí mít elektrody dobrou elektrickou vodivost v kombinaci s dostatečnou pevností. Dále musí být dostatečně tvrdé, aby odolaly opakovanému působení svařovací síly [13] [2].

Během odporového svařování plní každá elektroda následující funkce:

- a) Přivádí proud
- b) Vytváří sílu pro dosažení potřebného přitlaku
- c) Odvádí teplo z vnějšího povrchu dílu

2.6.1 Materiály svařovacích elektrod

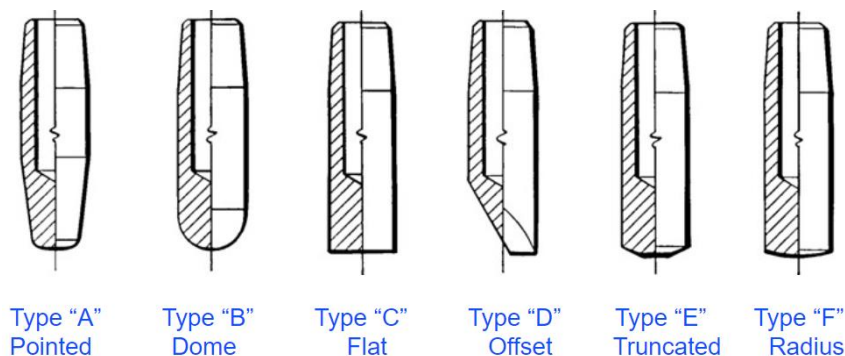
Vzhledem k požadavkům na vysokou tepelnou a elektrickou vodivost, mechanickou pevnost, odolnost proti otěru za vysokých teplot, odolnost proti oxidaci, nízké výrobní náklady a dobrou obrobiteľnosť elektrod je v současnosti nejvyužívanějším materiálem pro výrobu elektrod pro odporové svařování měď, resp. její slitiny [13] [4].

V minulosti byly běžně elektrody vyráběny z čisté mědi, avšak s přibývajícím nároky na zvyšování přitlačné síly a intenzity svařovacího proudu, je k dispozici momentálně širší výběr materiálů. Elektrodové materiály jsou podle normy ČSN EN ISO 5182 rozděleny do následujících dvou skupin [15]:

- **Skupina A** – je tvořena materiály na bázi mědi
 - 1) Tepelně nezpracované slitiny mědi s vysokou elektrickou vodivostí a střední tvrdostí
 - 2) Tepelně zpracované/tvářené za studena slitiny mědi s vyšší tvrdostí
 - 3) Tepelně zpracované slitiny mědi s vylepšenými mechanickými vlastnostmi, ale s menší elektrickou vodivostí než u typu 1 a 2
 - 4) Slitiny mědi se speciálními vlastnostmi
- **Skupina B** – je tvořena slinutými materiály
 - 10) a 11) Slinuté materiály mědi a wolframu
 - 12) Slinuté materiály mědi a karbidu wolframu
 - 13) Slinuté materiály molybdenu

- 14) Slinuté materiály wolframu
- 15) Slinuté materiály wolframu a stříbra

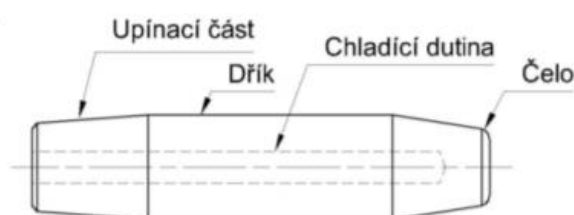
Norma ČSN EN ISO 5821 elektrody pro odporové svařování rozděluje podle jejich tvaru. Základní tvary elektrod jsou zobrazeny níže na obr. č. 18.



Obrázek 18: Normalizované tvary svařovacích elektrod [24]

2.6.2 Konstrukce svařovacích elektrod

Část elektrody, která při svařování přichází do styku s materiálem, se nazývá čelo. Čelo elektrody může být kulové, odsazené nebo ploché. Další částí elektrody je dřík, který je dostupný ve dvou variantách, a to rovný nebo ohnutý. Upínací část elektrody slouží k upevnění do držáku a může být buď přímá, kuželová nebo opatřena závitem. V elektrodě je obvykle vytvořena dutina, která slouží pro přívod chladicího média. Jako nejčastější médium se používá voda. Jako externí chlazení se využívá chlazení zaplavením nebo připojením chladicí cívky [15]. Všechny tyto části jsou popsány na obr. č. 19.



Obrázek 19: Konstrukce elektrody pro bodové svařování [15]

Velikost čelní plochy elektrody je velmi důležitý parametr, jelikož určuje velikost bodu svaru, kde průměr kontaktní plochy elektrody je vždy o trochu větší než průměr svarové čočky. V případě, kdy je velikost kontaktní plochy elektrody příliš malý, bude svarový bod malý a slabý. Bude-li naopak průměr kontaktní plochy příliš velký, dojde k velkému natavení materiálu. Tyto svary jsou hodnoceny jako nevyhovující. Stanovení průměru čelní plochy záleží na vlastním odporu materiálu elektrody a na tloušťce svařovaného materiálu [13].

Pro výpočet průměru čelní plochy elektrod při svařování plechu z nízkouhlíkové oceli se používá vzorec:

$$D = 2,54 + 2t_L \quad (5)$$

kde,

D je průměr elektrody [mm]

t_L je tloušťka plechu [mm]

V případě, že jsou oba svařované plechy stejné tloušťky, dosazuje se za t shodnou hodnotu a výsledné průměry konců elektrod se musí taktéž rovnat. V případě že jsou tloušťky plechů rozdílné, dosazuje se za t příslušné hodnoty svařovaných plechů a průměry konců elektrod se tedy liší v závislosti na těchto tloušťkách [13].

2.6.3 Životnost elektrod

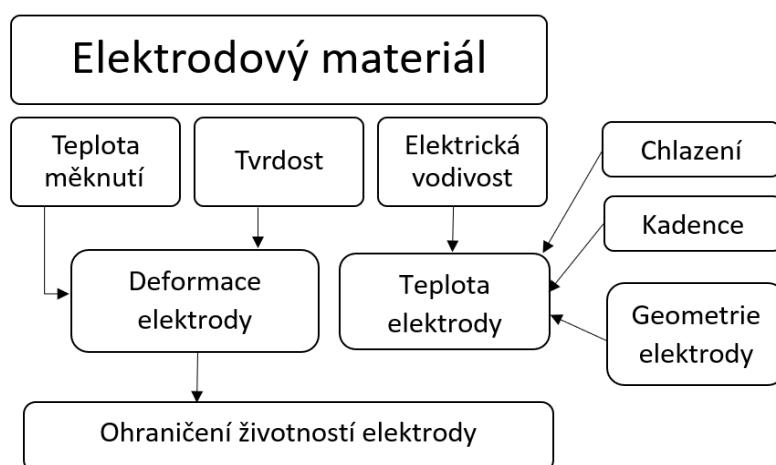
Životnost elektrod pro všechny materiály je definována normou ČSN EN ISO 8166 jako: „Počet svarů, které mohou být provedeny v požadované jakosti svaru před nezbytnou úpravou dotykové plochy elektrody. Elektroda dosáhne své životnosti, když provedené svary mají průměr čocky zjištěné odlupovací zkouškou menší než $3,5 \cdot \sqrt{t_{pl}}$ (kde t_{pl} je tloušťka plechu v mm) u tří svarů na zkušebním vzorku pěti po sobě následujících svarů“ [16].

Životnost elektrod závisí především na svařovaném materiálu, tvaru a rozměrech elektrod, chlazení, režimu svařování nebo na způsobu povrchové úpravy svařovaného materiálu. Při svařování dochází k postupnému opotřebení elektrod. Na celkovou životnost elektrod mají vliv tepelné, metalurgické a elektrické procesy. Velký vliv na životnost má přechodový odpor. Ten z velké části závisí na stavu dosedací plochy elektrody.

Mechanismus opotřebení elektrod při svařování ocelí bez povlaků je charakteristický postupným zvětšováním dosedací plochy elektrody, se kterou se snižuje proudová hustota. „Při svařování povlakovaných ocelí dochází k výraznému ovlivňování kontaktní plochy elektrody roztaveným materiálem povlaku, který má vliv na děje, provázející svařovací proces. Způsobuje především zvýšení teploty v koncové části elektrody, změnu chemického složení elektrodového materiálu a mechanickou deformaci jejího čela. Mechanická deformace čela elektrody je zapříčiněna opakovaným natavováním částí materiálu povlaku a jejich následným odtržením na konci svařovacího cyklu, čímž dochází k tvorbě malých kráterů na čele elektrody“ [13].

Životnost elektrod je možné zvýšit několika způsoby [13]:

- Použít elektrodový materiál o vyšší tvrdosti, teplotě měknutí nebo elektrické vodivosti
- Zvýšit průtok chladicího média
- Snížit vstupní teploty chladicího média
- Zmenšit vzdálenosti mezi koncem trubičky pro přívod chladicího média a stykové plochy elektrody



Obrázek 20: Vliv vlastností materiálu elektrod na životnost [17]

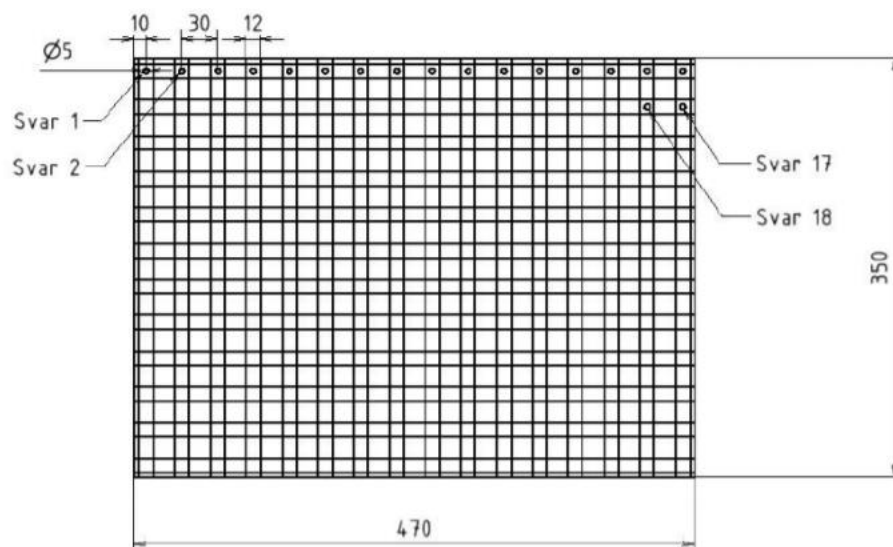
Při dosažení životnosti elektrody se mohou aplikovat procesy, díky kterým se elektroda zachová a dá se následně znovu použít. Nejčastěji dochází k periodické úpravě geometrie frézováním nebo soustružením. Po této úpravě vykazuje čelo elektrody geometrické vlastnosti jako původní stav. Elektroda je finálně znehodnocena v momentě, kdy již není možné geometrii čela dále obnovit. Tento postup je v současné době využíván v automobilovém průmyslu, například ve firmě Škoda Auto. Zde jsou jednotlivá robotizovaná pracoviště vybavena frézovacími zařízeními a proces periodické úpravy je plně automatizován. Díky tomu je možné jednou elektrodou zhotovit 2880 až 7480 svarů v závislosti na svařovaném materiálu [13].

2.6.4 Zkoušky životnosti elektrod

Při zkoušení jsou většinou používány bodové svařovací stroje standartního typu a k napájení střídavý proud s frekvencí 50 Hz nebo 60 Hz proto, že takové stroje nelze regulovat. Každý svařovací stroj musí splňovat předepsané elektrické a mechanické specifikace dle normy ISO 669. Chlazení elektrod je dáno průtokem vody minimálně 4 litry za minutu při svařování ocelových plechů bez povlaku a 6 litry za minutu pro svařování povlakovaných ocelí. Vstupní teplota média by neměla být vyšší než 20 °C a výstupní menší než 30 °C. Každá z elektrod musí

mít vlastní chladicí okruh. Volba tvaru a materiálu elektrod musí být provedena na základě norem. Zakončení elektrody je tvořeno komolým kuželem o vrcholovém úhlu 120° , průměr pracovní plochy závisí na tloušťce plechu a je roven $5 \cdot t_{pl}$. Dále musí být zajištěna souosost a rovnoběžnost pracovních ploch elektrod [17].

„Samotná zkouška je prováděna na plechu z materiálu, který musí být volen podle ČSN EN ISO 8166 a jehož délka by měla být nejméně 470 mm a šířka 350 mm. První řada bodů začíná v jednom rohu panelu, nejméně 10 mm od okraje, svary postupují s roztečí nejméně 30 mm, jakmile je dosaženo okraje, dojde ke změně smyslu posuvu plechu a vytváření nové řady se stejnou analogií. Tento postup se opakuje, dokud nedojde k ohřátí plechu na 60°C . Poté je plech otočen o 180° a dochází k tvorbě nové řady podle předchozího postupu. K ukončení svařování dojde, jakmile je na plechu zhotoveno 192 bodů. Svařování musí být prováděno předepsanou rychlostí, která je v závislosti na použitém stroji: 50 svarů/min pro stojanové svařečky, 30 svarů/min pro robotové svařování a 10 svarů/min pro mnohobodové stroje“ [13] [16]. Schéma prováděných svarů a jejich umístění na plechu je zobrazeno na obr. č. 21.



Obrázek 21: Rozměry zkušebního tělesa

„Po každých 192 svarech je vytvořeno 8 zkušebních svarů na samostatném plechu o rozměrech 30 mm x 250 mm, který je vyroben ze stejného materiálu jako hlavní plech. Svary musí být zhotoveny se stejnou vzdáleností od okraje a roztečí, jako na hlavním plechu. Tento zkušební plech slouží pro odlupovací zkoušku nebo zhotovení mikrovýbrusů, pět z těchto svarů je využito pro posouzení jakosti a tři jsou ponechány jako zásoba, pokud by bylo nutné zkoušku jakosti opakovat“ [16].

„První série zkoušek je prováděna s hodnotou svařovacího proudu, která byla stanovena pomocí diagramu růstové křivky. Při druhé sérii zkoušek dochází ke změně velikosti proudu na hodnotu definovanou podle ČSN EN ISO 8166 a její volba závisí na ustanovení v konstrukční specifikaci“ [16]:

- a) Hodnota proudu o 10% nižší než minimální hodnota pro výstřik nebo rozstřik.
- b) Hodnota proudu o 200A nižší než minimální hodnota pro výstřik nebo rozstřik.
- c) Hodnota proudu o 10% vyšší než minimální hodnota pro výstřik nebo rozstřik, pro simulaci přetížení elektrod.

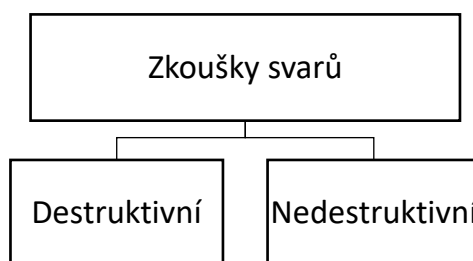
Každou zkoušku životnosti je nutné provádět třikrát a ze získaných výsledků stanovit aritmetický průměr a rozsah životnosti elektrod [17].

2.6.5 Hodnocení kvality bodových odporových svarů

Cílem všech svařovacích procesů je vytvoření spoje, vykazujícího požadované vlastnosti a jakost. U bodových svarů jsou hlavní kritéria zkoumaná při kontrole kvality:

- průměr svaru
- symetrie
- dostatečný průvar svarové čočky
- tvrdost spoje.

Výslednou kvalitu svaru ovlivňuje zejména přitlačná síla elektrod, geometrie čela elektrod, velikost kontaktní plochy, průběh svařovacího cyklu a celkový odpor svařovací soustavy. Ke zkoumání kvality odporového svarového spoje jsou využívány speciální kontrolní metody, které se dělí podle způsobu zkoumání vzorku na destruktivní a nedestruktivní.



Obrázek 22: Rozdělení zkoušek svarů

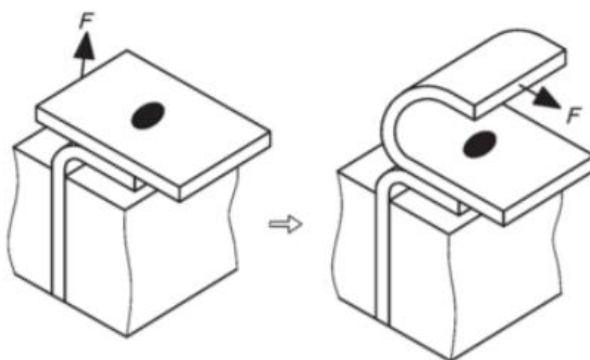
Při nedestruktivní zkoušce nedochází k poškození vzorku a nejčastěji se využívá ultrazvuk, prozařování nebo kapilární zkouška. Při destruktivních zkouškách dochází

k poškození vzorku při zkouškách tahem, lámavosti nebo odlupovací zkoušce. Nejčastěji se používá zkouška stříhem, odlupovací zkouška a sekáčová zkouška.

2.6.5.1 Odlupovací zkouška

Odlupovací zkouška je definována normou ČSN EN ISO 10447 jako: „Destruktivní zkouška, při které jsou zkoušeny svary působením odlupovací síly, která vyvolává napětí především kolmo k povrchu dělicí roviny spoje“ [18]. Tato metoda zkoumání kvality svaru slouží k určení rozměrů a způsobu porušení.

Před započítáním zkoušky je zapotřebí upravit tvar plechů ohnutím jejich konců, aby mohlo být odlupování provedeno. K testování se používají plechy tloušťky 0,5 až 3 mm. Při zkoušce je jeden z plechů napevno upnut ve svěráku. Druhý plech je uchycen speciálním nástrojem a namáhán působením odlupovací síly. Jako nástroje pro odlupování bývají nejčastěji používány odvíjející nástroje, kleště, štípačky nebo speciální mechanizovaná zařízení [18].



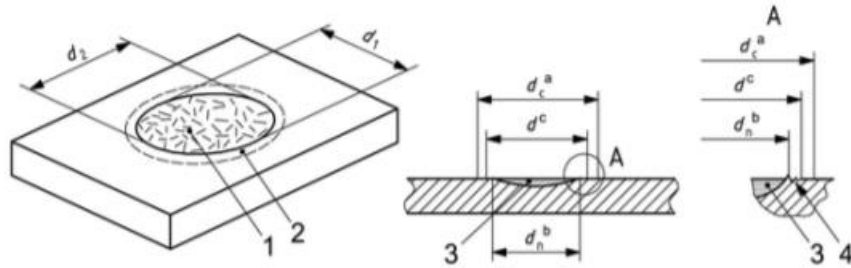
Obrázek 23: Odlupovací zkouška [18]

Odlupováním může dojít k porušení svaru v dělicí rovině nebo k jeho vytržení, které může být částečné (obr. č. 24) nebo úplné (obr. č. 25). Při porušení v dělicí rovině je rozměr svaru měřen kapesní lupou nebo zvětšovací sklem se stupnicí, aby bylo možné určit přesné hranice deformace. Při vytržení svaru se používá k měření nožové měřidlo. Naměřené hodnoty se zpravidla zaokrouhlují na jedno desetinné místo [18].

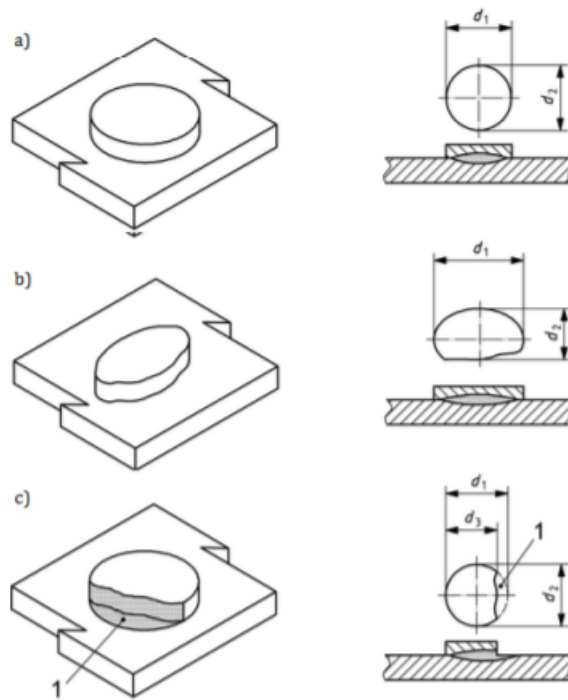
Základním rozměrem všech bodových svarů je střední průměr svarové čočky, který je u symetrického svaru možné určit přímo změřením. Nesymetrický nebo částečně vytržený svar se neměří, ale rozměr se stanovuje výpočtem [18].

$$d = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (6)$$

$$d = \frac{(d_3 + d_4)}{2} \quad (7)$$



Obrázek 24: Porušení v dělicí rovině [18]



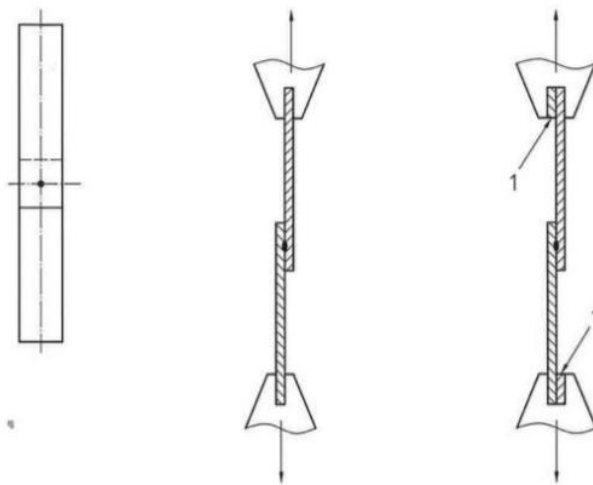
Obrázek 25: Porušení vytržením [18]

a) symetrický svar b) nesymetrický svar c) částečně vytržený svar

2.6.5.2 Zkouška stříhem

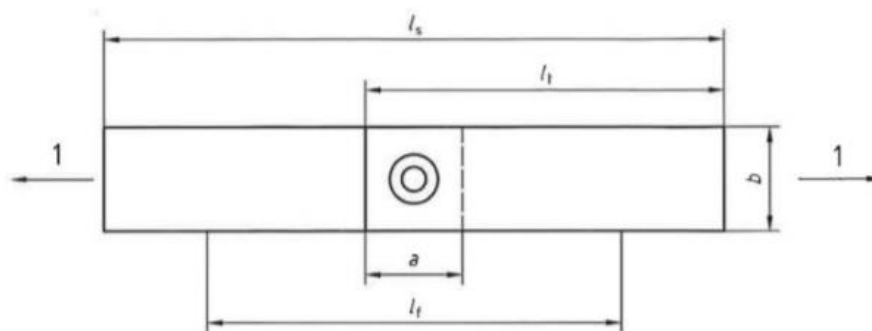
Zkouška stříhem slouží k vyhodnocení pevnosti ve stříhu u svarů, které byly vytvořeny technologií odporového bodového, švového nebo výstupkového svařování. Zkouškou stříhem se primárně zjišťuje hodnota maximální stříhové síly, kterou svarový spoj vydrží.

Pro stanovení pevnosti ve stříhu je nutné určit velikost maximální stříhové síly a průměr svaru. Hodnota maximální stříhové síly se dá běžně odečíst ze zkušebního zařízení, avšak průměr svaru je nutno změřit a vypočítat, jako u odlupovací zkoušky. Princip zkoušky je popsán na obr. č. 26.



Obrázek 26: Princip zkoušky stříhem [25], 1-přidržovací plech

Zkouška je realizována na univerzálním zkušebním stroji umožňující zkoušku tahem, který musí splňovat požadavky dané normou ČSN EN ISO 7500-1. Vzorky, podrobuující se zkoušce, mohou být vyrobeny buď vytvořením určitého počtu bodových svarů, které spojují dva zkušební plechy, které se následně rozdělí na jednotlivé části nebo svařováním každého vzorku zvlášť. Rozměry zkoušených vzorků jsou dány normou ČSN EN ISO 14273.



Obrázek 27: Vzorek pro zkoušku stříhem [25]

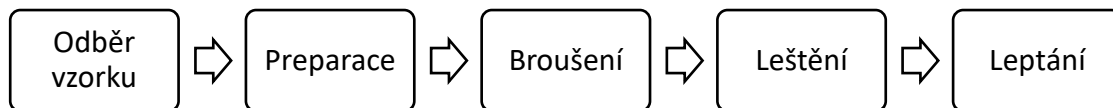
1 - směr zkušebního zatížení; a - velikost přeplátování; b - šířka vzorku; l_s - délka vzorku; l_t - délka jednotlivých zkušebních ústřížků, l_f - volná délka mezi čelistmi

2.6.5.3 Metalografická zkouška

Při metalografické zkoušce se posuzuje makrostruktura a mikrostruktura svarového spoje. Ověřování a kontrola struktury materiálu se provádí na řezu svarového spoje. Zkoumané svarové body se uprostřed rozříznou a provede se výbrus. Ten je realizován pomocí brusných papírů, kotoučů a leštícího prášku. Spojení kovu se zvýrazní pomocí leptadla. Často je využíván nital nebo kyselina solná. Takto nerovnoměrně naleptaná struktura se pozoruje při šikmém osvětlení [37].

Makrostrukturu lze pozorovat bez zvětšení pouze okem, v některých případech do 30-ti násobného zvětšení. Vyhodnocuje se především tvar a výskyt vad jako například studených spojů. Dále se analyzuje uložení jednotlivých vrstev svarového spoje a ovlivněné pásmo [37].

Pro mikroskopické analýzy se využívá světelných mikroskopů se zvětšením 100 až 2000krát. V tomto případě je možné pozorovat jednotlivá zrna a struktury materiálu. Dokumentace výsledků se provádí fotograficky [37].



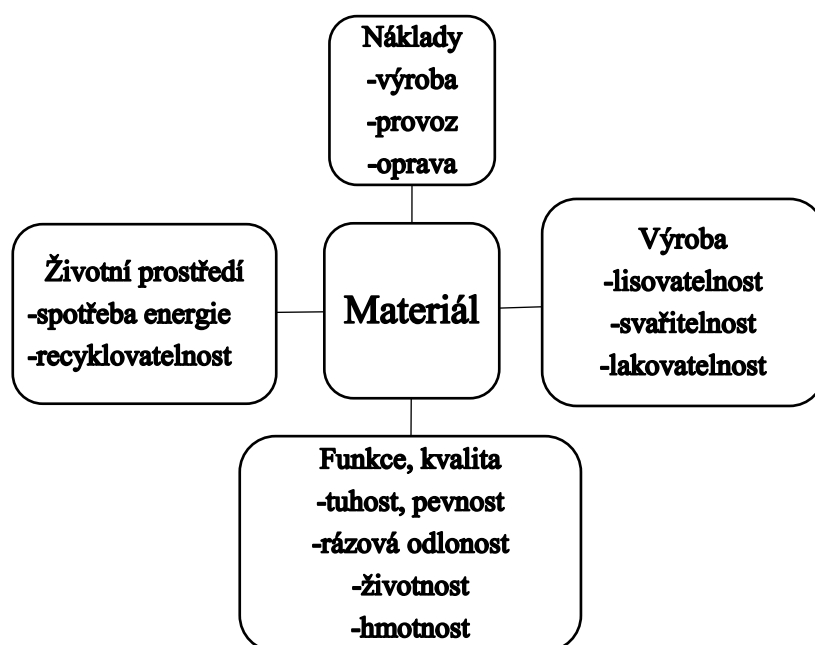
Obrázek 28: Proces přípravy vzorku pro metalografickou analýzu

3. Materiály v automobilovém průmyslu

V automobilovém průmyslu se nejčastěji používají materiály ocelové, povlakované ocelové, hliníkové plechy, slitiny hořčíku, kompozity a plasty. Tato kapitola je věnována kovovým materiálům, jelikož úzce souvisí s řešenou problematikou.

3.1 Požadavky na materiály

Automobilový průmysl stále představuje největšího odběratele ocelových materiálů. Se zvyšujícím důrazem na kvalitu, bezpečnost a náklady jsou i na materiály vytvářeny požadavky. Na obr. č. 28 je možné najít většinu faktorů ovlivňující volbu materiálu.



Obrázek 29: Požadavky na materiály v automobilovém průmyslu

3.2 Ocelové plechy pro automobilový průmysl

Charakterizovat nebo rozdělit do kategorií oceli používané v automobilovém průmyslu není zcela jednoduché. Ocelové plechy se mohou dělit na [21]:

- Nízko-pevnostní oceli
- Vysoko-pevnostní oceli
- Oceli velmi vysokých pevností
- Ultra vysoko-pevnostní oceli

V tabulce č. 5 je uvedeno primární použití vybraných ocelí. Tyto oceli jsou následně v této kapitole stručně popsány a představeny.

Tabulka 5: Použití ocelí v automobilovém průmyslu

Ocel	Použití
Mild Steel	kryty dveří, podlaha, blatníky, kliková skříň
Vysoko-pevnostní	příčnický, střední mezidveřní sloupky, kapota
Bake-hardening	dveře, kapota, střecha,
Dvoufázové	střední mezidveřní sloupky, nárazník, kola, spojovací materiál
TRIP	podélné nosníky, prahy, vyztužení nárazníku
Vícefázové	šikmý nosník dveří, ramena zavěšení kola
Martenzitické	přední a zadní nárazník, příčný nosník střechy

3.2.1 Běžná uhlíková ocel (Mild steel)

Nízko-pevnostní oceli, neboli měkké oceli, jsou běžné oceli s feritickou strukturou. Ve většině případů jsou bez legujících prvků. Vyznačují se nízkým obsahem uhlíku a dobrou tvářitelností. Použití nalézají převážně v karosérii automobilů, jako např. kryty dveří [21][22].

3.2.2 Nízko-pevnostní ocel bez intersticií

Nízko-pevnostní oceli bez intersticií jsou typické velmi malým obsahem uhlíku ($C < 0,005\%$). Tato charakteristika snižuje hodnotu meze kluzu a naopak zvyšuje hodnotu plasticity. Tato ocel je využívána pro hluboké tažení [21] [23].

3.2.3 Vysoko-pevnostní oceli bez intersticií

Tyto oceli vykazují nízký obsah uhlíku. Legovány jsou primárně titanem, niobem nebo jejich kombinací. Tyto prvky vyváží intersticiální atomy uhlíku a dusíku na stabilní precipitáty. Struktura oceli je feritická, vlastnosti závisí na velikosti zrna feritu. Tyto oceli vykazují nižší mez kluzu, vysokou tažnost, vysoký koeficient normálové anizotropie a vysoký exponent deformačního zpevnění. Použití nacházejí při operacích hlubokého tažení. Jsou vhodné pro výrobu velkých a tvarově složitějších karosářských výlisků [21][22][23].

3.2.4 Bake-hardening oceli

Bake-hardening oceli, českým názvem oceli zpevněné speciálním výrobním procesem, mají feritickou strukturu. Před lisování vykazují nízkou mez kluzu a vysoké parametry plasticity. Při používání BH ocelí se klade důraz na povrchovou úpravu, respektive lakování.

Při procesu vypalování laku v oblasti nad 170°C po dobu 20 minut dochází k deformačně-tepelnému stárnutí a k nárůstu meze kluzu v rozmezí o 30-70 MPa. Tyto díly jsou specifické svoji zvýšenou odolností vůči škrábancům, zatížení a rýhám. Z tohoto důvodu jsou ve většině případů používány na viditelné části karosérie jako například kapota, dveře nebo střecha [21][22][23].

3.2.5 Vysoko-pevnostní mikrolegované oceli

Jedná se o oceli obsahující jeden nebo více legujících prvků. Mezi prvky patří Nb, Mn, Ti nebo V, díky kterým je dosahována požadovaná smluvní mez kluzu. Obsah legur se pohybuje v rozmezí 0,01-0,1%. Tyto oceli vykazují dobrou tažnost a jsou používány na výrobu tvarově složitých a dynamicky namáhaných součástí podvozku vozidel [21][22][23].

3.2.6 Dvoufázové oceli

Dvoufázové oceli jsou tvořeny primárně jemnozrnnou feritickou maticí a sekundární tvrdou martenzitickou fází, která je ve formě ostrůvků. Dále může být přítomna doplňková fáze ve formě bainitu. Tyto oceli se vyrábí řízeným ochlazováním z austenitické fáze nebo z dvoufázové feritické a austenitické fáze, kdy dochází k přeměně části austenitu na ferit a při rychlém ochlazení k přeměně austenitu na martenzit. Mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou vhodné pro využití v automobilovém průmyslu. Vyznačují se vysokou mezí kluzu, mezí pevnosti, značnou plasticitou a tvářitelností. Všechny dvoufázové oceli mají nízký obsah uhlíku, a to maximálně do 0,18 %. Mohou být dále legovány manganem, chromem, vanadem nebo niklem. Díky těmto vlastnostem jsou používány pro výrobu strukturálních a bezpečnostních částí karoserie, jako například výztuhy nebo nosníky [21][22][23].

3.2.7 TRIP oceli

Oceli s transformačně indukovanou plasticitou vynikají skvělou kombinací pevnosti a tažnosti. Mikrostruktura těchto ocelí je tvořena martenzitem, bainitem a zbytkovým austenitem v základní feritické maticí. TRIP oceli se vyznačují vysokou hodnotou meze kluzu, velkým deformačním zpevněním a schopností absorpce energie při nárazu. Tyto vlastnosti dělají z TRIP ocelí ideální materiál na výrobu nosných a bezpečnostních prvků, prahů dveří a výztuhy nárazníků [21][22][23].

3.2.8 Vícefázové oceli (Complex Phase)

Vícefázové oceli jsou tvořeny feriticko-bainitickou strukturou, která obsahuje malé množství martenzitu, zbytkového austenitu a perlitu. Tyto oceli se vyznačují skvělou absorpcí energie a zbytkovou deformační kapacitou. Dále mají vysokou mez kluzu při zachování podobných vlastností, jako mají oceli dvoufázové. Využívají se především v konstrukci náprav automobilů [21][22][23].

3.2.9 Martenzitické oceli

Základem martenzitických ocelí je martenzitická matrice s malým množstvím feritu či bainitu. Ze skupiny vícefázových ocelí jsou martenzitické nejvíce pevné v tahu. Často jsou vystavovány temperování pro zvýšení tvárnosti. Legovány jsou prvky mangan, chrom, křemík, vanad a nikl [21][22][23].

3.3 Plechy ze slitin hliníku

Hliník a jeho slitiny jsou považovány za nejpoužívanější lehký kov na karosérie v automobilovém průmyslu. Největší výhodou hliníku a jeho slitin oproti ocelovým plechům je především jeho hmotnost a odolnost proti korozi. Proto je nejčastěji využíván v konstrukci dveří, nosičů nárazníku a dalších částí vozidla. Ovšem cena hliníku je kalkulována jako 3x vyšší než cena oceli. Největším sériovým výrobcem karosérií z hliníku je automobilka Audi [28].

V automobilovém průmyslu se používají skupiny hliníku značené dle EN AW (European Standard Aluminium Wrought) a AA (Aluminium Association). Mechanické vlastnosti vybraných slitin jsou uvedeny v tabulce č. 6.

Tabulka 6: Standartně využívané Al slitiny [29]

Označení slitiny	Vlastnosti materiálu	Oblasti použití
EN AW-2014	Zvýšené pevnostní vlastnosti	Letecký průmysl, strojírenství, automobilový průmysl
EN AW-5754	Dobré anodizační vlastnosti, dobrá svařitelnost	Strojírenství, automobilový průmysl, domácí potřeby
EN AW-6401	Odolná vůči korozi, elektrochemicky lze upravit do lesku a anodizovat, pro nejvyšší dekorativní nároky	Automobilový průmysl
EN AW-7075	Extrémně vysoké pevnostní vlastnosti	Automobilový průmysl, letecký průmysl, strojírenství

4. Povrchové úpravy v automobilovém průmyslu

V posledních letech významně vzrostly požadavky na jakost protikorozní ochrany karoserií automobilů, protože je dokázáno, že životnost vozu je z velké části ovlivněna životností samotné karoserie.

Povrchově upravené plechy vznikají nanesením povlaku na kovový podklad v podobě plechů, tabulí nebo svitků. Hlavní předností povrchově upravených plechů je odolnost vůči korozi, zlepšení fyzikálních a technologických vlastností, zpracovatelnost a estetický vzhled. Povrchové úpravy se staly nedílnou součástí výrobních procesů již při výrobě polotovarů pro další zpracování, např. tváření nebo svařování [30].

4.1 Druhy povlaků

Povlaky mohou být na bázi organické nebo anorganické. V automobilovém průmyslu se uplatňují nejvíce plechy s povlaky na bázi zinku. Podle výrobních technologií a druhu povlakovaného materiálu lze pozinkované plechy rozdělit na:

- žárově pozinkované plechy
- elektrolyticky pozinkované plechy
- plechy se slitinovými povlaky na bázi zinku vyráběné technologií žárového pokovení (Fe-Zn, Al-Zn aj.) nebo elektrolytického pokovování (Zn-Ni) [30].

4.2 Technologie nanášení povlaků

Zakotvení kovových povlaků a vrstev v základním materiálu spočívá v několika základních způsobech:

- Mechanický způsob
- Fyzikální způsob
- Chemické a elektrochemické způsoby

Nejdůležitějším hlediskem pro hodnocení ochranné funkce kovových povlaků je tloušťka a poréznost povlaku. Životnost povlaku je závislá na tloušťce [31].

4.2.1 Žárové zinkování

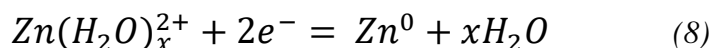
Žárové zinkování je velice rozšířená metoda povrchové úpravy. Principem je ponoření součásti do lázně roztaveného zinku, společně s dalšími legujícími prvky. Dojde k vyloučení zinkového povlaku na povrchu součásti, kde spolu se základním materiálem tvoří intermetalické fáze. Mezi základním materiálem a povlakem vzniká metalurgický spoj. V porovnání s galvanicky naneseným povlakem vykazuje tento spoj vyšší pevnost. Výsledkem žárového zinkování je rovnoměrná a přilnavá vrstva s výbornou korozní ochranou. [31].

Mezi hlavní přednosti žárového zinkování patří dlouhá životnost, rovnoměrnost povlaku na celém povrchu, možnost zinkování i hůře dostupných ploch, odolnost proti mechanickým vlivům, nízké vstupní náklady a bezproblémové svařování všemi způsoby zinkové oceli [31].

4.2.2 Elektrolytické zinkování

Elektrolytické zinkování je také často nazýváno jako galvanické zinkování. Díl se zavěsí do vodního roztoku zinečnaté soli (elektrolyt) a zapojí se jako katoda ke zdroji stejnosměrného proudu. Jako anoda se zapojí desky z čistého zinku. Pomocí elektrického proudu probíhá elektrolytický děj, kdy se vylučuje na povrchu součásti hladký a stříbřitě lesklý zinkový povlak, který je spojen se základním materiálem chemickou vazbou [31].

Proces nanášení zinku lze popsat rovnicí:



Mezi hlavní výhody elektrolytického zinkování patří elektrochemická ochrana, dobrá odolnost proti abrazi a slabá vrstva vhodná k aplikaci dalších povlaků. V tomto případě dochází k zachování mechanických vlastností ocelového pásu i po nanesení zinkového povlaku, jelikož proces probíhá za teplot do 60 °C [31].

4.2.3 Tloušťka povlaku

Zásadní vliv na tloušťku vrstvy naneseného povlaku zinku má tloušťka stěny zinkované součásti. Norma ČSN EN ISO 1461 předepisuje příslušné minimální hodnoty tloušťky povlaku. V tabulce č. 7 jsou uvedeny tloušťky základních metod.

Tabulka 7: Porovnání tloušťky povlaku

Druh povlaku	Galvanicky nanášený	Nanášený ponorem	Mechanicky nanášený
Tloušťka	do 20 [μm]	35-250 μm	Do 15 μm

4.3 Výrobci povlakovaných ocelí

Tato kapitola obsahuje souhrn největších a nejvýznamnějších výrobců ocelí a povlaků, které jsou dodávány do automobilového průmyslu. Každá ze společností je stručně představena a jsou uvedeny její primární produkty a jejich využití.

4.3.1 Společnost ArcelorMittal

ArcelorMittal je přední světová ocelářská a těžební společnost s přibližně 168 tisíci zaměstnanci, fungující ve více než 60 zemích. ArcelorMittal je lídrem na všech hlavních světových trzích s ocelí, včetně automobilového průmyslu, stavebnictví, domácích spotřebičů a obalů, s předními výzkumnými a vývojovými technologiemi a technologiemi, jakož i značnými zásobami surovin pro vlastní potřebu a vynikajícími distribučními sítěmi.

Divize Flat Products je největším výrobcem ploché oceli v Evropě a vyrábí svitky válcované za tepla, svitky válcované za studena, povlakované tvarové výrobky, pocínované plechy, žárově pozinkované výrobky a smaltované oceli [32].

4.3.1.1 Povlak Jetgal

Základním materiálem je ocel lisovaná za studena, která je potažena zinkovým povlakem v inovativním procesu šetrném k životnímu prostředí. Jetgal je zinkový povlak nanášený procesem vodních par Jet Vapor Deposition (JVD). Jedná se o inovativní proces vakuového nanášení, který má následující výhody:

- proces nanášení nevyžaduje přítomnost vodíku
- ekologický a šetrný k životnímu prostředí
- lze použít k povlakování všech budoucích ultravysokopevnostních ocelí
- absence tepelného zpracování během procesu povrchové úpravy

Díky své velmi dobré odolnosti proti korozi jsou produkty Jetgal doporučovány pro mnoho aplikací v automobilovém průmyslu. Získaná kvalita povrchu splňuje nejpřísnější požadavky týkající se topografie povrchu. Povlak Jetgal se skládá z čistého zinku, a je proto tvárný, což mu umožňuje odolat vysokým rychlostem deformace. Díky vynikající vnitřní tvařitelnosti jsou vhodné pro nejnáročnější operace tažení. Ocele Jetgal mají široký rozsah bodové svařitelnosti. Ve většině případů je standardní tloušťka povlaku 5 a 7,5 μm na stranu [32].

4.3.1.2 Povlak Alusi

Jedná se o pokovenou ocel, která je na obou stranách povlakována vrstvou hliníku (90 %) a křemíku (10 %). Mezi hlavní výhody těchto povlakovaných ocelí patří:

- výborná odolnost proti korozi a chemickým vlivům látek s hodnotami pH v rozmezí 4,5 až 8,5
- tepelná odolnost do 800 °C
- tvarovatelnost a svařitelnost
- možnost použití finálního laku

Produkty Alusi nacházejí hlavní uplatnění v automobilovém průmyslu při výrobě nádrží, olejových filtrů, výfukových systémů a těsnění. Dále se používají na pokročilé vysokopevné ocele, které jsou určeny pro tváření za tepla [32].

4.3.2 Společnost Thyssenkrupp

Thyssenkrupp Steel je jedním z předních světových dodavatelů vysoce kvalitní ploché oceli. Mimo to společnost pracuje na inovacích v oceli a vyvíjí vysoce kvalitní výrobky pro inovativní a náročné aplikace. S přibližně 27 tisíci zaměstnanci společnost ročně vyrábí okolo 11 milionů tun surové oceli, což z ní činí největšího německého výrobce ploché oceli [33].

V oblasti ocelových plechů poskytuje ocelářský podnik kromě svých výrobků válcovaných za studena také širokou škálu povlakovaných produktů. Komplexní portfolio žárově zušlechťených plechových ocelí sahá od ochranných povlaků čistého zinku, zinku-železa, přes povlaky zinek-hořčík až po varianty povlaků na bázi hliníku nebo elektrolyticky pozinkovaný ocelový plech [33].

4.3.2.1 Žárově pozinkovaný ocelový pás Thyssenkrupp

Ocel je kontinuálně pozinkována a na rozdíl od konvenčně žárově pozinkovaného pásu jsou rovněž potaženy její hrany. Jako podkladové materiály jsou k dispozici oceli válcované za tepla podle DIN EN 10111 a 10025-2. Kromě velmi dobré přilnavosti k povlaku a vynikající odolnosti proti korozi nabízí žárově pozinkovaný pás dobré tvářecí vlastnosti [33].

4.3.2.2 Povlak ZM Ecoprotect

ZM Ecoprotect je specifický povlak na bázi zinku a hořčíku. Tento povlak nabízí obzvláště vysokou ochranu proti korozi a splňuje náročné povrchové požadavky na vnější viditelné komponenty. V důsledku výrazně vyšší ochrany proti korozi u zinko-hořčíkových povlaků může být tloušťka povlaku snížena ve srovnání s běžnými zinkovými povlaky přibližně o jednu třetinu. Díky tomu dojde ke snížení hmotnosti. Menší tloušťka povlaku umožňuje snazší svařování dílů [33].

4.3.3 Společnost United States Steel

Americká společnost, která byla založena roku 1901 a podílela se na výstavbě největších měst v historii USA. V dnešní době dochází k investicím do pokročilých technologií a k vývoji nových generací ocelových výrobků. Společnost je primárně navázána na automobilový, spotřební, stavební a ropný průmysl [34].

4.3.3.1 Povlak Galvalume

Jedná se o ocelový plech z uhlíkové oceli potažený slitinou hliníku a zinku kontinuálním žárovým procesem. Nominální složení povlaku je 55 % hliníku a 45 % zinku. V povlakové slitině je obsažen malý, ale důležitý přídavek křemíku. Tento prvek zvyšuje přilnavost povlaku k ocelovému podkladu, když dochází k ohýbání, tažení a tvarování. Vzhledem k výborné korozní ochraně se tento materiál využívá na části spodku automobilové karoserie [34].

4.3.4 Společnost TATA Steel

Společnost TATA Steel je jedním z nejvíce geograficky diverzifikovaných výrobců oceli na světě s působností ve 26 zemích. Obsluhuje především stavební a automobilový průmysl [35].

4.3.4.1 Povlak MagiZinc

Jedná se o žárově pozinkovaný plech legovaný hořčíkem a hliníkem. Povlak MagiZinc poskytuje zlepšenou odolnost proti korozi až s poloviční tloušťkou než běžný zinkový povlak. Snižuje znečištění nástrojů pro lepší účinnost lisovny. Vzhledem k tenčí vrstvě povlaku, omezuje povlak během svařování výpary a rozstřík. To pomáhá zlepšit kvalitu a produktivitu svařování [35].

5. Experimentální část

Cílem diplomové práce bylo zjistit vliv typu zinkového povlaku na opotřebení svařovacích elektrod při odporovém svařování materiálů se srovnatelným chemickým složením a tloušťkou. Tyto materiály se primárně lišily v rozdílném způsobu nanesení zinkového povlaku. Jednalo se o žárový a galvanický zinkový povlak. Současně s ohledem na opotřebení elektrod byly zkoumány průběhy svařovacích parametrů při narůstajícím počtu provedených bodových svarů, pevnost a rozměry svarové čočky. Výsledkem bylo vyhodnocení životního cyklu elektrod vzhledem k použitému zinkovému povlaku.

5.1 Návrh experimentu

Součástí návrhu experimentu byla nejdříve volba samotného materiálu. Jelikož hlavním cílem bylo vyhodnotit rozdíly mezi typy zinkových povlaků, byly zvoleny materiály, které jsou z hlediska svařitelnosti velmi podobné chemickým složením a tloušťkou. Pro svařování byl použit odporový svařovací lis, který je svými parametry dostačujícím zařízením pro tento experiment a byl dostupný v laboratoři Ústavu strojírenské technologie v budově CIIRC.

Pro analýzu chování svařovacích elektrod s rostoucím opotřebením byla vytvořena řada obsahující označení 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250 a 300. Jednotlivá čísla reprezentovala sady svařovacích elektrodových čepiček a jejich míru opotřebení (počet provedených svarů). Následně každou sadou elektrodových čepiček bylo svařeno 8 vzorků. Z těch bylo 7 vzorků podrobeno mechanizované zkoušce stříhem a 1 vzorek byl zkoumán metalografickou analýzou. Zkouška stříhem byla prováděna na univerzálním zkušebním stroji a sloužila k vyhodnocení maximální síly potřebné na přetržení svaru, která je především u dílů pro automobilový průmysl velmi důležitá. Následně byly na roztrhaných vzorcích měřeny velikosti svarových čoček dle normy ČSN EN ISO 10447. Metalografická zkouška byla zvolena z důvodu posuzování makrostruktury, geometrie a vnitřních vad svaru.

Pro vyhodnocení experimentu byla využita data získána z externího měřicího systému, který snímá svařovací parametry přímo v oblasti elektrod ke každému provedenému svaru. Díky této úpravě svařovacího stroje je možné dosáhnout velmi přesných výsledků. Z těchto dat byl především analyzován průběh svařovacího proudu s ohledem na typ Zn povlaku a míru opotřebení elektrodové čepičky. V průběhu svařování byly zaznamenávány data týkající se interakce materiálů a svařovacích elektrod, tj. zdali docházelo k lepení materiálu k elektrodám nebo k větším rozstříkům.

5.1.1 Specifikace materiálů

Pro experiment byly použity ocelové povlakované plechy. Byly vybrány tak, aby se jednalo z hlediska svařitelnosti o co nejvíce podobné základní materiály vzhledem k jejich chemickému složení a tloušťce. Tento výběr nám zajistil srovnatelné nastavované svařovací parametry a eliminaci dalších vlivů ovlivňujících chování elektrod a jejich opotřebení. Dle poznámky výše, výrazný rozdíl mezi těmito materiály byl ve způsobu nanesení Zn povlaku. Pro jeden materiál byl použit žárový zinek a pro druhý zinek galvanický. Přehled těchto materiálů je uveden v tabulce č. 8.

Tabulka 8: Přehled použitých materiálů

Název materiálu	Povrchová úprava	Označení	Tloušťka	Tl. Povlaku
DX54D Z100 MBO	Žárový zinek	GI	0,6 mm	11,7 μm
DC05 + ZE	Galvanický zinek	EG	0,7 mm	3,8 μm

Ocel DC05 je plech válcovaný za studena. Jedná se o nízkouhlíkovou, nelegovanou jakostní ocel. Materiál DX54D je válcovaná ocel za studena, která je žárově zinkovaná a je vhodná k hlubokému tažení.

Chemické složení materiálů je velmi podobné. Je to z toho důvodu, aby nebyl proces opotřebení elektrod ovlivňován rozdílným chemickým složením materiálů a svařovacími parametry, ale pouze způsobem nanesení Zn povlaku. Zastoupení jednotlivých prvků je uvedeno v tab. č.9. Přehled mechanických vlastností základních materiálů je uveden v tab. č.10.

Tabulka 9: Chemické složení základních materiálů

Materiál	C _{Max}	Mn _{Max}	P _{max}	S _{Max}
DX54D Z100 MBO	0,02 %	0,25 %	0,020 %	0,020 %
DC05 + ZE	0,06 %	0,25 %	0,020 %	0,025 %

Tabulka 10: Mechanické vlastnosti základních materiálů

Materiál	Mez kluzu R _e [MPa]	Mez pevnosti R _m [MPa]	Tažnost [%]
DX54D Z100 MBO	140-220	350	36
DC05 + ZE	180	270-330	40

5.1.2 Příprava vzorků

Oba zkoumané materiály byly dodány jako tabule plechu. Tudíž bylo na začátku experimentu zapotřebí připravit pro svařování vzorky vhodné pro zkoušku životnosti elektrod, a které odpovídají normě ČSN EN ISO 8166 (Způsob hodnocení životnosti bodových svařovacích elektrod při konstantním nastavení stroje). Tato norma udává rozměry vzorků a je blíže specifikována v kapitole 1.6.4 Zkoušky životnosti elektrod. Dělení plechů bylo provedeno na pákových nůžkách na plech. Z každého typu materiálu bylo připraveno 12 kusů plechu o rozměrech 350 x 470 mm určených pro vytvoření opotřebených elektrod a 128 kusů plechu o rozměrech 125 x 45 mm pro svary určené na mechanizovanou zkoušku stříhem a metalografickou analýzu.

5.1.3 Rozdělení vzorků

Na plechu o rozměrech 350 x 470 mm byly prováděny svary pro vytvoření definovaného opotřebeného kontaktní plochy elektrodových čepiček jednotlivých sad. Neprodleně po tomto procesu následovalo svaření, takto opotřebenými a upnutými čepičkami, menších vzorků (o rozměrech 125 x 45 mm) již určených pro analýzy a vyhodnocení. Tabulka č. 14 zobrazuje sady opotřebených čepiček (25 až 300) a k nim pořadí provedených svarů.

Tabulka 11: Tabulka sad elektrodových čepiček a pořadí svarů

Sada	Opotřebení	Střížná zkouška	Metalografická zkouška
25	0-21	22-28	29
50	0-46	47-53	54
75	0-71	72-78	79
100	0-96	97-103	104
150	0-146	147-153	154
200	0-196	197-203	204
250	0-246	247-253	254
300	0-296	297-303	304

5.2 Svařovací zařízení

Pro svařování plechů byl použit odporový svařovací lis Dalex PMS 11-4 (obr. č. 30). Parametry stroje jsou uvedeny v tab. č. 11. Dále byl při experimentu využíván externí měřicí systém, který umožňuje monitorování svařovacích parametrů přímo na elektrodách. Tento systém je propojen s řídicí jednotkou S.E.R, díky čemuž lze data zaznamenávat, ukládat a dále s nimi pracovat. Pro navržený experiment bylo svařováno bez regulace svařovacích parametrů.

Tabulka 12: Parametry svařovacího lisu Dalex PMS 11-4

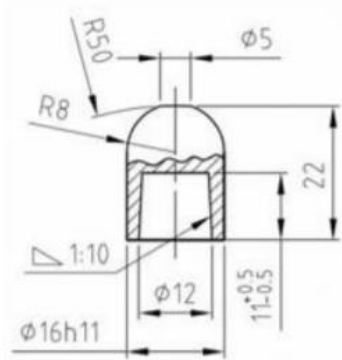
Poloha svařování	vertikální
Pohon svařovací hlavy	pneumatický
Maximální svařovací výkon	246 kVA
Jmenovitý výkon transformátoru	100kVA
Maximální svařovací proud	29,6 kA
Sekundární zkratový proud	37 kA
Elektrodová síla	200 až 6000 N
Vzdálenost mezi rameny (min/max)	115/415 mm
Délka výložníku ramen	550 mm



Obrázek 30: Svařovací lis Dalex PMS 11-4

5.2.1 Elektrodové čepičky

Při experimentu byly používány kované elektrodové čepičky 39D 1978-2 určené pro odporové svařování v automobilovém průmyslu. Jsou vyrobeny z materiálu CuCr1Zr s průměrem upínací části 16 mm a s průměrem styčné plochy 5 mm. [36] Výkres a rozměry jsou na obr. č. 31.



Obrázek 31: Výkres elektrodové čepičky 39D 1978-2

5.2.2 Kalibrační křivka – optimalizace parametrů

Při nastavování parametrů na svařovacím zařízení bylo zapotřebí nastavit hodnotu svařovacího proudu v % maximálního proudu svařovacího zdroje. Tato procentuální hodnota odpovídá pro každý materiál rozdílnému skutečnému svařovacímu proudu v kA. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí pro správné nastavení parametrů vytvořit kalibrační křivku. Tato křivka slouží k převodu hodnoty svařovacího proudu v % na kA.

Principem tvorby kalibrační křivky je postupné zvyšování procentuální hodnoty maximálního proudu při současném měření skutečného proudu při svařování. Z výsledné závislosti se následně odečte odpovídající nastavované % proudu pro určené optimalizované parametry. Optimalizované parametry se ověřují z vyhodnocení průměru čočky, hloubky vtisku, rozstříku a vizuální zkoušky svařených spojů.

Kalibrační křivka pro materiál DC05 byla již v minulosti vytvořena, proto nebylo třeba ji znovu sestavovat. Pro materiál DX54D byla kalibrační křivka vytvořena v rámci tohoto experimentu.

5.2.3 Svařovací parametry

Jak je uvedeno výše, svařovací parametry pro srovnatelné materiály s různým způsobem nanášení Zn povlaku byly odvozeny dle procesu optimalizace svařovacích parametrů, který je popsán výše. V tabulce č. 12 jsou uvedeny hodnoty parametrů, které byly pro svařování nastaveny. Tyto nastavené parametry zůstávají díky vypnuté regulaci po celou dobu experimentu stejné. Avšak mění se jejich skutečná hodnota s ohledem na typ povlaku a opotřebení elektrod. Skutečné hodnoty byly zaznamenávány softwarem svařovacího zařízení. Z tabulky č. 13 vyplývá, že již optimální parametry se kvůli jinému typu povlaku liší, a to ve velikosti svařovacího proudu. Z provedených optimalizací a ověření svařovacích parametrů vyplývá, že pro žárový Zn se nastavuje proud o cca 1kA vyšší, což odpovídá i doporučením z normy ČSN EN ISO 14373.

Tabulka 13: Použité svařovací parametry

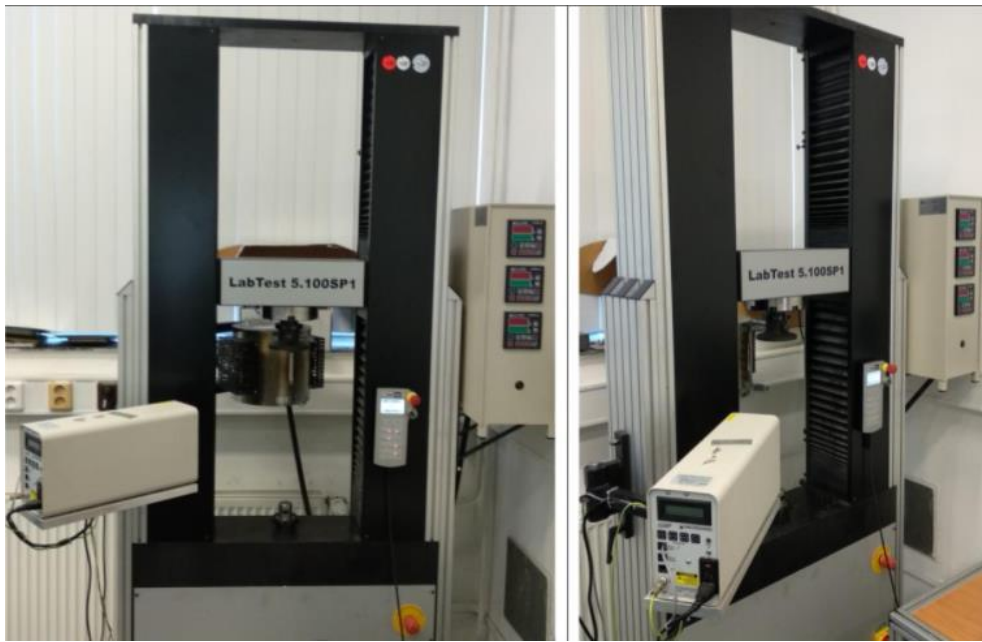
Materiál	I [%]	I [kA]	P [V]	t [ms]
DX54D +Z100 MBO	23,5	6	2	200
DC05 + ZE	24	7	2	200

5.3 Střížná zkouška

Každou sadou elektrodových čepiček z řady 25 až 300 bylo svařeno 7 vzorků, které byly podrobeny mechanizované zkoušce stříhem. Ta byla realizována v laboratoři mechanických zkoušek. Jednalo se o 7 svarů, které byly svařeny elektrodovými čepičkami s definovanou mírou opotřebení. K této zkoušce byl použit univerzální zkušební stroj LabTest Model 5.100SP1 s vertikálním provedením (obr. č. 32).

Tabulka 14: Parametry zkušebního stroje LabTest5.100SP1

Technická data	5.100SP1
Jmenovité zatížení [kN]	100
Max. zkušební rychlost [mm/min]	600
Přesnost řízení rychlosti [%]	±0,5
Rozlišení příčnicku [μm]	1
Tuhost rámu [mm/N]	1,6x 10 ⁻⁶
Rozpětí sil [kN]	500-600
Přesnost měření síly [%]	±0,3 z hodnoty v rozsahu



Obrázek 32: Zkušební stroj LabTest 5.100SP1

Zkouška byla provedena při nastavené rychlosti pohybu 10 mm/min do dosažení maximální síly. Následně od zdvihu 3 mm byla rychlost zvýšena na 300 mm/min tak, aby došlo k dotržení vzorku. Předmětem zkoumání byly vzorky bodových svarů dvou různých typů Zn povlaků svařených elektrodovými čepičkami s různým stupněm opotřebení. Hodnoty maximální sřížné síly byly zaneseny do tabulek, kde je vypočítána i průměrná sřížná síla pro jednotlivé skupiny vzorků. Na přetržených vzorcích byla následně měřena velikost svarové čočky.

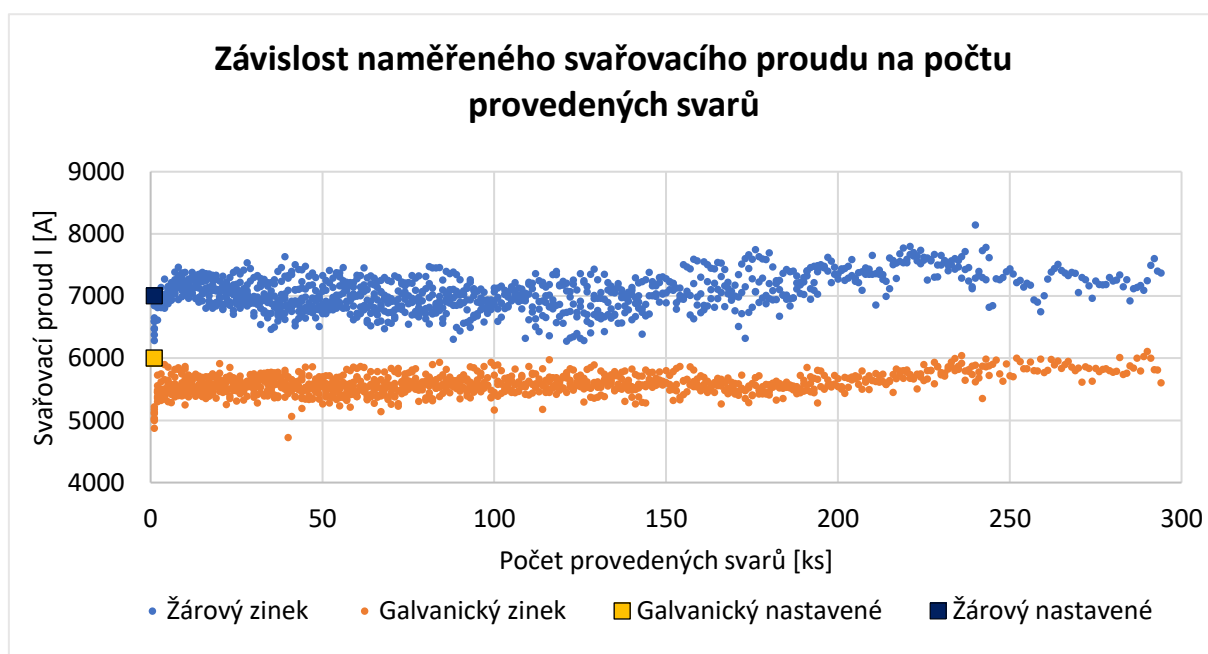
5.4 Výsledky experimentu a diskuze

V uvedeném experimentu byl především zkoumán reálný (naměřený) svařovací proud s ohledem na míru opotřebení kontaktních ploch elektrodových čepiček. Byla vyhodnocena střížná zkouška svarů a metalografická zkouška. Dalším aspektem, který byl hodnocen, byla velikost svarové čočky a změna jejího průměru v průběhu svařování. Data byla zpracována do tabulek, grafů a schémat tak, aby výsledky byly co nejpřehlednější a přesné. Jednotlivé výsledky, hodnoty a grafické závislosti byly okomentovány, jakým způsobem byly získány a jaký je jejich význam.

5.4.1 Průběh svařovacího proudu

Svařovací proud byl pro každý provedený svar automaticky odečten pomocí řídicí jednotky S.E.R a zaznamenán do předem připravené tabulky v programu excel.

V grafu č. 1 je zobrazena závislost velikosti svařovacího proudu na počtu provedených svarů. Jedná se o reálný svařovací proud, který byl při každém svaru změřen, ne o nastavenou hodnotu. Pro žárový zinek byla nastavena, dle optimalizací svařovacích parametrů, hodnota svařovacího proudu na 7000A. Pro zinek galvanický byla nastavená hodnota svařovacího proudu 6000A.

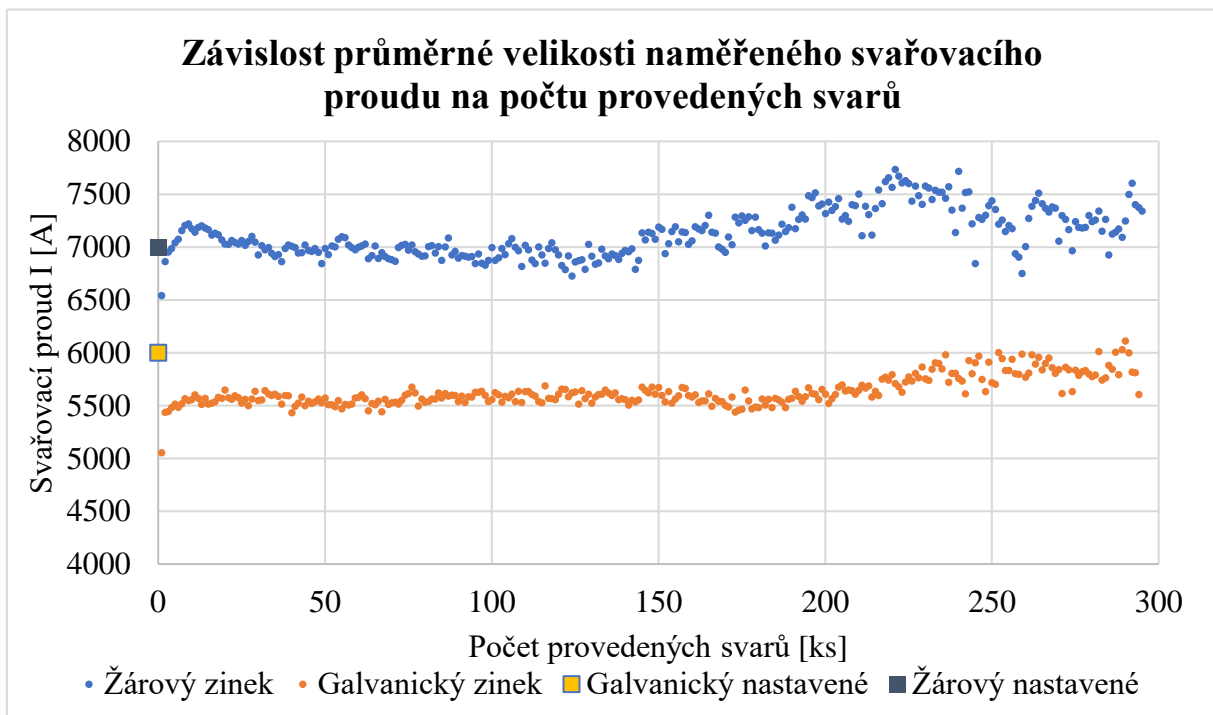


Graf 1: Závislost naměřeného svařovacího proudu na počtu provedených svarů

Plechý povlakované galvanickým zinkem vykazují konstantnější průběh bez větších náhlých změn svařovacího proudu. S rostoucím počtem provedených svarů dochází k velmi mírnému nárůstu hodnoty svařovacího proudu. S ohledem na nastavenou hodnotu svařovacího proudu na svařovacím stroji, skutečný proud se v případě galvanického zinku pohyboval pod nastavenou hodnotou v rozmezí 5000 až 6000 A. Tento jev je zapříčiněn nižším přechodovým odporem povlaku, který snižuje svařovací proud.

Plechý povlakované žárovým zinkem vykazují nestálý průběh svařovacího proudu s rostoucím opotřebením elektrodových čepiček. Hodnoty se pohybovaly od 6200 do 7800 A, s většími odchylkami vůči nastavené hodnotě. Na tento průběh mělo vliv časté lepení elektrod ke svařovanému materiálu DX54D Z100 MBO.

Graf č. 2 zobrazuje závislost průměrné hodnoty svařovacího proudu na počtu svarů. Pro každý n-tý svar byla vypočítána průměrná hodnota svařovacího proudu. U materiálu se žárovým zinkem nastává výrazné zvyšování svařovacího proudu okolo 150 provedených svarů. U materiálu s galvanickým zinkem se velmi zvolna zvyšuje proud až od 200 provedených svarů.



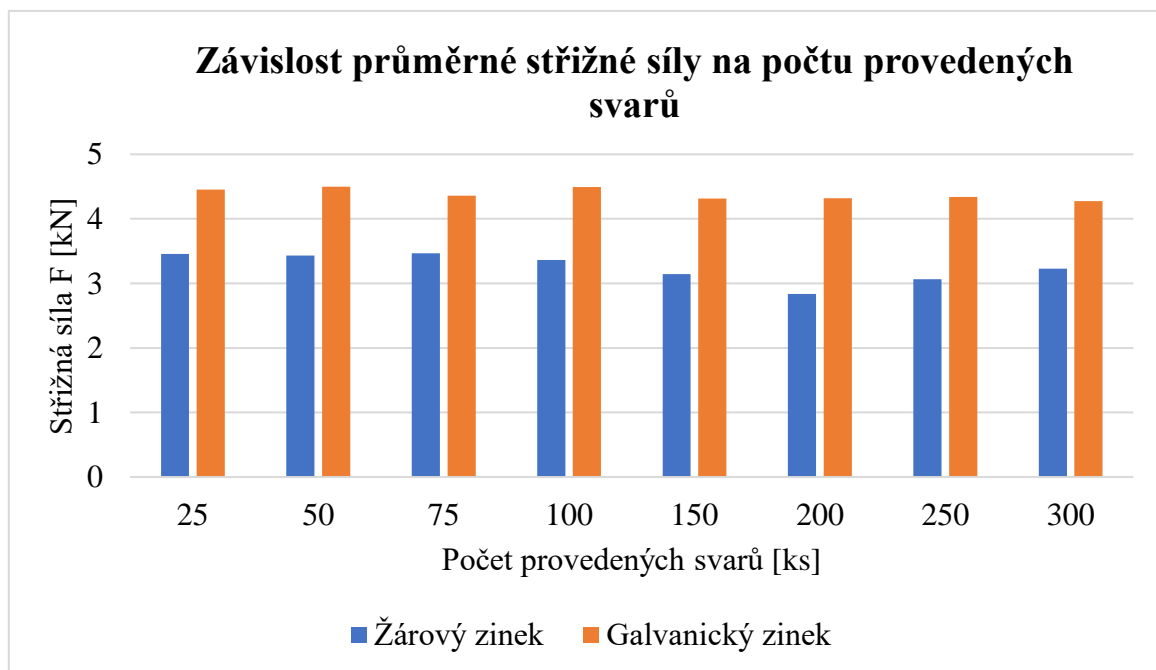
Graf 2: Závislost průměrné velikosti naměřeného svařovacího proudu na počtu svarů

U plechu s žárovým zinkem docházelo k lepení materiálu k elektrodovým čepičkám, kdy bylo zapotřebí plech odtrhnout. Dále byl zaznamenán častější výskyt výstřiku kovu.

5.4.2 Maximální síla potřebná na přetržení vzorku

Vliv míry opotřebení a vliv typu Zn povlaku na odolnost svarů proti mechanickému namáhání byly zkoumány střížnou zkouškou, provedenou na univerzálním zkušebním stroji. Pro každý přetržený svar byly do tabulky zaznamenány maximální střížné síly, které byly odečteny ze softwaru stroje. Pro přehlednost a vyhodnocení byl vytvořen graf č. 3, kde jsou zaznamenány průměrné hodnoty maximálních střížných sil pro sady 25 až 300. Naměřené hodnoty střížných sil pro všechny vzorky jsou uvedeny v tabulkách v příloze.

Ze získaných dat je možné v grafu č. 3 vidět, že galvanický zinek oproti žárovému dosahoval stabilnějších hodnot bez větších rozdílů odolnosti vůči stříhu. Maximální střížné síly potřebné pro přetržení vzorku, pro plechy s galvanickým zinkem, se pohybovaly v průměru od 4,3 kN do 4,5 kN. Pevnost svařové čocky mírně klesala s narůstajícím opotřebením svařovacích elektrodových čepiček.



Graf 3: Závislost průměrné střížné síly na počtu provedených svarů

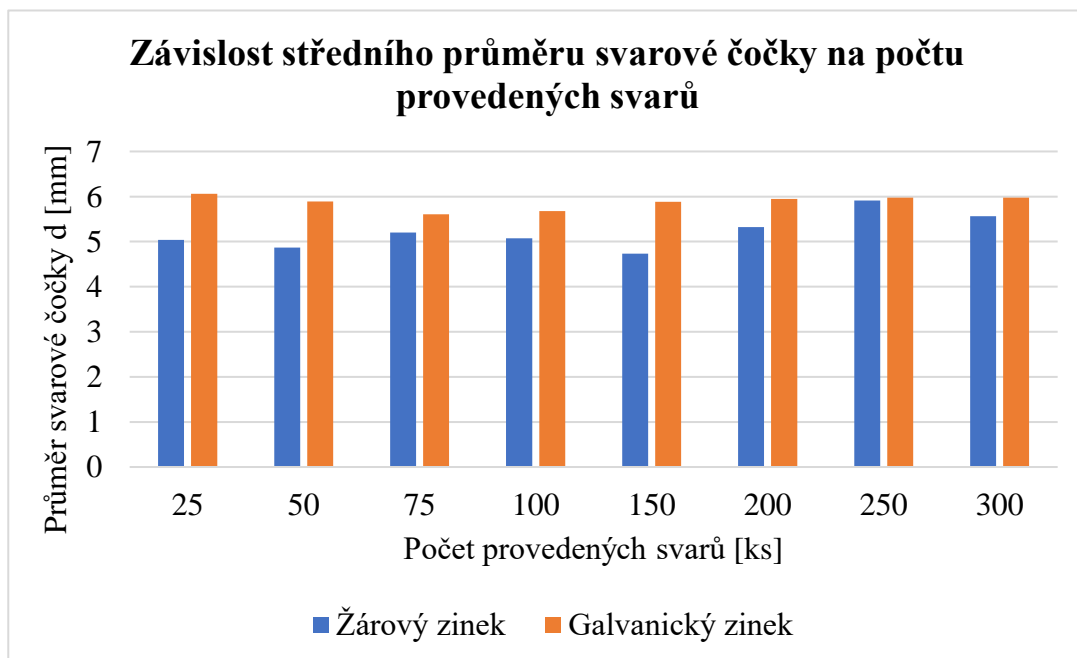
Hodnoty střížné síly potřebné na přestřížení vzorku s žárovým zinkem, svařeného čepičkou opotřebovanou definovaným opotřebením, byly relativně stabilní do 100 provedených svarů, kdy se střížná síla pohybovala okolo 3,4 kN. Následně došlo k poklesu. Tento jev souvisí s procesem svařování, při kterém docházelo k lepení elektrodových čepiček ke svařovanému materiálu. To způsobilo vytrhávání materiálu, změnu tvaru elektrodové čepičky a její deformace.

Deformace povrchu elektrodové čepičky ovlivnily kontaktní plochu elektrod s materiálem, která se výrazně zmenšila. Kvůli tomuto nepříznivému jevu došlo k nedostatečnému provaření svarového bodu a ke snížení jeho pevnosti. Okolo 250 provedených svarů došlo k mírnému zvyšování střížné síly. To je zapříčiněno usazováním zinkového povlaku a základního materiálu na elektrodových čepičkách, vytvoření nové vrstvy, díky které došlo ke zvětšení kontaktní plochy a lepšímu provaření bodu.

5.4.3 Velikost svarových čoček

Po provedení střížné zkoušky byly následně na přetržených vzorcích změřeny velikosti svarových čoček dle normy ČSN EN ISO 17677-1. Výpočet velikosti čočky bodového svaru byl proveden dle výpočtu, který je uveden v kapitole 1.5. Geometrie bodového svaru.

Velikosti svarových čoček byly změřeny posuvným měřidlem. Měření probíhalo vždy u sedmi svarů pro každou sadu (stupeň opotřebení). Tyto naměřené hodnoty byly pro každou sadu zprůměrovány a jsou uvedeny v grafu č. 4. U plechu s galvanickým zinkem se velikosti svarových čoček pohybovaly od 5,61 mm do 6,06 mm. Závislost ukazuje, že nedocházelo k výrazným změnám průměru. U plechu se žárovým zinkem se průměry pohybovaly od 4,74 mm do 5,91 mm. V tomto případě byl průběh s většími rozdíly



Graf 4: Závislost středního průměru svarové čočky na počtu provedených svarů

5.4.4 Metalografická zkouška

















Z každé sady svařených vzorků o rozměru 125 x 45 mm byl vybrán vždy jeden (poslední) vzorek, který byl podroben metalografické zkoušce. Dle snímků z mikroskopu je možné vyhodnotit makrostrukturu svarů. Zvětšení obrazu struktury na mikroskopu bylo nastaveno na 25x.

V tabulce č. 17 jsou porovnány jednotlivé snímky z metalografické analýzy. Vždy jeden bodový svar pro každou sadu opotřebení. U plechů, které jsou povrchově upraveny žárovým zinkem, docházelo od počtu 75 svarů ke značné deformaci povrchu svaru. Se zvyšujícím se počtem provedených svarů se tato deformace bodového svaru zhoršovala. Oproti tomu u plechů, které mají na povrchu galvanický zinek, docházelo k zanedbatelné změně povrchu svaru a deformaci.

Další vnitřní vadou, která se metalografickou analýzou vyhodnocovala, byl výskyt pórů. U plechu s galvanickým zinkem není viditelný pór zaznamenaný do míry opotřebení 300 svary. Naopak u plechu s žárovým zinkem se póry objevují dříve, již u svarů hotovených čepičkami s opotřebením 150 svary. Dalším vyhodnocovaným faktorem je výstřík kovu, který se vyskytoval v malém množství u obou povlaků.

U bodových svarů plechů s galvanickým zinkem došlo k výrazně kvalitnějšímu provaření celé svarové čocky v celé stykové ploše elektrodové čepičky (tabulka č. 17). Díky tomu bylo dosaženo vyšších sřizných sil a větší pevnosti bodového svaru. Kvůli větším deformacím při svařování materiálu DX54D Z100 MBO nedošlo například u sady č. 250 k provaření celé svarové čocky. Plechy jsou spojeny pouze po obvodu, nikoliv uprostřed. Tento jev je možné pozorovat již od sady č. 150.

Tabulka 15: Snímky z metalografické analýzy

	Galvanický Zn	Žárový Zn
25		
50		
75		
100		
150		
200		
250		
300		









5.4.5 Fotografie svarových čoček

Fotografie svarových čoček sloužily k vyhodnocení vizuální kontroly. Z přiložených fotografií v tabulce č. 18 a v tabulce č. 19 byla vyhodnocována velikost svaru, velikost tepelně ovlivněné oblasti, morfologie svaru a tvar svaru.









Svařené vzorky s galvanickým zinkovým povlakem vykazují hladký povrch po celou dobu experimentu. Avšak u plechu s žárovým zinkem je patrný výrazný reliéf v důsledku lepení svařovaného materiálu k elektrodám. Tento jev je nežádoucí z hlediska výsledné kvality laku karoserie i z hlediska svařování, neboť může dojít k rozkmitání robotické svařovací soustavy, čímž se výrazně snižuje přesnost umístění svarů.

Tepelně ovlivněná oblast po svařování je viditelně rozsáhlejší u plechu s žárovým zinkem. To je způsobeno především větším procházejícím svařovacím proudem.

Tabulka 16: Fotografie svarových čoček sady č. 25-100

Sada	Galvanický Zn	Žárový Zn
25		
50		
75		
100		

Tabulka 17: Fotografie svarových čoček sady č. 150-300

Sada	Galvanický Zn	Žárový Zn
150		
200		
250		
300		

5.4.6 Opotřebení elektrodových čepiček

Každá sada vzorků byla svařena elektrodovými čepičkami, které byly následně zkoumány optickým mikroskopem. V tabulce č. 18 a 19 jsou zobrazeny získané fotografie se zvětšením 0,63x. Byla zkoumána pouze čepička, která byla umístěna jako horní na svařovacích kleštích. Spodní svařovací čepička zkoumána nebyla, protože její opotřebení bylo ovlivněno posunem plechů po její kontaktní ploše.

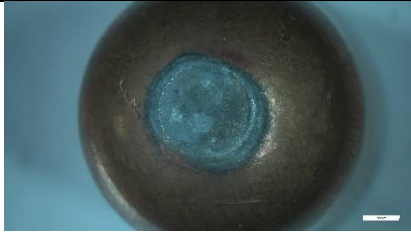


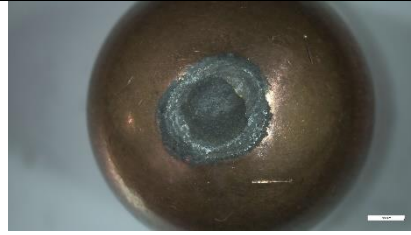

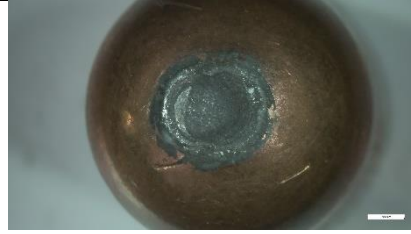

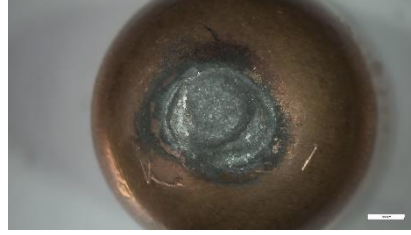
Z přiložených fotografií elektrodových čepiček je možné pozorovat, že u žárového zinku od sady č. 150 začíná výrazný výskyt nalepeného materiálu na kontaktní ploše čepičky. Se vzrůstajícím opotřebením nalepení materiálu roste. Tento jev bylo možné pozorovat již u samotného procesu svařování, kdy docházelo k častému lepení svařovaného plechu k elektrodě a bylo zapotřebí plech odtrhávat silou.

Nalepení materiálu na kontaktní plochu čepičky vedlo k navýšení proudové hustoty. Zvýšená proudová hustota je viditelná v grafu č. 1, který zobrazuje závislost velikosti svařovacího proudu na počtu provedených svarů.







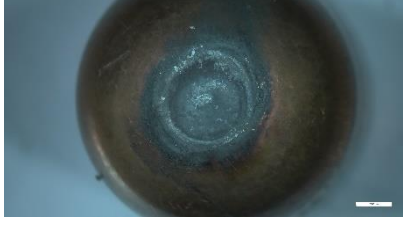

Změna tvaru kontaktní plochy elektrody a její výrazné opotřebení vedlo k neprovaření svarové čocky v celé ploše, viditelné v tabulce č. 17 u vzorku 200 a 250.

Z přiložených snímků je možno tvrdit, že s rostoucím počtem svarů roste opotřebená plocha čepičky u obou druhů povlaku. U čepiček, kterými byly svařovány plechy s galvanickým povlakem je možné pozorovat šedé kroužky, které jsou tvořeny oxidy zinku. Avšak galvanický zinek nevykazuje tak rozsáhle deformace kontaktní plochy a oproti žárovému zinku je opotřebená kontaktní plocha menší a tvarem pravidelnější.

Tabulka 18: Opořebení elektrodových čepiček sady č. 25-100

Sada	Galvanický Zn	Žárový Zn
25		
50		
75		
100		

Tabulka 19: Opotřebení elektrodových čepiček sady č. 150-300

Sada	Galvanický Zn	Žárový Zn
150		
200		
250		
300		

6. Závěr

Cílem diplomové práce bylo porovnání chování dvou typů různých zinkových povlaků při odporovém svařování. V rámci experimentu byly zvoleny dva srovnatelné materiály svým chemickým složením a tloušťkou, které se lišily typem zinkového povlaku. Jednalo se o ocelové plechy DX54D Z100 MBO a DC05+ ZE, které byly povlakovány žárovým a galvanickým zinkovým povlakem. Při experimentu byl zkoumán vliv typu povlaku na průběh svařovacího proudu, odolnost bodového svaru vůči stříhu, velikost a vzhled svarové čočky a makrostrukturu svaru v celém průběhu životního cyklu elektrodových čepiček.

Výsledné porovnání je zobrazeno v tabulce č. 20. Zelenou barvou je vyznačen zinkový povlak, který v dané problematice méně ovlivňoval svařovací proces a byl pro svařování příznivější. Oranžovou barvou je označen méně vyhovující povlak, který měl větší vliv na opotřebení svařovacích elektrodových čepiček.

Tabulka 20: Shrnutí výsledků

Materiál	DC05 + ZE	DX54D Z100 MBO
Zn povlak	Galvanický	Žárový
Průběh svařovacího proudu	+	-
Pevnost bodového svaru	+	-
Velikost svarové čočky	+	+
Vzhled svarové čočky	+	-
Metalografická analýza	+	-

Svařovací proud v průběhu životního cyklu elektrodové čepičky byl v případě galvanického povlaku výrazně stabilnější než u povlaku žárového. Skutečný svařovací proud byl v případě galvanického zinku nižší, než byla nastavená hodnota na svařovacím stroji. Naopak u žárového zinku bylo dosaženo hodnot vyšších. Střížnou zkouškou byla zjištěna vyšší odolnost svarové čočky proti stříhu u materiálu DC05 + ZE (galvanický zinek). Metalografická zkouška prokázala více vnitřních vad u povlaku žárového, a to pórovitost, rozstřík kovu a nedostatečné provaření. Velikost svarových čoček byla u obou povlaků naměřena srovnatelná. Na základě tohoto experimentu byl jasně prokázán vliv typu zinkového povlaku na svařovací proces a z výsledných dat vyplývá, že pro bodové svařování je vhodnější použití ocelového plechu s galvanickým zinkovým povlakem, který má menší vliv na opotřebení elektrodových čepiček.

7. Bibliografie

- [1] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování v praxi*. 2. dopl. vyd. Praha: SNTL, 1963. Knižnice strojírenské výroby
- [2] ČSN EN 14610. *Svařování a příbuzné procesy-Definice metod svařování kovů*. Praha: Vydavatelství norem, 2005.
- [3] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [4] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975. Řada strojírenské literatury
- [5] LIPA, Milan. *Bodové a švové zvaranie*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1966. Knižnica Výskumného ústavu zvaračského v Bratislave.
- [6] O'Brien, Annette. *Welding Handbook*, Volume 3 - Welding Processes, Part 2 (9th Edition) [online]. American Welding Society, 2007. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpWHVWPPE3/welding-handbook-volume-3/welding-handbookvolume-3>
- [7] *Encyclopedia of terms* [online]. WeldCo2013. Dostupné z: http://www.weldcor.ca/encyclopedia.html?alpha=R&per_page=3
- [8] *Resistance welding manual* [online]. Rautaruukki Corporation, 2009. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/93507084/Ruukki-Resistance-Welding-Manual>
- [9] KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařování elektrickým odporem*, podklady pro studium z předmětu Technologie svařování. ČVUT: Fakulta Strojní – Ústav strojírenské technologie, 2013
- [10] NEUMANN, Heinz. *Odporové svařování*, podklady pro kurz IWE. Praha: ČVUT, 2006.
- [11] *Zváracie metódy a zariadenia: II. diel učebných textov pre kurzy zvaračských technológov*. Ostrava: ZEROSS, 2000. Sváření. ISBN 80-85771-84-5.
- [12] ČSN EN ISO 14327. *Odporové svařování – Způsoby určení diagramu oblasti svařování při odporovém bodovém, výstupkovém a švovém svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [13] Petr Hartman. *Vliv povrchových úprav na životnost elektrod při odporovém bodovém svařování v automobilovém průmyslu*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT. Ladislav Kolařík.

- [14] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [15] ČSN EN ISO 5182. *Odporové svařování - Materiály pro elektrody a pomocné vybavení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. Třídící znak 05 2678.
- [16] ČSN EN ISO 8166. *Odporové svařování - Způsob hodnocení životnosti bodových svařovacích elektrod při konstantním nastavení stroje*. Praha: Český normalizační institut, 2004. Třídící znak 05 2620.
- [17] NEUMANN, Heinz a Martin BORŮVKA. *Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů: Etapa 1 - "Výzkum chlazení u technologických procesů"*. Liberec, 2013.
- [18] ČSN EN ISO 10447. *Odporové svařování - Odlupovací a sekáčové zkoušení odporových bodových a výstupkových svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2007. Třídící znak 05 1129.
- [20] Lucie Forejtová a spol. *Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie* [online]. Praha: ČVUT, 2007. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>
- [21] MAZANCOVÁ, Eva. *Technické materiály I: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.
- [22] *Moderne koncipované ocele použité při výrobě automobilovej karosérie*. Košice: Technická univerzita v Košicích. 2008. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/>.
- [23] Rudolf Wojcik. *Porovnání ocelí a technologií při výrobě automobilové karoserie*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Ivo Dohnal. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40077
- [24] Jiří Zmrzlík. *Příslušenství odporového svařování (elektrody, čepičky, držáky, kabely)* [online]. Dostupné z: https://zmrzlik.cz/pdfzel/katalog_svar.pdf.
- [25] ČSN EN ISO 14273. *Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2003. Třídící znak 05 1112.
- [26] *HowToResistanceWeld*. 2020 [online]. Dostupné z: <https://www.howtoresistanceweld.info>

- [27] Yixi Zhao. *Effect of Epoxy Adhesive o Nugget Formation in Resistance Welding of Steel Sheets* [online]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/10/1828/htm>
- [28] Alexandr Abušínov, *Technologie pro lehké automobilové konstrukce* [online]. MMSpektrum, 2012. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-pro-lehke-automobilove-konstrukce.html>
- [29] Strojmetal. *Tabulka slitin - Standardně používané Al slitiny pro zápusťkové výkovky* [online]. Dostupné z: <http://www.strojmetal.cz/tabulka-slitin>
- [30] PIVODA, Petr a Zdeněk PASTRŇÁK. *Vývoj ve výrobě ocelových plechů s povlaky zinku a jeho slitin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Poradenská příručka.
- [31] KREIBICH, Viktor. *Strojírenské materiály a povrchové úpravy: (část povrchové úpravy)*. Praha: České vysoké učení technické, 1987.
- [32] ArcelorMittal. *Product catalogue* [online]. 2021. Dostupné z: https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/product_catalogue
- [33] Thyssenkrupp. *Sheet and coated products* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/products/sheet-coated-products/>
- [34] United States Steel. *Coated sheet products* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.ussteel.com/customers/products/coated-sheet>
- [35] Tata Steel. *Metallic coated steel* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.tatasteeleurope.com/ts/automotive/products/metallic-coated>
- [36] ATV Praha. *Elektrodové čepičky* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.atvpraha.cz/c/odporove-svarovani/elektrodove-cepicky>
- [37] PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno – SMS, s.r.o., 2005. ISBN 80-903386-4-X.

8. Seznam tabulek

Tabulka 1: Doporučené svařovací parametry pro ocelové plechy	24
Tabulka 2: Doporučené svařovací parametry pro plechy se Zn povlakem	24
Tabulka 3: Rozdělení svařovacích režimů [1].....	25
Tabulka 4: Stanovení tloušťky plechu a průměru čočky	28
Tabulka 5: Použití ocelí v automobilovém průmyslu.....	40
Tabulka 6: Standartně využívané Al slitiny [29].....	43
Tabulka 7: Porovnání tloušťky povlaku	45
Tabulka 8: Přehled použitých materiálů	50
Tabulka 9: Chemické složení základních materiálů	50
Tabulka 10: Mechanické vlastnosti základních materiálů.....	50
Tabulka 11: Tabulka sad elektrodoých čepiček a pořadí svarů.....	51
Tabulka 12: Parametry svařovacího lisu Dalex PMS 11-4	52
Tabulka 13: Použité svařovací parametry	54
Tabulka 14: Parametry zkušebního stroje LabTest5.100SP1	54
Tabulka 17: Snímky z metalografické analýzy	62
Tabulka 18: Fotografie svarových čoček sady č. 25-100	64
Tabulka 19: Fotografie svarových čoček sady č. 150-300	65
Tabulka 18: Opatřebení elektrodoých čepiček sady č. 25-100	67
Tabulka 19: Opatřebení elektrodoých čepiček sady č. 150-300	68
Tabulka 20: Shrnutí výsledků.....	69
Tabulka 21: Střizné síly sada. č. 25	78
Tabulka 22: Střizné síly sada. č. 50	78
Tabulka 23: Střizné síly sada. č. 75	78
Tabulka 24: Střizné síly sada. č. 100	79
Tabulka 25: Střizné síly sada. č. 150	79
Tabulka 26: Střizné síly sada č. 200	80
Tabulka 27: Střizné síly sada č. 250	80
Tabulka 28: Střizné síly sada. č. 300	80
Tabulka 29: Velikost svarových čoček sada. č. 25	81
Tabulka 30: Velikost svarových čoček sada. č. 50.....	81
Tabulka 31: Velikost svarových čoček sada. č. 75.....	81
Tabulka 32: Velikost svarových čoček sada. č. 100.....	82

Tabulka 33: Velikost svarových čoček sada. č. 150.....	82
Tabulka 34: Velikost svarových čoček sada č. 200.....	82
Tabulka 35: Velikost svarových čoček sada. č. 250.....	83
Tabulka 36: Velikost svarových čoček sada. č. 300.....	83

9. Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení metod odporového svařování [2]	11
Obrázek 2: Schéma bodového svařování [8]	12
Obrázek 3: Průběh cyklu zhotovení bodového svaru [8]	12
Obrázek 4: Průběh odporů v závislosti na teplotě a na čase [3]	14
Obrázek 5: Rozložení dílčích odporů a teplot [7]	14
Obrázek 6: Přímé bodové svařování [26]	15
Obrázek 7: Nepřímé bodové svařování [26]	16
Obrázek 8: Švové svařování	17
Obrázek 9: Švový průběžný a přerušovaný svar [4]	17
Obrázek 10: Technologie výstupkového svařování [8]	18
Obrázek 11: Stykové svařování [8]	19
Obrázek 12: Značení metod odporového svařování	20
Obrázek 13: Diagram oblasti svařování	21
Obrázek 14: Svařovací program bodového svařování [13]	23
Obrázek 15: Oblasti tvrdého a měkkého svařování [10]	25
Obrázek 16: Průběh teplot při bodovém svařování [5]	26
Obrázek 17: Svarový bod [4]	27
Obrázek 18: Normalizované tvary svařovacích elektrod [24]	30
Obrázek 19: Konstrukce elektrody pro bodové svařování [15]	30
Obrázek 20: Vliv vlastností materiálu elektrod na životnost [17]	32
Obrázek 21: Rozměry zkušební tělesa	33
Obrázek 22: Rozdělení zkoušek svarů	34
Obrázek 23: Odlupovací zkouška [18]	35
Obrázek 24: Porušení v dělicí rovině [18]	36
Obrázek 25: Porušení vytržením [18]	36
Obrázek 26: Princip zkoušky stříhem [25], 1-přidržovací plech	37
Obrázek 27: Vzorek pro zkoušku stříhem [25]	37
Obrázek 28: Proces přípravy vzorku pro metalografickou analýzu	38
Obrázek 29: Požadavky na materiály v automobilovém průmyslu	39
Obrázek 30: Svařovací lis Dalex PMS 11-4	52
Obrázek 31: Výkres elektrodové čepičky 39D 1978-2	53
Obrázek 32: Zkušební stroj LabTest 5.100SP1	55

10. Seznam grafů

Graf 1: Závislost naměřeného svařovacího proudu na počtu provedených svarů.....	56
Graf 2: Závislost průměrného naměřeného svařovacího proudu na počtu svarů	57
Graf 3: Závislost průměrné střížné síly na počtu provedených svarů	58
Graf 4: Závislost středního průměru svarové čočky na počtu provedených svarů.....	60

11. Seznam příloh

Příloha č. 1 – Naměřené hodnoty střížných sil

Příloha č. 2 – Naměřené velikosti svarových čoček

Příloha č. 1 – Naměřené hodnoty střížných sil

Tabulka 21: Střížné síly sada. č. 25

Číslo vzorku	GI	GE
25-1	3551	4748
25-2	3390	4448
25-3	3464	4620
25-4	3474	4154
25-5	3436	4143
25-6	3463	4342
25-7	3428	4717
Průměr	3458	4453

Tabulka 22: Střížné síly sada. č. 50

Číslo vzorku	GI	GE
50-1	3375	4628
50-2	3437	4519
50-3	3490	4137
50-4	3460	4264
50-5	3403	4656
50-6	3460	4725
50-7	3393	4555
Průměr	3431	4498

Tabulka 23: Střížné síly sada. č. 75

Číslo vzorku	GI	GE
75-1	3411	3928
75-2	3482	4298
75-3	3560	4582
75-4	3466	4327
75-5	3476	4543
75-6	3463	4482

75-7	3408	4354
Průměr	3467	4359

Tabulka 24: Střížné síly sada. č. 100

Číslo vzorku	GI	GE
100-1	3323	4568
100-2	3419	4312
100-3	3323	4212
100-4	3341	4722
100-5	3338	4581
100-6	3397	4635
100-7	3397	4420
Průměr	3363	4493

Tabulka 25: Střížné síly sada. č. 150

Číslo vzorku	GI	GE
150-1	3108	4344
150-2	3112	4306
150-3	3132	4028
150-4	3139	4159
150-5	3151	4383
150-6	3102	4639
150-7	3271	4340
Průměr	3145	4314

Tabulka 26: Střížné síly sada č. 200

Číslo vzorku	GI	GE
200-1	2768	4193
200-2	2982	4458
200-3	2959	4505
200-4	2859	4295
200-5	2720	4257
200-6	2782	4220
200-7	2781	4316
Průměr	2836	4321

Tabulka 27: Střížné síly sada č. 250

Číslo vzorku	GI	GE
250-1	3510	4399
250-2	3054	4388
250-3	3055	4586
250-4	2912	4300
250-5	3024	4119
250-6	2907	4323
250-7	3001	4258
Průměr	3066	4339

Tabulka 28: Střížné síly sada č. 300

Číslo vzorku	GI	GE
300-1	3171	4423
300-2	3253	4087
300-3	3034	4300
300-4	3354	4301
300-5	3450	4272
300-6	3255	4247
300-7	3094	4307
Průměr	3230	4277

Příloha č. 2 – Naměřené velikosti svarových čoček

Tabulka 29: Velikost svarových čoček sada. č. 25

Číslo vzorku	GI	GE
25-1	5,2	6,7
25-2	4,9	5,7
25-3	5,1	5,8
25-4	5	6,1
25-5	4,9	6,3
25-6	4,9	6,2
25-7	5,3	5,8

Tabulka 30: Velikost svarových čoček sada. č. 50

Číslo vzorku	GI	GE
50-1	4,9	6,1
50-2	4,5	5,8
50-3	5,2	5,9
50-4	5,1	6,1
50-5	4,8	5,7
50-6	4,8	6
50-7	4,7	5,5

Tabulka 31: Velikost svarových čoček sada. č. 75

Číslo vzorku	GI	GE
75-1	4,85	5,55
75-2	5,05	5,15
75-3	5,5	5,5
75-4	5	5,85
75-5	5,35	5,7
75-6	5,4	5,7
75-7	5,25	5,8

Tabulka 32: Velikost svarových čoček sada. č. 100

Číslo vzorku	GI	GE
100-1	5,1	5,6
100-2	5	5,7
100-3	4,9	5,5
100-4	5,2	5,7
100-5	5,5	5,8
100-6	5,1	5,5
100-7	4,6	5,8

Tabulka 33: Velikost svarových čoček sada. č. 150

Číslo vzorku	GI	GE
150-1	4,6	5,7
150-2	4,8	5,7
150-3	4,3	6,2
150-4	4,7	5,8
150-5	4,8	6
150-6	4,8	6
150-7	5	5,7

Tabulka 34: Velikost svarových čoček sada. č. 200

Číslo vzorku	GI	GE
200-1	4,6	5,8
200-2	5,2	6,1
200-3	5,2	5,9
200-4	5,2	5,8
200-5	5,6	6
200-6	5,6	6
200-7	5,7	5,8

Tabulka 35: Velikost svarových čoček sada. č. 250

Číslo vzorku	GI	GE
250-1	5,7	5,8
250-2	5,6	6,1
250-3	5,7	6,1
250-4	5,9	5,8
250-5	6,1	6,3
250-6	6,1	5,8
250-7	6,2	5,9

Tabulka 36: Velikost svarových čoček sada. č. 300

Číslo vzorku	GI	GE
300-1	5,6	5,9
300-2	5,2	6,1
300-3	5,3	6
300-4	5,5	5,9
300-5	5,8	5,8
300-6	5,8	5,8
300-7	5,9	6,1