

# Odporové bodové svařování vysokopevnostních ocelových plechů v automobilovém průmyslu

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství

*Autor práce:* **Jakub Macháček**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Heinz Neumann, CSc.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Macháček**

Osobní číslo: **S12000127**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Odporové bodové svařování vysokopevnostních ocelových plechů v automobilovém průmyslu**

Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s teoretickými zákonitostmi bodového odporového svařování.
2. Vysokopevnostní ocelové plechy používané pro stavbu karoserií.
3. Svařovací parametry u bodového odporového svařování.
4. Elektrodotové materiály pro odporové svařování a životnost elektrod.
5. Hodnocení kvality bodového svaru.
6. Návrh experimentálních zkoušek a jejich realizace.
7. Vyhodnocení experimentů a diskuse výsledků.



Rozsah grafických prací: **grafy, tabulky**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **PLÍVA, L.** *Odporové svařování*. SNTL Praha, 1975.
- [2] **NEUMANN, H.** *Sledování a řízení svařovacího procesu při bodovém odporovém svařování žárově pohliníkových ocelových plechů*. /Disertační práce/, Liberec 1990, Fakulta strojní, VŠST.
- [3] **PACÁK, J.** *Bodové odporové svařování vysokopevnostních plechů v automobilovém průmyslu*. /Diplomová práce/, Liberec 2006, TÚ Liberec, FS.
- [4] **Dokumenty IIW**, časopisy, normy ČSN EN ISO.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Heinz Neumann, CSc.**  
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2015**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. ledna 2017**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
Ing. Jaroš Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 7. 7. 2016

Podpis:

**Anotace:**

Práce shrnuje informace o odporovém svařování, především o bodovém odporovém svařování. Bakalářská práce je zaměřena na stanovení životnosti svařovacích elektrod a elektrodových čepiček při odporovém bodovém svařování vysokopevnostního ocelového plechu 22MnB5. V práci jsou uvedeny základní teoretické zákonitosti svařovacího procesu tvorby svaru, hodnocení kvality svaru a životnosti elektrod. Jsou uvedeny výsledky a vyhodnocení dvou realizovaných zkoušek životnosti.

**Klíčová slova:**

Odporové svařování, 22MnB5, životnost elektrod, elektrodová čepička

**Anotation:**

This work summarises the information about resistance welding, especially about spot resistance welding. The Bachelor thesis is focused on finding the durability of welding electrodes and electrode caps which are used for spot resistance welding of high strength 22MnB5 steel sheet. The work contains basic theoretical patterns of welding process, quality evaluation of weld and durability of electrodes. The final results and evaluation of two experimental tests of durability are presented.

**Keywords:**

Resistance welding, 22MnB5, durability of electrodes, electrode cap

# Obsah

<b>Obsah .....</b>	<b>5</b>
<b>Seznam použitých veličin a zkratek.....</b>	<b>7</b>
<b>Teoretická část.....</b>	<b>8</b>
1 Úvod.....	8
2 Odporové svařování.....	9
2.1 Metody odporového svařování .....	10
2.2 Teorie bodového odporového svařování.....	11
2.3 Teplotní pole bodového svaru .....	16
3 Kvalita bodových svarů .....	17
3.1 Geometrie svarového bodu.....	17
3.2 Hodnocení kvality svarů.....	20
3.2.1 Destruktivní zkoušky.....	21
3.2.2 Nedestruktivní zkoušky .....	30
4 Životnost bodových svařovacích elektrod .....	31
5 Oceli používané v automobilovém průmyslu .....	33
<b>Experimentální část.....</b>	<b>35</b>
6 Svařovací pracoviště .....	36
6.1 Charakteristika stroje TECNA – 6124.....	36
6.2 Použité typy svařovacích elektrod a elektrodových čepiček ...	40
6.3 Příprava experimentálního pracoviště.....	41
7 Charakteristika svařovaného materiálu.....	42
8 Příprava vzorků pro experimentální část .....	44
9 Zkouška životnosti elektrodových čepiček .....	45

9.1	Svařovací parametry.....	45
9.2	Parametry chlazení a snímání teploty elektrodových čepiček	46
9.3	Zkouška stříhem.....	47
9.4	Zhodnocení a shrnutí výsledků zkoušky.....	49
10	Zkouška životnosti elektrod .....	50
10.1	Svařovací parametry.....	51
10.2	Parametry chlazení a snímání teploty elektrod.....	52
10.3	Zkouška stříhem.....	55
10.4	Zhodnocení a shrnutí výsledků zkoušky.....	56
11	Závěr.....	61
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>67</b>

## Seznam použitých veličin a zkratek

Q	celkové teplo	[J]
R	celkový odpor	[ $\Omega$ ]
I	elektrický proud	[A]
t	čas	[ms]
$I_s$	svařovací proud	[A]
$P_s$	svařovací síla	[N]
$t_s$	svařovací čas	[ms]
T	termodynamická teplota	[K]
a	součinitel teplotní vodivosti	[ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$q_v$	intenzita objemového zdroje tepla	[ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
r	poloměr elektrody	[mm]
c	měrné teplo	[ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$\gamma$	hustota	[ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
z	kartézská souřadnice	[mm]
$d_{\text{pmin}}$	minimální průměr svarového bodu	[mm]
t	tloušťka plechu	[mm]
$F_s$	stříhová síla	[N]
$R_{\text{p}0,2}$	mez kluzu	[MPa]
$R_m$	mez pevnosti	[MPa]
$A_{80 \text{ mm}}$	tažnost	[%]
CURR. MAX	horní limit proudu	[kA]
IF	Interstitial Free (ocel bez intersticií)	
DP	Dual Phase (dvoufázová ocel)	
HAZ	tepelně ovlivněná oblast	
TRIP	TRansformation Induced Plasticity (ocel s transformačně indukovanou plasticitou)	
TWIP	TWinning Induced Plasticity (ocel s indukovanou plasticitou dvojčatením)	



# Teoretická část

## 1 Úvod

V posledních letech se významní výrobci automobilů převážně z Evropy, Japonska, Jižní Koreje a USA snaží zajistit co nejvyšší bezpečnost pro své zákazníky při jízdě automobilem. Aktuálním trendem je snižování emisí, jelikož vlády po celém světě tlačí každým rokem hranici emisí směrem dolů. Pro výrobce automobilů to znamená zvyšování účinnosti motorů a snižování hmotnosti celého automobilu při současném zachování či zvýšení bezpečnosti pro posádku. Výhodným řešením pro oba zmíněné problémy je použití vysokopevnostních plechů, které mají mez pevnosti řádově kolem 1400 MPa. Používají se převážně v nárazových zónách karoserie, kde pomocí řízené deformace plní svůj účel pro maximální bezpečnost cestujících při současné malé tloušťce plechu. Dá se předpokládat, že použití těchto plechů v dalších odvětvích průmyslu na sebe nedá dlouho čekat. [1]

Tímto světovým trendem se řídí i domácí automobilka Škoda Auto a.s. V současnosti je používá na modelech Fabia třetí generace, Octavia třetí generace, Superb, Yeti. Na obrázku 1 je v růst zastoupení použití vysokopevnostních plechů od Octavie I po Octavii III. U třetí generace je z vysokopevnostní oceli vyrobena kompletní přední podlaha, přední podélníky, příčná stěna, A sloupek, B sloupek, C sloupek a výztuhy dveří. [1] [14]



**Obr. 1 – Podíly manganbórových ocelových plechů s povlakem na bázi Al-Si na modelech Octavia I, II a III [14]**

Základní svařovací technologií při výrobě samonosných karoserií je odporové bodové svařování. Se stále čtenějším zastoupením vysokopevnostních plechů ve

výrobě karoserií, roste i nárok na technologii výroby. [1] Tato bakalářská práce je zaměřena především na svařování ocelových plechů 22MnB5 s povlakem na bázi Al – Si, které jsou tepelně zpracovány. Po tepelném zpracování se pohybuje mez pevnosti kolem 1500 MPa. Z důvodu naneseného povlaku na povrchu plechu je proces svařování obtížnější a stává se poměrně nestabilním. Nestabilitu procesu svařování vytváří více faktorů. Jedním z nich je mnohonásobně větší elektrický odpor povlaku než má základní materiál.

Teoretická část popisuje zejména teorii odporového svařování, hodnocení kvality bodových svarů, kde jsou popsány destruktivní a nedestruktivní metody zkoušek kvality svarů a životnost svařovacích elektrod. V závěru teoretické části jsou popsány oceli používané v automobilovém průmyslu.

Experimentální část se zabývá životností elektrod při odporovém bodovém svařování oceli 22MnB5 s povlakem na bázi Al-Si po tepelném zpracování.

## **Cíle bakalářské práce**

Cíle lze shrnout do několika následujících bodů:

- určení vhodných svařovacích parametrů,
- vytvoření dostatečného počtu svarů pro zjištění životnosti svařovacích elektrod,
- vyhodnocení kvality a mechanických vlastností svarových spojů s využitím statické zkoušky stříhem (ČSN EN ISO 14273),
- zjištění a vyhodnocení základních informací o životnosti svařovacích elektrod na základě realizovaných experimentů.

## **2 Odporové svařování**

Odporové svařování je v normě ČSN 05 0003 definováno jako: „Svařování s použitím tlaku, při kterém se využívá teplo vznikající při průchodu elektrického proudu skrz svařované součásti.“ [21]

Svarový spoj vzniká v místě ohřátém na svařovací teplotu pomocí odporového tepla, které vzniká průchodem svařovacího proudu vysoké intenzity a nízkého napětí svařovací soustavou, kterou tvoří elektrody a svařované součásti. [22]

Odporové svařování jako jedna ze svařovacích technologií je nedílnou součástí dnešního strojírenství. V automobilovém průmyslu je většina svarů provedena bodovou odporovou metodou. V některých místech karoserie se využívá odporového výstupkového svařování. To je použito například, pokud je nutné přivařit matici k plechu. Na karoserii se nachází kolem 4500 – 5000 bodových svarů. Přesný počet je dán typem a velikostí karoserie. Metoda odporového bodového svařování je pro výrobu karoserií výhodná, především z důvodu eliminace nepřesností svařovaných výlisků. Další výhodou této metody je, že ji lze velmi dobře robotizovat. [1] [14]

Historie odporového svařování se datuje k roku 1885, kdy si americký technik Elihu Thomson tuto technologii nechal patentovat. Avšak v té době byl zdroj střídavého elektrického proudu spolu s elektrickými regulačními prvky na tak nízké technické úrovni, že tato svařovací technologie nemohla být průmyslově využívána. Její čas přišel až ve 20. století. Na jejím rozvoji se nemalou mírou podílel ruský vynálezce Nikolai Nikolajevič Benardos, který v roce 1887 představil veřejnosti první odporovou bodovou svářečku. [2]

Mezi hlavní výhody odporového svařování patří vysoká produktivita, malá oblast tepelně ovlivněného materiálu a možnost dobré automatizace procesu. [1]

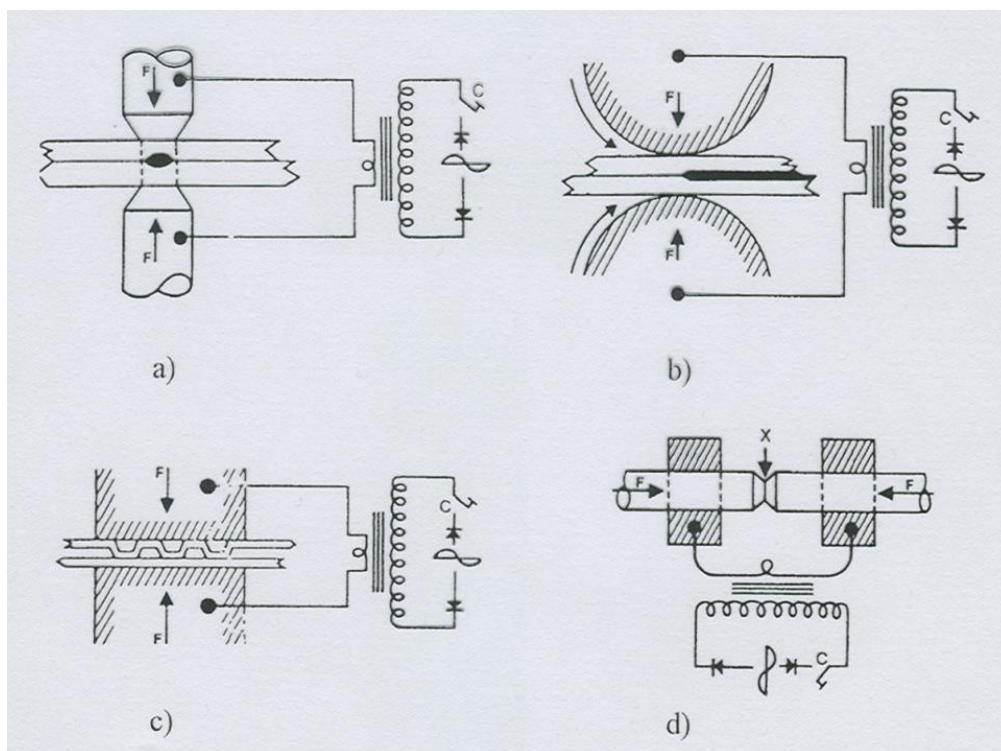
## **2.1 Metody odporového svařování**

Metody svařování se rozdělují na tavné a tlakové. Podle „ČSN EN 14610 Svařování a příbuzné procesy – Definice metod svařování kovů“ jsou metody svařování rozděleny na základě fyzikálních vlastností podle nositele energie. Pro tuto práci jsou podstatné druhy tlakového svařování, kde nositelem energie je elektrický proud. [32]

Základní rozdělení odporového svařování udává norma ČSN EN ISO 4063 Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování. V normě jsou shrnuty metody svařování. Přehled je v příloze číslo 1. Každá metoda je označena

číslem. Tento systém číslování je určen především pro počítačové zpracování, výkresovou dokumentaci atd. [1] [4]

Odporové svařování můžeme rozdělit podle tvaru, uspořádání elektrod nebo podle způsobu přenosu proudu na základní metody: bodové, švové, výstupkové, stykové. Dále do odporového svařování patří vysokofrekvenční a další specifické technologie např. odporové přivařování svorníků. [32]



**Obr. 2 – Princip a základní metody odporového svařování [32]**

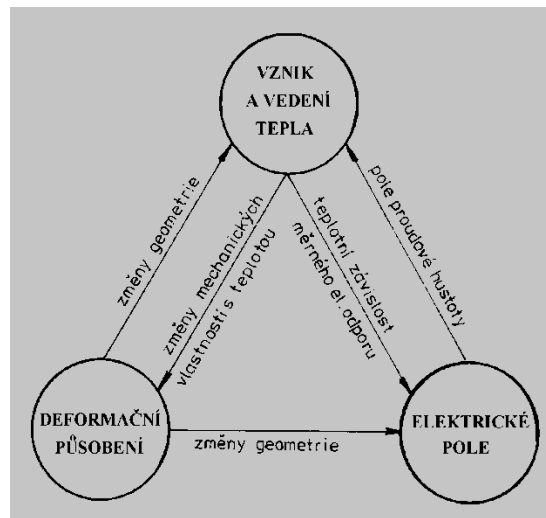
- a) bodové svařování
- b) švové svařování
- c) výstupkové svařování
- d) stykové svařování

## 2.2 Teorie bodového odporového svařování

Při vzniku každého odporového svaru působí současně tři děje. Vztahy mezi těmito ději jsou zobrazeny na obrázku 3.

- elektrický děj
- metalurgický děj
- mechanický děj

[3]



**Obr. 3 - Fyzikální veličiny svařovacího procesu a jejich souvislosti [33]**

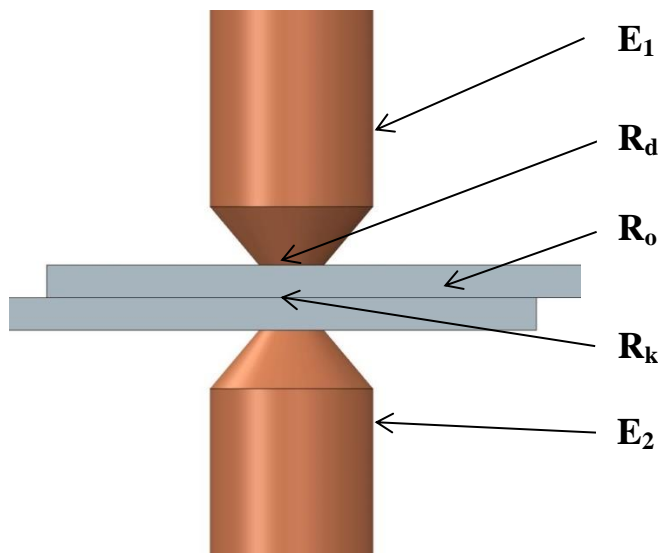
## Elektrický děj

Nejčastějším případem je svařování dvou přeplátovaných plechů mezi dvěma svařovacími elektrodami. Do elektrod přivádíme elektrický proud, nutný pro ohřev plechů na svařovací teplotu. Elektrody vyvíjejí tlakovou sílu na plechy. Při svařovacím procesu se mění elektrický odpor mezi elektrodami a proto je odpor  $R$  a proud  $I$  funkcí času. Z Joule - Lenzova zákona vychází rovnice (1) pro celkové teplo vzniklé mezi elektrodami za čas  $t$ . [3]

$$Q = \int_0^t R * I^2 dt \quad (1)$$

Q	- celkové teplo	[J]
R	- celkový odpor	[Ω]
I	- svařovací proud	[A]
t	- svařovací čas	[ms]

[1]



**Obr. 4 – Odporů při odporovém bodovém svařování**

$R_d$ – kontaktní odpor mezi elektrodami a svařovanými dílci	[ $\Omega$ ]
$R_o$ – vnitřní odpor svařovaného dílce	[ $\Omega$ ]
$R_k$ – stykový odpor mezi svařovanými dílci	[ $\Omega$ ]
$E_1$ – horní elektroda	
$E_2$ – dolní elektroda	

Mezi elektrodami se vyskytuje několik dílčích elektrických odporů. Jejichž součet tvoří celkový odpor  $R$ . Prvním z nich je vnitřní elektrický odpor svařovaného materiálu. Druhým jsou přechodové odpory, které se vyskytují mezi elektrodami a svařovaným materiálem. Tyto přechodové odpory jsou nežádoucí. Proto je snaha co nejvíce je eliminovat např. zvýšením svařovacího tlaku, volbou materiálu elektrod atd. Dalším odporem je přechodový odpor mezi svařovanými materiály, který je závislý na tloušťce vrstvy oxidů, nerovnosti povrchu, velikosti přitlačné síly. Tento odpor je ze všech největší, proto je mezi materiály dosaženo nejvyšší teploty. [3], [16]

U povlakovaných ocelí se vyskytuje odpor samotného povlaku. Všemi složkami celkového odporu prochází stejný proud. Podíl jednotlivých složek pracovního odporu na celkovém teple vznikajícím mezi elektrodami, je úměrný jejich velikosti. Vnitřní odpor  $R_o$  závisí na geometrickém tvaru cesty proudu, na rozložení proudových linií ve svařovaných součástech a na jejich měrném odporu. [20]

Pro celkový elektrický odpor platí vztah (2):

$$R = 2R_d + R_k + 2R_o \quad (2) [20]$$

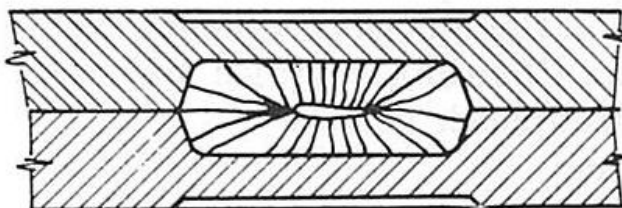
Přechodové odpory výrazně ovlivňují průběh odporového svařování. Existuje několik možností jak ovlivnit velikost přechodového odporu. Jednou z možností je čistota svařovacích ploch. Vlivem oxidů nebo jiných nečistot se může přechodový odpor výrazně zvýšit. U velkých svařovacích tlaků je zvětšení odporu oxidací povrchu menší, než při malých tlacích, jelikož velký tlak zdeformuje vrstvu oxidů. [3]

O vnitřním odporu  $R_o$  svařovaných dílců lze říci, že velikost vnitřního odporu je tím větší, čím větší je měrný odpor materiálu a čím větší je tloušťka plechů. Naopak, odpor je tím menší, čím větší je průřez, kterým protéká proud. [3]

## Metalurgický děj

Při bodovém odporovém svařování dochází vlivem dodaného tepla pomocí elektrického proudu a odporu k natavení obou svařovaných dílců v místě svaru. Vznik a vedení tepla je podmíněn dostatečně velkou proudovou hustotou, která zajistí rychlý ohřev svařovaného materiálu tak, aby výkon tepla převyšoval schopnost odvodu tepla do okolního materiálu.

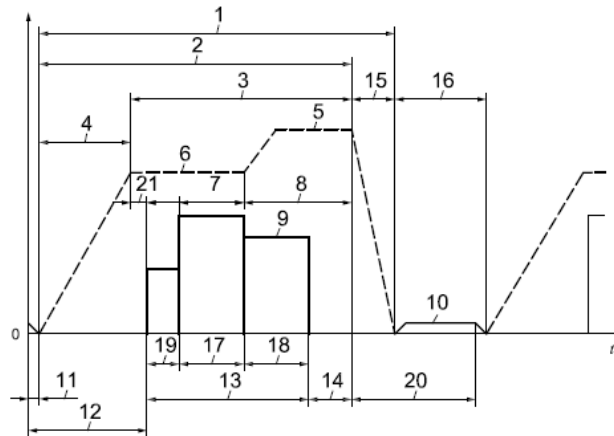
Bodový svar vzniká intenzivním ohřevem nad teplotu tavení a následným rychlým ochlazením (rychlost ohřevu a následného ochlazení může dosáhnout až 100 000 °C/s) v omezené oblasti. [16] Nejvyšší teploty se dosahuje v jádře svarové čočky. Snahou je získat přiměřený objem roztaveného kovu a dostatečně velkou svarovou čočku. Tloušťka svarové čočky musí být vždy menší, než je součet tloušťek svařovaných dílců. Elektrody přivádějící elektrický proud do svaru současně stlačují svařované dílce a brání vystříknutí expandujícího roztaveného kovu a plynů ven ze svaru. Průřez bodového svaru je znázorněn na obrázku 5. [3]



**Obr. 5 – Průřez bodového svaru (krystalizace v jeho středu) [3]**

## Mechanický proces

Mechanický proces při odporovém svařování je reprezentován působením tlaku po dobu svařování a patří k jeho základním činitelům. [16] Průběh základního mechanického procesu je na obr. 6.



**Obr. 6 - Program řízení proudu a elektrodové síly pro bodové odporové svařování [25]**

- 1 doba působení síly
- 2 doba elektrodové síly
- 3 doba udržovací síly
- 4 doba vzestupu síly
- 5 kovací síla
- 6 elektrodová síla
- 7 doba zpoždění kování
- 8 doba kování
- 9 proud
- 10 pohyb elektrody
- 11 doba přibližování hlavy
- 12 doba stlačení
- 13 celková doba svařování
- 14 doba výdrže
- 15 doba poklesu síly
- 16 skutečná doba vypnutí síly
- 17 doba ohřevu/samostatná doba svařování
- 18 doba dohřevu



- 19 doba předeřevu
- 20 doba vypnutí
- 21 doba zpoždění proudu
- t čas

Svařovací parametry pro bodové svařování nepovlakovaných a povlakovaných nízkouhlíkových ocelí udává norma ČSN EN ISO 14373. Mezi hlavní parametry pro vytvoření svarového bodu patří svařovací proud  $I_s$ , svařovací čas  $t_s$  a svařovací síla  $P_s$ . Tyto parametry je možné nastavovat v určitých intervalech hodnot, dle tloušťky plechu, použitého svařovacího zařízení atd. [14] [26]

**Tab. 1 – Intervaly svařovacích parametrů [14]**

<b>Svařovací proud <math>I_s</math> [A]</b>	1000 – 100 000
<b>Svařovací čas <math>t_s</math> [s]</b>	0,04 – 2
<b>Svařovací síla <math>P_s</math> [N]</b>	500 – 10 000

Požadovaného tepla při odporovém bodovém svařování lze dosáhnout dvěma různými režimy svařování. Prvním z nich je režim svařování, který se vyznačuje nižší přítlačnou silou, nižším svařovacím proudem a delším časem svařování. Druhý režim svařování se vyznačuje parametry v opačném poměru, tedy vyšší přítlačná síla, vyšší svařovací proud a kratší čas svařování. [26]

### 2.3 Teplotní pole bodového svaru

Teplotní pole znázorňuje rozložení teploty ve svarovém spoji. Pro kvalitní bodový svar je nutné dosáhnout teploty vyšší než je teplota tavení svařovaných materiálů. [14]

Pro vytvoření bodového svaru je potřebné teplo, které vznikne průchodem svařovacího proudu soustavou. Tuto soustavu lze nahradit odpory řazenými do série. Celkový odpor je obtížné vypočítat, jelikož jednotlivé dílčí odpory se mění s časem. Dále by bylo nutné uvažovat se změnou odporu pro roztavení *Al-Si* vrstvy. Největší vliv na začátku procesu svařování má přechodový odpor mezi dvěma svařovanými plechy. Zmíněný přechodový odpor rychle zmizí, jak se materiál začne ohřívat, protože v tomto místě se začíná vytvářet svarová čočka. Tyto přechodové odpory mají krátkou existenci a postačí pro start svařovacího procesu. [1] [3]

Teplotní pole bodového svaru není možné měřit přímo, z důvodu velmi malých rozměrů svaru a nepřístupnosti tepelného zdroje, který je uvnitř svařovaných materiálů. Teplotní pole je možné modelovat pomocí modelovacích softwarů s použitím metody konečných prvků nebo použít zjednodušeného matematického modelu. [1]

Pro válcové elektrody lze s určitým zjednodušením napsat Fourierovu rovnici vedení tepla (3)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a * \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{q_v}{c * \gamma} \quad (3)$$

T	termodynamická teplota	[K]
t	čas	[s]
a	součinitel teplotní vodivosti	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
q <sub>v</sub>	intenzita objemového zdroje tepla	[J.m <sup>-3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
r	poloměr elektrody	[mm]
c	měrné teplo	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
γ	hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
z	kartézská souřadnice	[mm]

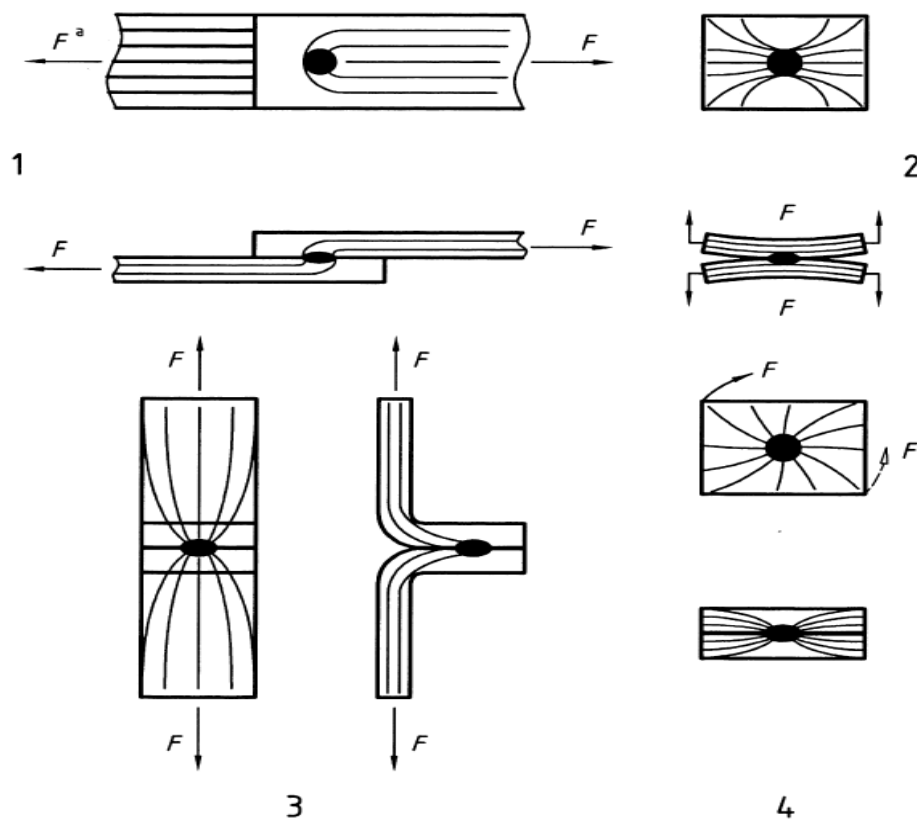
[1]

### 3 Kvalita bodových svarů

Kvalita bodových svarů se posuzuje komplexně vzhledem k požadovaným vlastnostem těchto spojů. [1] Zkoumají se jak mechanické vlastnosti, tak mikrostruktura a velikost vytvořených svarů. Na každou charakteristiku je možné použít různé metody zkoušení. [14]

#### 3.1 Geometrie svarového bodu

Norma ČSN EN 14329 stanovuje: „Definice geometrických měření a typů lomů, které jsou používány v souvislosti se zkoušením odporových bodových, švových a výstupkových svarů, u kterých rozdílné zátěžové konfigurace jsou příčinou rozdílného rozložení napětí ve svaru (*obr. 7*). Účelem těchto definic je dát základ pro všechny jiné související normy.“ [11]



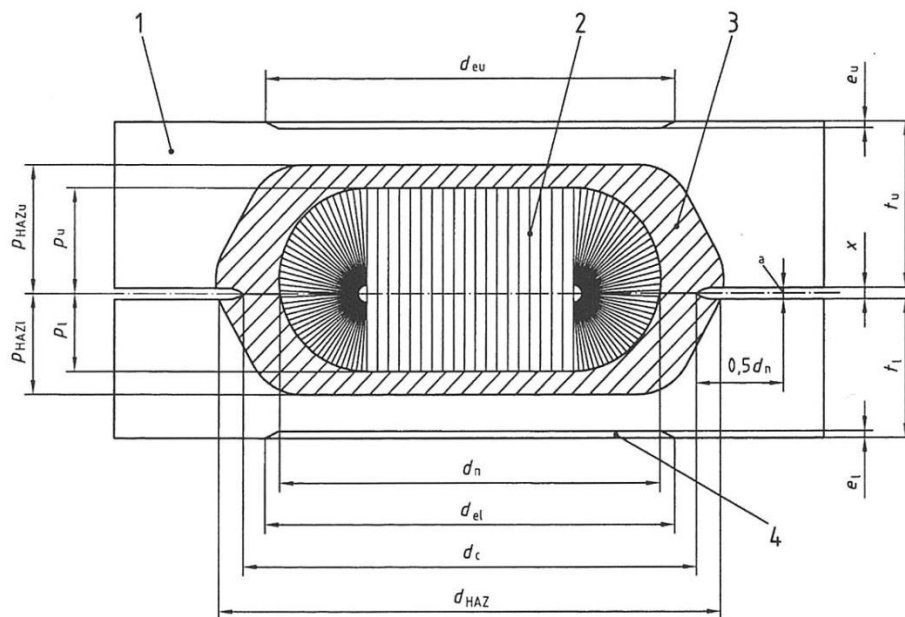
**Obr. 7 – Schématická vyobrazení, která znázorňují rozložení napětí v závislosti na směru zkušebního zatížení [11]**

Minimální velikost svarového bodu  $d_{pmin}$  se vypočítá z tloušťky svařovaných dílů. V případě svařování různých tloušťek je jako směrodatná uvažována ta menší. [14]

$$d_{pmin} = 3,5\sqrt{t} \quad (4)$$

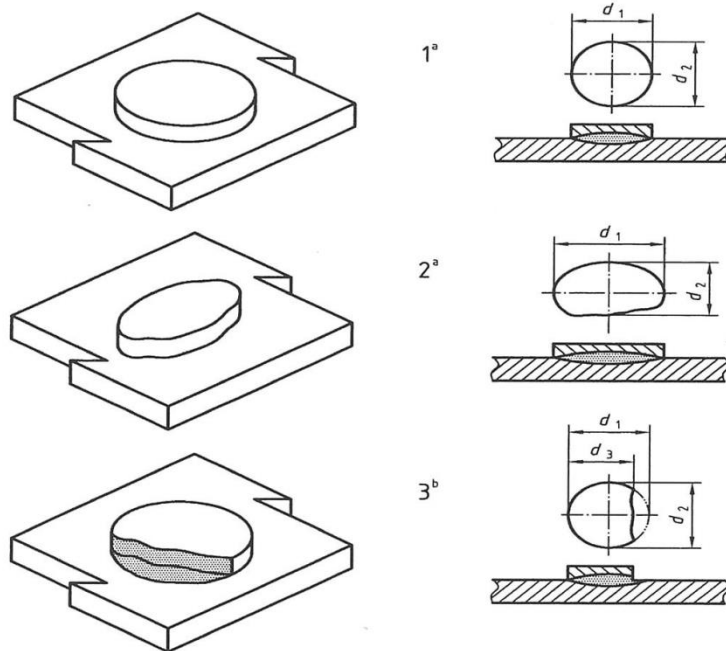
t      tloušťka svařovaného dílu      [mm]

Podle požadavků na kvalitu můžeme tyto vlastnosti posoudit pomocí měřitelných veličin, které jsou znázorněny na obrázku 8. [11]



**Obr. 8 - Měření příčného řezu svaru**

- |                      |                                                                                                                                                                                |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                    | základní materiál                                                                                                                                                              |
| 2                    | svarová čočka                                                                                                                                                                  |
| 3                    | tepelně ovlivněná oblast (HAZ)                                                                                                                                                 |
| a                    | místo měření mezery x                                                                                                                                                          |
| $d_c$                | <b>průměr tepelně zabarvené části</b> - průměr oblasti obklopující svarovou čočku bodového svaru těsně přiléhajícím k povrchům, u kterých se vyskytuje spojení pouze tuhé fáze |
| $e_l, e_u$           | <b>hloubka vtisku elektrody</b> - maximální hloubka vtisku elektrody měřená ve směru elektrodové síly                                                                          |
| $d_{el}, d_{eu}$     | <b>průměr vtisku elektrody</b> - průměr vtisku na vnějším povrchu pracovních kusů                                                                                              |
| $d_{HAZ}$            | <b>průměr tepelně ovlivněné oblasti</b> - průměr tepelně ovlivněné struktury měřené na vzorku makro nebo mikrostruktury                                                        |
| $d_n$                | <b>průměr svarové čočky</b> - střední hodnota z maximálního a minimálního průměru svarové čočky změřených v dělicí rovině mezi spojovanými kusy                                |
| $p_{HAZl}, p_{HAZu}$ | <b>průnik tepelně ovlivněné oblasti</b> - proniknutí tepelně ovlivněné oblasti ve směru tloušťky každého plechu                                                                |
| $p_l, p_u$           | <b>průvar svarové čočky</b> - průvar svarové čočky ve směru tloušťky jednoho plechu                                                                                            |
| x                    | <b>velikost mezery mezi plechy</b> - střední hodnota spáry mezi těsně přiléhajícími povrchy v okolí svaru, měřená ve vzdálenosti $0,5d_n$ od okraje svarové čočky              |



**Obr. 9 - Měření svaru a průměru vytržené části při porušení vytržením**

- 1 symetrické vytržení
- 2 nesymetrické vytržení
- 3 částečné vytržení
- <sup>a</sup>  $d = d_p = (d_1 + d_2)/2$
- <sup>b</sup>  $d = (d_1 + d_2)/2$   
 $d_p = (d_1 + d_3)/2$

[11]

### 3.2 Hodnocení kvality svarů

Hodnocení kvality svarů může být rozděleno podle několika hledisek např. pevnostního, estetického atd. Kvalitu bodových svarů lze vyhodnotit destruktivní nebo nedestruktivní metodou zkoušky. Výběr druhů zkoušek a počet zkušebních vzorků závisí na požadavcích na provedení a jakostních kritériích. Pro díl nebo montážní sestavu musí být stanoveny dříve, než bude provedena jakákoliv kvalifikace. [1]

- Vizuální kontrola
- Křížové zkoušení tahem
- Sekáčové zkoušení

- Odlupovací zkouška
- Zkouška stříhem
- Zkouška krutem
- Zkouška kombinovaným tahem a stříhem
- Makroskopická a mikroskopická kontrola
- Zkoušení tvrdosti

### 3.2.1 Destruktivní zkoušky

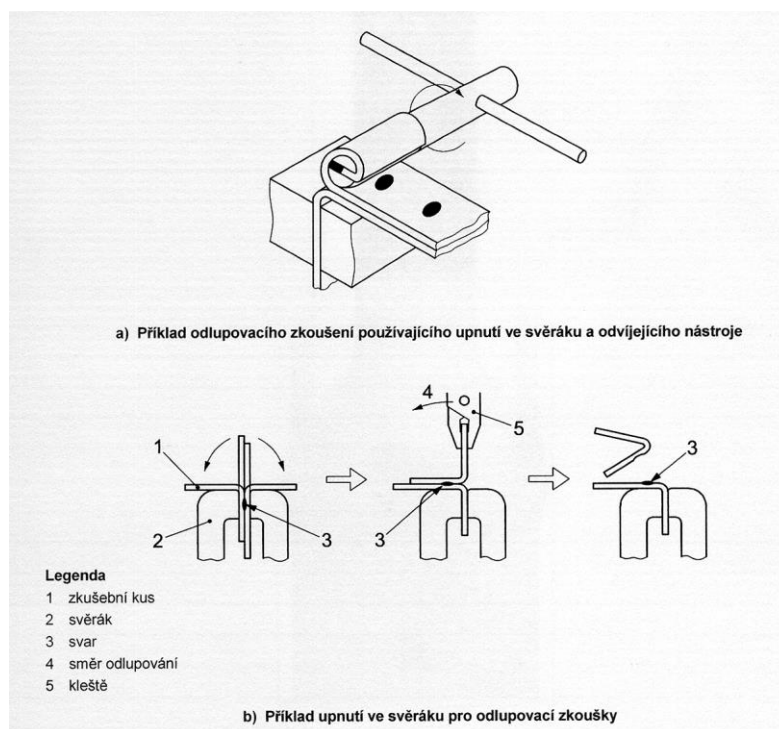
Destruktivní zkoušky se dělí na mechanické a metalografické. U těchto zkoušek můžeme stanovit rozměry svarové čochky.

#### Odlupovací zkouška

Odlupovací zkouška se dělí na dva typy:

- Ruční odlupovací zkouška
- Mechanizovaná odlupovací zkouška

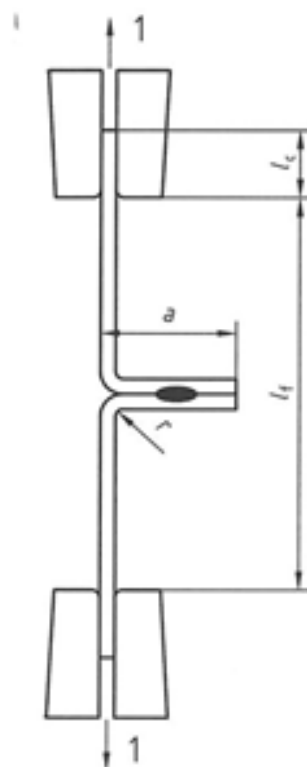
Pro ruční odlupovací zkoušku je zavedena norma ČSN EN ISO 10447. Je to dílenská zkouška (*obr. 10*).



**Obr. 10 – Příklady ruční odlupovací zkoušky [27]**

Mechanizovaná odlupovací zkouška je prováděna podle normy ČSN EN ISO 14270. „Tato norma stanovuje rozměry vzorku a postup pro mechanizované odlupovací zkoušení jednotlivých odporových bodových, švových a výstupkových svarů u přeplátovaných plechů z jakýchkoliv kovových materiálů tloušťky od 0,5 mm do 3 mm, kde svary mají maximální průměr  $7\sqrt{t}$  (kde  $t$  je tloušťka plechu v mm). Účelem mechanizovaného odlupovacího zkoušení je stanovení síly pro odloupení, kterou může zkušební vzorek vydržet.“ [5]

Postup zkoušky pro bodový jednoduchý svar je následující. Dva kusy plechu nastříhané na stanovené rozměry dle normy se přes sebe přeplátují a bodově svaří na jednom místě. Poté jsou plechy ohnuty dle obrázku 11. Ohýbáním se nesmí ovlivnit vlastnosti spoje. Dále je vzorek upnut do trhacího stroje, tento stroj musí odpovídat normě ISO 7500-1. Zkouška musí být provedena při pokojové teplotě. [5]



**Obr. 11 - Postup upnutí pro odlupovací zkoušku [5]**

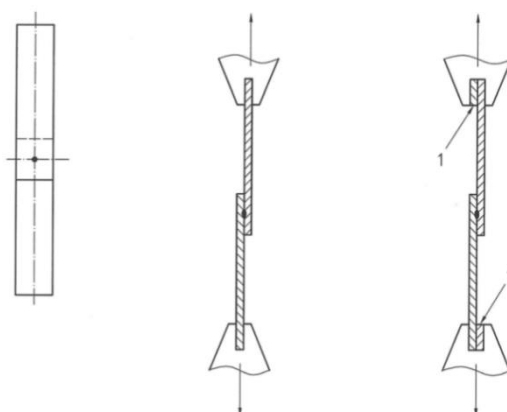
1	působení síly	
r	poloměr $\approx t$	[mm]
a	přeplátování	[mm]
$l_f$	volná délka mezi čelistmi	[mm]
$l_c$	délka upnutí v čelistech	[mm]

Protokol o zkoušce musí obsahovat následující údaje:

- metodu svařování;
- svařovací podmínky a zařízení;
- materiál a jeho stav;
- rozměry zkušebního kusu a vzorků;
- jednotlivé hodnoty, střední hodnotu a směrodatnou odchylku průměru svaru;
- typ porušení;
- zvláštní poznámky, pokud jsou. [5]

### Zkouška stříhem

Je prováděna podle normy ČSN EN ISO 14273. „Tato mezinárodní norma stanovuje rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů u přeplátovaných plechů z jakýchkoliv kovových materiálů tloušťky od 0,5 mm do 10 mm, kde svary mají maximální průměr  $7\sqrt{t}$  ( $t$  je tloušťka plechu v mm)“. Účelem zkoušení je zjištění stříhové síly, kterou zkušební vzorek vydrží. Postup zkoušky je následující. Vzorek je upnut do trhacího stroje. Ten musí splňovat normu ISO 7500-1. Při rozdílných tloušťkách plechů je nutné při upnutí použít podložný plech. Po vykonání zkoušky je výsledkem maximální střížná síla a průměr svaru změřený ze vzorku. Zkouška musí být provedena při pokojové teplotě. Svary mohou být vytvořeny na jednobodovém zkušebním vzorku (Obr. 12) nebo na vícebodový zkušební kus, který je po svaření nutné rozřezat. [6]



**Obr. 12 - Sestava pro zkoušku stříhem [6]**

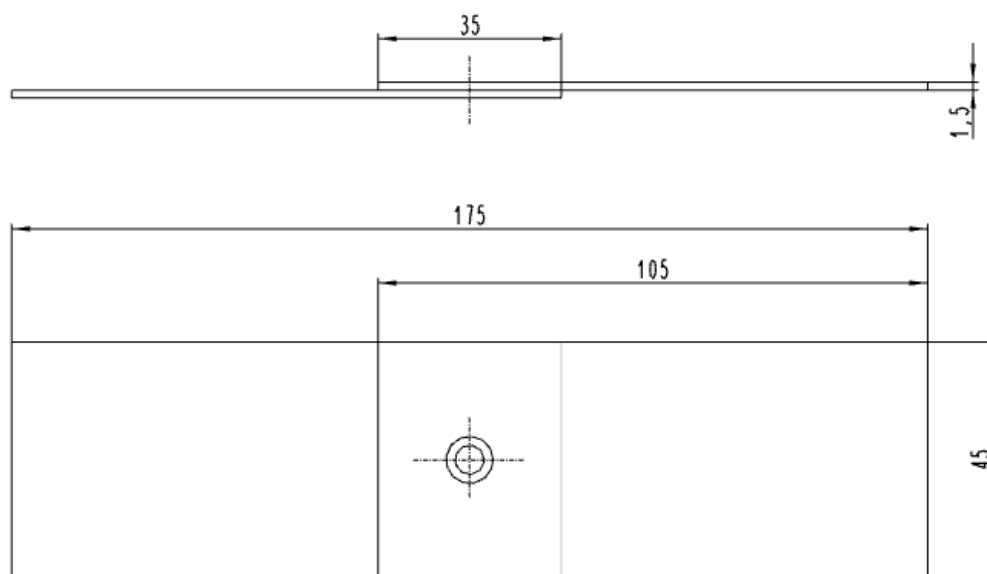
1 podložný plech



Protokol o zkoušce musí obsahovat následující údaje:

- metodu svařování;
- svařovací podmínky a zařízení;
- materiál a jeho stav;
- rozměry zkušebního kusu a vzorků;
- jednotlivé hodnoty, střední hodnotu a směrodatnou odchylku stříhové síly v kN;
- typ porušení;
- jednotlivé hodnoty, střední hodnotu a směrodatnou odchylku průměru svaru;
- zvláštní poznámky, pokud jsou.

Statická zkouška stříhem byla použita pro vyhodnocení životnosti elektrod v experimentální části této práce. Pro tloušťku materiálu 1,5 mm jsou normou dány tyto rozměry svařené soustavy (*obr. 13*).



**Obr. 13 – Rozměry svařených plechů pro statickou zkoušku stříhem z experimentální části této práce [6]**

## **Rázová zkouška stříhem a rázová křížová zkouška tahem**

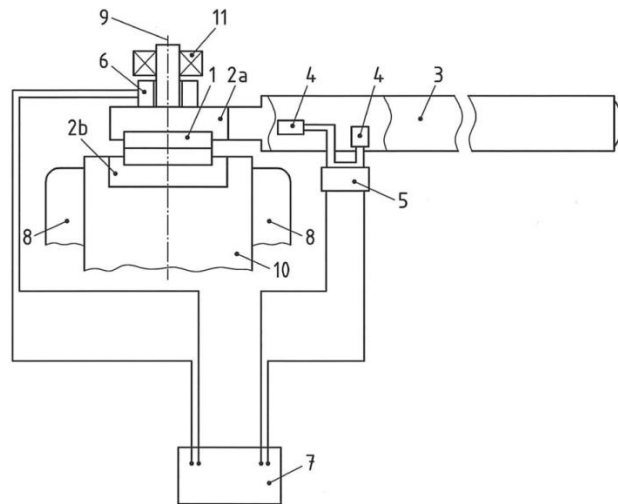
Je prováděna podle normy ČSN EN ISO 14323. Umožňuje zjistit dynamickou pevnost v tahu bodového svaru. [17]

### **Zkouška krutem**

Je prováděna podle normy ČSN EN ISO 17653. „Tato mezinárodní norma stanovuje rozměry vzorků, zkušební zařízení a postup zkoušky krutem pro odporové bodové svary, které mají jednotlivé tloušťky ocelových plechů v rozmezí od 0,5 mm do 6,0 mm. Za určitých okolností může být použita pro neželezné materiály. Účelem této mezinárodní normy je stanovení průměru svaru, druh porušení zlomových vzorků, hodnocení vlivu různých typů oceli, parametrů svařování a jiných činitelů na deformační charakteristiky bodového svaru.“ [7]

Do zkoušky krutem spadají dva druhy zkoušek. První je nejjednodušší tzv. dílenská zkouška. U této zkoušky zjistíme po provedení zkoušky průměr svaru a typ porušení. Druhou je zkouška krutem s instrumentací. U této metody je nutné pohybovat ramenem plynule zhruba 90° za 5 sekund. Úhel zkroucení a krouticí moment musí být během zkoušky zaznamenáván vhodným zařízením. Výsledkem je graf závislosti krouticího momentu na úhlu zkroucení, kde je zjištěna i maximální hodnota krouticího momentu. [7]

Krouticí moment, úhel zkroucení a druh porušení jsou závislé na tloušťce plechu, průměru svaru a mechanických charakteristikách svarové čočky, tepelně ovlivněné oblasti a základním materiálu. [7]



**Obr. 14 - Příklad měřicího zařízení pro torzní zkoušku s instrumentací [7]**

- 1 vzorek
- 2a držák vzorku rotační
- 2b držák vzorku pevný
- 3 momentové rameno
- 4 průtahoměr
- 5 zesilovač průtahoměru
- 6 snímač úhlu krutu
- 7 zapisovač údajů
- 8 čelist upínacího zařízení pro uspořádání upínacího přípravku
- 9 osa rotace
- 10 pouzdro pro držáky 2a a 2b se společnou osou rotace a ložiska
- 11 ložisko [7]

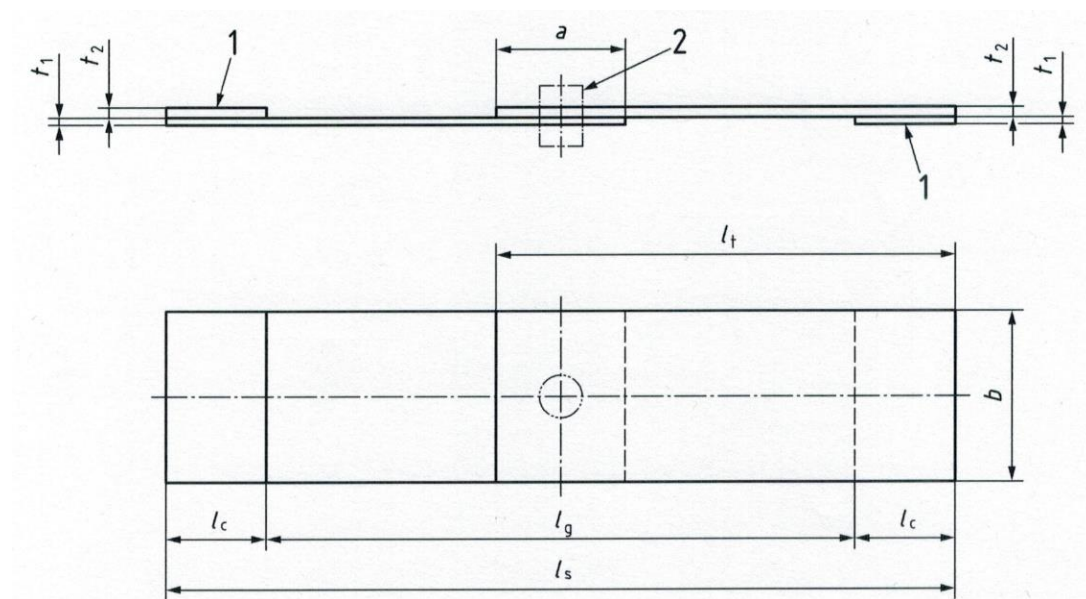
Protokol o zkoušce musí obsahovat následující údaje:

- odkaz na mezinárodní normu (ISO 17653:2012);
- použité svařovací zařízení;
- parametry svařování;
- označení materiálů a tloušťky plechů;
- průměr svaru  $d$ ;
- maximální krouticí moment a odpovídající úhel zkroucení, pokud jsou uvažovány;
- druh porušení, vzhled lomového povrchu (rozstřík nebo postřík svaru, póry, studený spoj);
- podrobnosti postupu svařování a použitého měřicího zařízení;
- jakékoliv odchylky od této mezinárodní normy. [7]

## Zkouška kombinovaným namáháním tahem a stříhem

Je prováděna podle normy ČSN EN ISO 12996. „Tato mezinárodní norma specifikuje geometrii zkušebních vzorků a postup zkoušky kombinovaným namáháním tahem a stříhem jednotlivých mechanických spojů na jedno a vícevrstvých vzorcích až po jednotlivé tloušťky plechu 4,5 mm. Účelem zkoušky kombinovaným namáháním tahem a stříhem je určení mechanické charakteristiky a způsobu porušení spojů vytvořených různými metodami.“ [8]

Postup provedení zkoušky je následující. Zkušební tělesa jsou upnuta v trhacím stroji, splňující normu ISO 7500-1. Zkouška se převážně provádí při pokojové teplotě, pokud není dohodnuto jinak. Rychlost zkoušení je 10 mm/min nebo menší. Měří se posunutí pomocí vhodného snímače s definovanou délkou přímo na vzorku. Způsob měření a stanovená měřená délka musí být zapsána do zkušebního protokolu. Výsledkem jsou grafy, např. závislost síly na posunutí. Způsob porušení musí být kvalifikován dle přílohy normy ČSN EN ISO 12996, která ukazuje klasifikaci typických způsobů porušení. [8]



**Obr. 15 - Zkušební vzorky pro zkoušku kombinovaným namáháním tahem a stříhem s jednoduchým přesahem [8]**

- a délka překrytí
- b šířka plechu
- $l_c$  svěrná délka (délka vetknuté plochy)
- $l_s$  celková délka zkušebního vzorku

$l_g$	volná délka upnutí zkušební vzorku
$l_t$	délka plechu
$t_1, t_2$	tloušťka plechu
1	podložka plechu (vyrovnání plechu)
2	mechanické spojení [8]

Zkušební zpráva musí obsahovat informace dohodnuté mezi smluvními stranami. Obsah může zahrnovat některé nebo všechny položky:

- odkaz na tuto mezinárodní normu (ISO 12996:2013);
- jméno zkoušejícího a/nebo zkušební komise;
- datum a podpis zkoušejícího a/nebo zkušební komise;
- technika spojení;
- parametry spojení a uspořádání spojení, použitý spojovací prvek;
- materiál vzorku a stav materiálu;
- směr spojení, pořadí spojovacích součástí, rozložení povlaku povrchu;
- rozměry vzorku;
- zkušební zařízení, rychlost zkoušky;
- definovaná délka vzorku a typu zkušební přístroje používaného pro měření jednotlivé hodnoty posunutí, střední hodnoty a směrodatné odchylky charakteristické hodnoty;
- jednotlivé výsledky zkoušky, směrodatné odchylky, variační koeficienty pro sílu a posunutí;
- diagramy síla-posunutí;
- způsob porušení;
- všechny doplňující poznámky a všechny odchylky od této mezinárodní normy. [8]

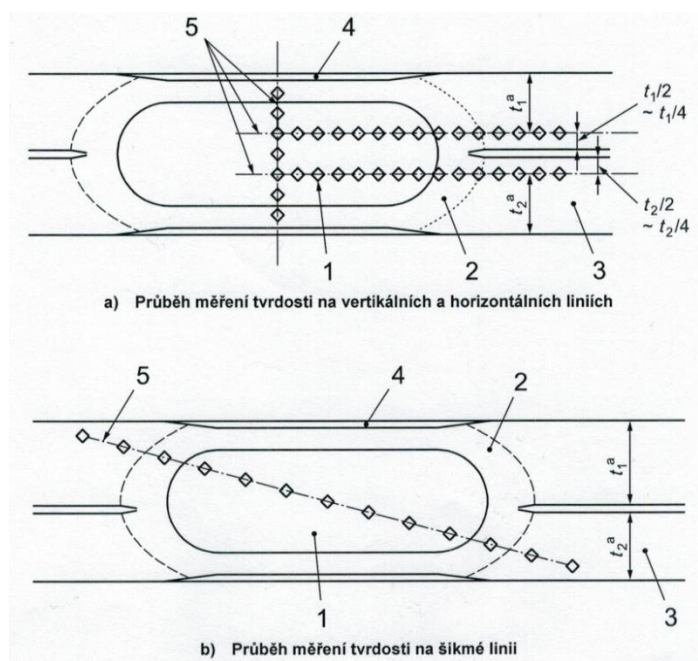
## **Makroskopická a mikroskopická kontrola**

Slouží k úplnému zkontrolování svarového spoje. Pomocí této zkoušky získáváme přehled o stavu struktury svaru, jeho přechodové oblasti, výskytu pórů a prasklin. Metalografická zkouška se provádí na výbrusu a může být zaměřena na mikrostrukturu nebo na makrostrukturu spoje. Příprava vzorku je následující. Svar se rozřízne přes průměr, tak aby plocha řezu procházela největším průměrem čočky. Poté se plocha řezu vybrousí a vyleští. Dále je plocha naleptána vhodným leptadlem.

Tímto postupem je následně zjištěna makrostruktura svaru. Pokud je nutné zjistit ze vzorku mikrostrukturu, je postup složitější. Pro zjištění mikrostruktury je nutné leštění dovést do zrcadlově lesklého stavu a dále opět naleptat plochu. Tato kontrola, pokud je to nutné doplňuje zkouškou tvrdosti. [1]

## Zkoušení tvrdosti

Pro zkoušení tvrdosti je dána norma ČSN EN ISO 14271. „Tato mezinárodní norma stanovuje postupy pro zkoušení tvrdosti na naleptaných řezech odporových bodových a výstupkových svarů. Cílem zkoušek tvrdosti je stanovení tvrdosti podle Vickerse, v rozsahu nízké síly nebo mikrotvrdosti, ve svarové čočce, v tepelně ovlivněné oblasti a v základním materiálu ze železných nebo neželezných kovů a svarů provedených na materiálech tloušťky 0,5 až 6 mm.“ [27]



**Obr. 16 - Směrnice pro umístění vtisků v základním materiálu, v tepelně ovlivněné oblasti a ve svarové čočce [27]**

- 1 svarová čočka
- 2 tepelně ovlivněná oblast (HAZ)
- 3 základní materiál
- 4 vtisk elektrodou
- 5 průběh tvrdosti
- $t_1, t_2$  tloušťka plechu
- <sup>a</sup>  $t_1 \geq t_2$

Protokol o zkoušce musí obsahovat následující údaje:

- použitou zkušební metodu, včetně odkazu na tuto mezinárodní normu (ISO 14271:2012);
- druh zkoušky tvrdosti (zkouška tvrdosti nízkou silou nebo zkouška mikrotvrdosti) a hodnotu zkušební síly;
- polohu vtisků;
- jednotlivé hodnoty tvrdosti;
- střední hodnota tvrdosti;
- postup odporového svařování;
- podmínky svařování;
- svařovací zařízení;
- materiálovou specifikaci. [27]

### **3.2.2 Nedestruktivní zkoušky**

Zkoušky, při kterých není výrobek se zkoumaným svarem deformován. Pro hodnocení odporových svarů nejsou přímo specifikovány normy ČSN. Obecné zásady jsou v normě ČSN EN ISO 17635 Nedestruktivní zkoušení svarů – Všeobecná pravidla pro kovové materiály. [28]

#### **Prozařovací metoda**

Slouží ke zjišťování pórů, a dalších vad svarů. Principem je průchod elektromagnetického vlnění o velmi krátkých vlnových délkách  $10^{-9} - 10^{-12}$  [m] skrz materiál, tím se záření zeslabuje. V místě, kde se nacházejí vady je vlnění silnější. Toto vlnění dopadá na film, kde vznikne obraz vad jako tmavších míst. [9]

#### **Magnetická metoda**

Slouží ke zjištění povrchových a podpovrchových vad u feromagnetických materiálů. Principem této metody je zmagnetování zkoušeného materiálu a následné nanesení feromagnetického prášku na povrch materiálu. Ten se magneticky přichytí na povrch, ovšem jen v místě rozptýleného toku. V místě, kde se nachází vada je materiál magneticky nevodivý, proto dochází ke změně směru indukčních čar. [10]

## Ultrazvuková metoda

Je jedna ze základních metod nedestruktivního zkoušení. Principem je vyslání ultrazvukové vlny ultrazvukovou sondou do materiálu, vlny se odrážejí od každého rozhraní, ale i od vnitřních vad. Ultrazvuková sonda je vysílač a zároveň přijímač vln. Čím vyšší frekvenci vlnění nastavíme, tím menší vady můžeme zjistit. Tato metoda má mnoho výhod, mezi hlavní výhody patří finanční úspora za nepoškozené díly, rychlost zjištění výsledku a další. Ovšem má i své nevýhody. Je nutné, aby přístroj obsluhoval a výsledky vyhodnocoval pracovník se zkušenostmi a znalostmi výrobní technologie a zkouškou samotnou. [10]

## 4 Životnost bodových svařovacích elektrod

Životnost elektrod se definuje jako počet svarů, které mohou být provedeny v požadované jakosti svaru před nezbytnou úpravou dotykové plochy elektrody. [12] V automobilovém průmyslu je životnost elektrody definována jako: celkový počet svarů provedených elektrodou s několikrát upravenou pracovní plochou. Např. elektroda je obrobena po každých 250 svarech, tato úprava pracovní plochy je provedena dvacetkrát. Životnost takovéto elektrody je tedy 20x250 svarů.

Životnost elektrod se hodnotí podle normy ČSN EN ISO 8166. Tato norma slouží pro hodnocení životnosti bodových svařovacích elektrod při svařování ocelových plechů bez povlaku, s povlakem, korozivzdorných ocelí a hliníku. Nastavení stroje je v průběhu svařování konstantní. Specifikovaným postupem je určena životnost bodových svařovacích elektrod. Zkušební postup může být použit k vyhodnocení následujících údajů:

- vliv materiálu nebo tvaru a rozměrů elektrod na životnost elektrod při svařování určeného materiálu;
- vliv svařovaného materiálu na dosaženou životnost elektrod při použití konstantního tvaru a rozměrů elektrod;
- vliv svařovacích podmínek na životnost elektrod při použití dané kombinace materiálu a tvaru elektrod pro svařování jakéhokoliv druhu materiálu;
- vliv typu svařovacího stroje a chlazení elektrod na životnost elektrod. [12]

Elektroda dosáhne své životnosti, když provedené svary mají průměr svaru podle zjištění při odlupovací zkoušce menší než  $3,5\sqrt{t}$  (t je tloušťka plechu v mm) u



tří svarů zkušebního vzorku pěti po sobě jdoucích svarů. Nepřípustné jsou svary, u kterých je svar vytvořen pouze na obvodu svarové čočky, tzv. prstencový, nebo takový, který nemá dostatečnou pevnost. Prstencové svary mají tendenci dříve vytvářet oceli s povlakem. Důležitým faktorem, který ovlivňuje životnost elektrod je typ a konstrukce svářečky či svařovacích kleští. Elektrické i mechanické vlastnosti svařovacího stroje jsou dány normou ISO 669. Faktory pro ukončení zkoušky mohou být:

- dohodnuté snížení pevnosti ve stříhu, například o 30 %, zkouška se provede podle EN ISO 14273;
- dohodnuté kritérium založené na mikrovýbrusech;
- požadavky založené na jakosti povrchu u pohledových dílů, například vtisky elektrod nebo poškození povrchu;
- dohodnutá kritéria založená na přilepování elektrod ke svařovaným dílům. [12]

Další působící faktory, které se podílejí na celkové životnosti elektrod:

- vliv výrobce svařovacích elektrod;
- vliv uživatele;
- vliv svařovacího stroje.

Mezi hlavní vlivy, které může ovlivnit výrobce svařovacích elektrod, patří:

- chemické složení;
- zpevnění tvářením za studena;
- tepelné zpracování.

Vlivy na celkovou životnost, které může ovlivnit uživatel:

- nastavení svařovacích parametrů;
- technologické podmínky: vodní chlazení elektrod, volba elektrody a ofrézování elektrody [1]

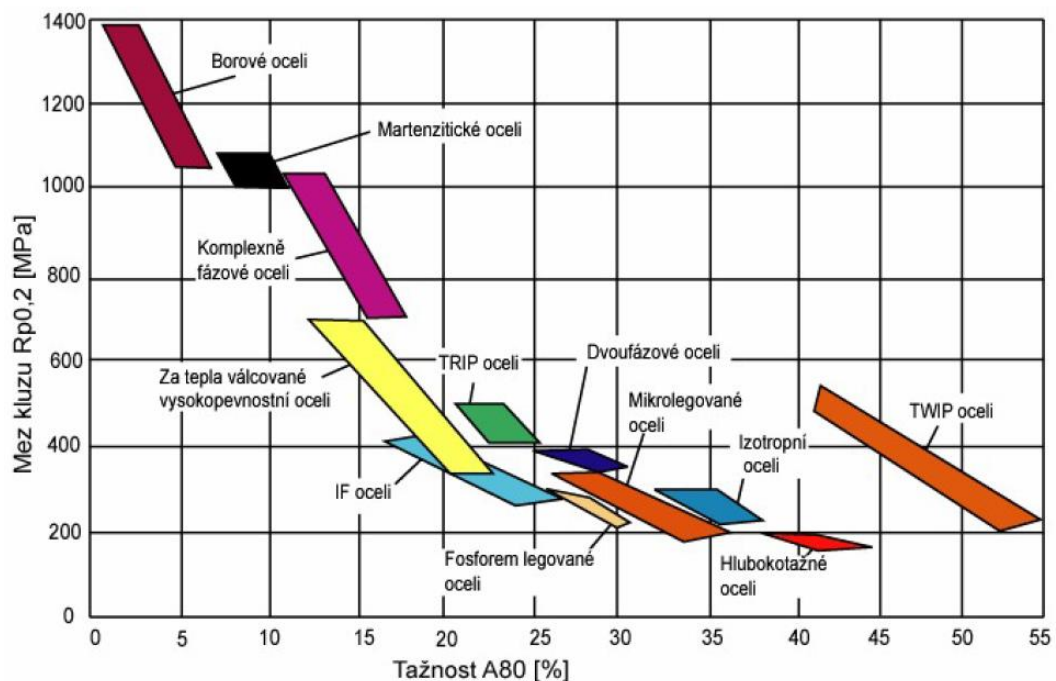
Po dokončení zkoušky, musí být vyhotoven protokol o zkoušce. Pokud není stanoveno jinak, musí být následující údaje zaznamenány pro všechny zkoušky:

- místo zkoušky;
- údaje o použitém typu svařovacího stroje;
- údaje o elektrodách;
- chlazení elektrod;

- údaje o svařovaném ocelovém plechu;
- svařovací podmínky;
- program svařovacího proudu;
- kritéria životnosti elektrod;
- vlastnosti na začátku zkoušky. [12]

## 5 Oceli používané v automobilovém průmyslu

V dnešní době, je na karoseriích použito velké množství druhů ocelí. Trend vývoje a použití ocelí znázorňuje graf závislosti meze kluzu na tažnosti (*Obr. 17*). [14]



**Obr. 17 - Trend vývoje ocelí v automobilovém průmyslu [14]**

Používané oceli na karoseriích, by měly mít co nejvyšší pevnost při současně vysoké plasticitě. Podle typu dané oceli, jsou její charakteristiky nejvíce ovlivněny chemickým složením, tepelným zpracováním a technologií zpracování. [14]

**Hlubokotažné oceli** jsou oceli, které obsahují malé množství *C*, nemají vysokou pevnost, avšak mají vysoké hodnoty tažnosti (*obr. 17*). [14]

**IF oceli** mají velmi nízký obsah *C* a *N* a obsahují silné karbidotvorné a nitridotvorné prvky jako jsou *Ti* a *Nb*. Mají výborné hlubokotažné vlastnosti. Proto

jsou používány na nejnáročnější díly automobilových karoserií z hlediska tváritelnosti. [14]

**DP oceli** obsahují dvě fáze. Hlavní fáze je feritická, která zajišťuje dobrou plasticitu. Požadovaná pevnostní úroveň je dosažena transformací zbytkového stabilizovaného austenitu v podobě martenzitu. Při výrobě je nutné dostatečně rychlé ochlazení, aby poměr složek v materiálu byl 85% feritu k 15% martenzitu. Pevnost těchto ocelí se pohybuje od 500 MPa do 1200 MPa. Používají se pro takové díly karoserie, kde je třeba vysoké pevnosti, dobré odolnosti proti nárazu a dobré svařitelnosti. V karoserii tvoří díly vyrobené z této oceli až 74%. [14]

**TRIP oceli** jsou multifázové oceli. Hlavní fází je ferit (50-60%), další fází je bainit (25-40%) a zbytkový austenit (5-15%). Tyto oceli mají vyšší obsah *C*, *Mn* a dalších prvků. Jsou charakteristické nízkým stupněm legování. Dosahují pevnosti až 800 MPa. [14]

**Martenzitické oceli** jsou produktem prudkého zakalení z austenitické teploty. Dosahují vysokých hodnot meze kluzu a pevnosti a to přes 1000 MPa. Používají se na karoseriích tam, kde je nutná vysoká pevnost. [14]

**TWIP oceli** jsou slitiny *Fe – Mn – C*. Mangan je v zastoupení 22-25%. Ze slitiny TWIP 1100 se v průměru získává meze kluzu 490 MPa, meze pevnosti 1100 MPa a tažnosti 52%. Z této oceli se vyrábějí plechy, které jsou umístěny v deformačních zónách karoserie pro svoji výbornou schopnost pohlcovat energii. [14]

**Manganbórové oceli** mají hlavní legury *Mn* a *B*. Kde *Mn* je zastoupen v rozmezí 1,1-1,4 % a *B* 0,002-0,005 %. Tento materiál je vyráběn s feriticko-perlitickou strukturou a vyloučenými karbidy. Válcuje se za tepla nebo za studena. Hodnoty mechanických vlastností jsou  $R_{p0,2}$  350-550 MPa,  $R_m$  500-700 MPa a tažnost  $A_{80}$  min 10%. [15]

Zpracování takovéto oceli v hutích může být provedeno různými způsoby. Například anorganicky nebo organicky povlakován, žárově ponorem povlakován *Al-Si* nebo žárově zinkován. Materiál z experimentu 22MnB5 má povlak na bázi *Al-Si* nanesený žárovým ponorem. Zpracování této oceli je tvářením za tepla, kdy materiál

s již nanesenou vrstvou Al-Si z hutí je ohřát na teplotu austenitu, poté je tvářen do výsledného tvaru, jako je práh, středový tunel atd. Zůstává v kalícím lisu po dobu 4-10 min při teplotě 900 °C až 950 °C v závislosti od tloušťky plechu a nanášené vrstvy povlaku. Následuje ochlazování nejméně 30 °C/s. Takto zpracovaný materiál má hodnoty mechanických vlastností.  $R_{p0,2}$  950-1250 MPa,  $R_m$  1300-1650 MPa a tažnost  $A_{80}$  min 4,5 %. Uvedené hodnoty pevnosti materiálu 22MnB5 jsou aktuálně jedny z nejvyšších ze všech používaných ocelí v automobilovém průmyslu. Proto jsou z hlediska pevnosti používány v místech karoserie, kde je požadována vysoká pevnost. [15]

## Experimentální část

Experimentální část je zaměřena na životnost svařovacích elektrod při svařování plechů o stejné tloušťce a stejném materiálu. Tyto plechy jsou vyrobeny z manganbórové oceli 22MnB5 s povlakem na bázi Al-Si s následným tepelným zpracováním. Chemické složení je uvedeno v tabulce 2. [16] Svařované plechy mají shodnou tloušťku 1,5 mm. Jedná se o reálný případ, co se týče plechů a odporového svařování. Takovéto plechy se nacházejí v přední části podlahy u karoserie Škody Octavie III. Avšak, při výrobě je mezi plechy nejdříve nanášeno pevnostní lepidlo na okraj středového tunelu, poté robot přiloží do daného místa plech pro nohy cestujících, při současné fixaci polohy robot vytvoří jistící bodové svary a následně pokračuje výroba celé podlahy, kdy se přikládají a svařují další plechy různých jakostí.

Svařování bylo provedeno s elektrodoými čepičkami chlazenými kapalným oxidem uhličitým. Tyto elektrodové čepičky 39D 1978-1 jsou stejné, jako ty používané na svařovací výrobní lince Škody Octavie III. Po provedení 30 svarů bylo svařování ukončeno. Důvodem byla vysoká teplota elektrodoých čepiček. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o záměně přímých elektrod za elektrodové čepičky a změně chlazení z kapalného oxidu uhličitého na centrální vodní chlazení. Oba experimenty byly realizovány na stejném materiálu a tloušťce svařovaných dílců.

## 6 Svařovací pracoviště

Svařování plechů pro experimentální část této práce bylo provedeno v laboratoři progresivních průmyslových technologií v budově L Technické univerzity v Liberci. Samotný proces svařování proběhl na invertorovém odporovém svařovacím stroji TECNA – typ 6124 s řídicí jednotkou T700. Chlazení svařovacího procesu je možné realizovat pomocí vody nebo kapalného oxidu uhličitého. Pro přívod chladicí vody je svařovací pracoviště vybaveno chladicí jednotkou Hyfra SVK 140/1. Kapalným oxidem uhličitým je dodáván kapilárami přímo do držáku elektrodových čepiček. Jeho dávkování provádí zařízení “CO<sub>2</sub> Control“ od firmy Linde. Monitorování vybraných veličin na svařovacím pracovišti zajišťuje měřicí zařízení Miyachi MG3 Digital a ABB IP65. Prvně zmíněné zařízení vyhodnocuje průběhy svařovacích parametrů v čase, druhé zařízení zaznamenává teplotu na elektrodě během svařovacího procesu. [24]

### 6.1 Charakteristika stroje TECNA – 6124

Svařovací stroj typu 6124 (*obr. 18*) je vybaven invertorovou technologií. To sebou přináší mnoho výhod. Mezi hlavními výhodami je přesné nastavení svařovacího času (po milisekundách), velmi rychlé dosažení nastaveného proudu, delší životnost elektrod, dokonalejší svary z estetického hlediska, až o 35 % nižší spotřeba proudu atd. Tyto svařovací stroje jsou vhodné pro svařování těžko svařitelných kovů a lehkých kovů, dále pro velmi tenké plechy díky přesnému nastavení svařovacího času a proudu. Svařování je možné provádět v několika pracovních režimech. [18]



**Obr. 18 - Invertorový odporový svařovací lis TECNA - typ 6124 [16]**

### **Režim s konstantním proudem (IK)**

Při provozu s konstantním proudem může být hodnota proudu, se kterou bude svařování provedeno, nastavena přímo řídicí jednotkou svařování. Svařovací jednotka měří v každé půlperiodě efektivní hodnotu (RMS) svařovacího proudu a udržuje nastavený proud konstantní. Hodnota maximálního svařovacího proudu je omezena na maximální proud. Při tomto pracovním režimu je dodržen konstantní proud, i když je ovlivněn kolísáním faktorů jako je např. síťové napětí, dimenzování a impedance okruhu svařovacího proudu, stav svařovacích elektrod a stav povrchu svařovaného materiálu. [18]

### **Režim s nastavením (FIX)**

V tomto pracovním režimu zadává provozovatel procento energie dodávané invertorem, která se pohybuje od 5% do 100%. Skutečný dodávaný proud invertorem zahrnuje různé faktory a není již konstantní. Mezi tyto faktory, které mohou mít vliv na aktuální změny, jsou: opotřebení elektrod nebo kolísání síťového napětí. Pracovní režim FIX je vhodný pro krátkodobé svařování s velkými odporovými změnami. [18]

## **Režim s konstantním sekundárním napětím (VEK)**

Při práci s konstantním sekundárním napětím, svářečka vypočítá skutečnou efektivní hodnotu (RMS) napětí na elektrodách každou ms a udržuje nastavenou konstantní hodnotu napětí podle matematického algoritmu. Hodnota proudu dodávaná invertorem je tedy nepřímou úměrnou odporu sekundárního okruhu a odolnosti svařovaného materiálu. Hodnota dodaného proudu nebude záviset na kolísání elektrického vedení. Sekundární napětí je udržováno konstantní, pokud je nižší než parametr CURR MAX. Inklinuje-li svařovací proud k překročení stanovené hodnoty v CURR MAX., inverter automaticky sníží hodnotu sekundárního napětí v reálném čase udržováním svařovacího proudu v rámci stanovených limitů CURR MAX. Hodnota může být nastavena tak vysoko, jako maximální hodnota svařovacího proudu transformátoru. Jeho úkolem je zabránit škodám při svařování v případě velkých změn v odporu svařovaného materiálu. Konstantní sekundární napětí pracovního režimu může být využito pro svary s wolframovými elektrodami nebo k vyrovnání opotřebení elektrod při svařování. Hodnota VEK zůstává během svařování konstantní, ale hodnota proudu se mění v závislosti na impedanci sekundárního okruhu. [18]

CURR. MAX            horní limit proudu [kA]

## **Režim s konstantním výkonem (PWK)**

Při práci v režimu s konstantním výkonem inverter vypočítá skutečnou efektivní hodnotu (RMS) sekundárního napětí a sekundárního proudu každou ms a udržuje konstantní produkt pomocí matematického algoritmu při změnách napětí v síti. V případě, že sekundární rezistence klesá, zvýší se svařovací proud a naopak, když se sekundární rezistence zvyšuje, svařovací proud se sníží. Úprava s konstantním výkonem funguje správně, pokud svařovací proud dosahuje aktuální hodnoty stanovené v CURR MAX. parametrech. Pro dosažení uvedeného omezení inverter automaticky snižuje dodanou energii v reálném čase omezováním hodnoty dodaného proudu. Dodaný svařovací proud nesmí překročit maximální hodnoty stanovené pro používaný svařovací transformátor. Používání konstantního výkonu lze chápat jako konstantní svařovací energie v reálném čase. Ve skutečnosti když pracujete s konstantním výkonem v průběhu svařování, je konstantní energetická

hodnota vždy dodávána po dobu fixního času. Použití režimu s konstantním výkonem může být užitečné pro kompenzaci opotřebení elektrod nebo svařovaných materiálů, které jsou vystaveny významným změnám odporu při svařování, jako například u kovů s velkým elektrickým odporem. V těchto případech se proud snižuje během počáteční fáze svařování, ve kterém je odpor materiálu typicky vyšší. Jako takový zabraňuje jevům rozstříkávání roztaveného materiálu, které snižují kvalitu svaru. [18]

### **Režim s konstantní energií (ENE)**

Při použití řízení s konstantní energií jsou provedena uspořádání jako u konvenčního řízení, s výjimkou parametrů ENERGIE a parametrů svařovací doby, pro něž není nastavena přesná hodnota, nýbrž hodnota minimální a maximální. Invertor neustále nastavuje svařovací proud, aby odpovídal nastavené hodnotě energie. Během svařování eviduje řízení skutečnou hodnotu svařovacího proudu (RMS), ohmické komponenty napětí na elektrodách ve voltech a trvání svařování v cyklech. Vzhledem k tomu, že ztrátová energie se redukuje na základě elektrického vedení mezi vnějšími plechy a elektrodami. Doporučuje se svařování s krátkými dobami a vysokou elektrodovou silou. Pro dokonalou kontrolu jakosti bodu je proto důležité, aby svařovací stroj, pro který je zařízení použito, měl charakteristická data pro výkon, sílu elektrod a svařovací proud, které jsou schopny provést body vysoké kvality. [18]

### **Režim dynamic (DYN)**

Provoz invertoru v dynamickém režimu je adaptivní prací v pracovním režimu. Tato jednotka je schopna rozpoznat poruchy při svařování, jako jsou nedokonalý kontakt svařovaných plechů, z důvodu přítomnosti nečistot mezi svařovanými kusy, přítomnost zkratů v blízkosti elektrod nebo opotřebení elektrod. Poté, co zjistí jednu nebo více poruchových stavů, může řídicí jednotka dynamicky měnit svařovací proces k nápravě uvedených podmínek. Celý proces je opraven tím, že rozšíří svařovací čas až do maximální hranice stanovené provozovatelem. V dynamickém režimu řídicí jednotka nastavuje svařovací proud za účelem získání správného svaru a zároveň brání rozstříkávání roztaveného materiálu, který by mohl vést k svarům nižší třídy. [18]



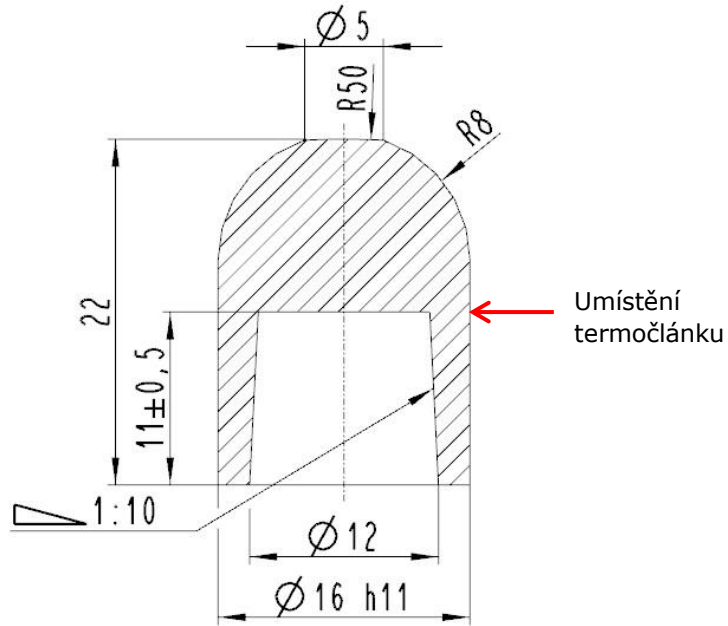
## Základní technické parametry stroje:

Nominální výkon při 20 %	285	[kVA]
Nominální výkon při 50 %	180	[kVA]
Maximální svařovací proud	64	[kA]
Nominální sekundární napětí	9,4	[V]
Napětí napájení 50 Hz – 3 fáze	400	[V]
Kabel délky 30 m	95	[mm <sup>2</sup> ]
Pojistky opoždění	200	[A]
Hloubka elektrod L	385	[mm]
Držák elektrod Ø d	25	[mm]
Pneumatický válec	125	[mm]
Síla stisku při 1 bar	123	[daN]
Síla stisku při 6 bar	736	[daN]
Maximální zdvih	100	[mm]
Nastavitelný dvojitý zdvih	0 – 80	[mm]
Minimální tlak vzduchu	6,5	[bar]
Maximální tlak vzduchu	10	[bar]
Maximální tlak vody	4	[bar]
Minimální spotřeba vody při nominálním výkonu	12	[l/min]
Čistá hmotnost stroje	540	[kg]

[19]

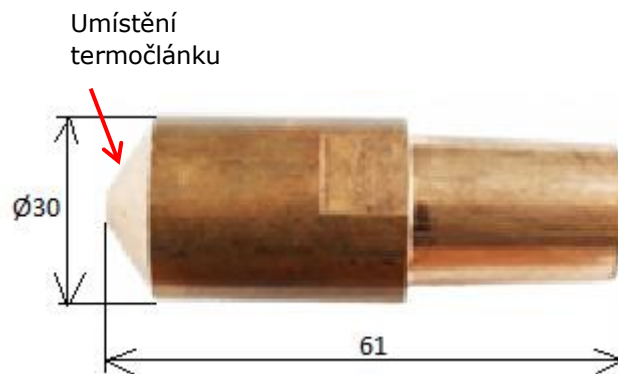
## 6.2 Použité typy svařovacích elektrod a elektrodoých čepiček

Pro elektrodové čepičky platí norma ČSN EN ISO 5821. [30] Elektrodová čepička 39D 1978-1 (*obr. 19*) je vyrobena z materiálu na bázi slitiny CuCr1Zr podle DIN ISO 5182 – A2/2 (Cr – 0,5-1,4 %, Zr – 0,02-0,2 %). [31]



**Obr. 19 – Geometrie a umístění termočlánku na elektrodové čepičce 39D 1978-1**

Pro přímé elektrody je zavedena norma ČSN EN 25184. [29] Přímá elektroda (obr. 20) je vyrobena ze slitiny CuCrZr. Styková svařovací plocha byla obrobena na průměr 5 mm, který je stejný jako u elektrodové čepičky 39D 1978-1.



**Obr. 20 – Základní rozměry a umístění termočlánku na přímé elektrodě**

### 6.3 Příprava experimentálního pracoviště

Příprava pracoviště probíhala v tomto pořadí. Prvně byly na elektrodové čepičky přivařeny termočlánky zhruba 11 mm od pracovní plochy. Termočlánky byly přivařeny na místě, které je znázorněné na obrázku 19. U přímých elektrod byly

termočláanky umístěny 3 mm od pracovní plochy. Umístění přivařených termočláneků je znázorněno na obrázku 20. Po 101. svaru byl přivařen na horní elektrodu ještě další termočlánek, z důvodu rozdílnosti teplot mezi horní a dolní elektrodou. Po přidání dalšího termočlánu bylo zjištěno, že první termočlánek na horní elektrodě udával správné hodnoty teplot.

Následovala fixace elektrodových čepiček na držáky elektrodových čepiček ve zkoušce životnosti elektrodových čepiček. Ve zkoušce životnosti elektrod byla nutná fixace samotných elektrod do držáků elektrod.

Na pracovišti bylo důležité spustit postupně všechny přístroje ve správném pořadí. V první zkoušce životnosti tedy, přívod kapalného oxidu uhličitého, měřicí zařízení Miyachi MG3 Digital, svařovací stroj TECNA a nakonec ABB IP65. V druhé zkoušce životnosti byl postup stejný kromě chlazení, to bylo nahrazeno chladicí jednotkou Hyfra SVK 140/1.

Když byly všechny přístroje a pracovní nástroje připraveny, bylo nutné nastavit parametry stroje. Ty byly nastaveny na prvních svarech série svařování.

## 7 Charakteristika svařovaného materiálu

### Výchozí materiál v nezakaleném stavu

Základní struktura materiálu po válcování za studena je feriticko-perlitická, v malém množství může obsahovat bainit a martenzit. [15]

**Tab. 2 - Chemické složení v hmotnostních % [15]**

Chemické složení oceli jakosti 22MnB5 [%]									
C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr	Mo	Ti
0,20	0,15	1,10					0,020	0,020	0,002
-	-	-	≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 0,025	≤ 0,005	-	-	-
0,25	0,40	1,40					0,050	0,060	0,005

**Tab. 3 - Mechanické vlastnosti výchozího materiálu [15]**

Stav	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tažnost $A_{80\text{ mm}}$ [%] <b>min.</b>
válcováno za studena nebo za tepla	350 - 550	500 - 700	10

Nanesený povlak na bázi *Al-Si* je kontrolován podle normy DIN EN 10346. V této normě je předepsána hmotnost povlaku na danou plochu. Ta je pro oboustranně povlakovaný plech obvykle  $150\text{ g/m}^2$  (+AS150) nebo  $80\text{ g/mm}^2$  (+AS80). Předepsané hodnoty povlaku jsou uvedeny v tabulce 4. [15]

**Tab. 4 - Předepsané hodnoty celkové tloušťky vrstvy povlaku na bázi Al-Si [15]**

Index povlaku	Tloušťka vrstvy na jedné straně v $\mu\text{m}$		Hustota [ $\text{g/cm}^3$ ]
	Typická hodnota	Rozmezí	
AS080	14	10 – 20	cca 3,0
AS150	25	19 - 33	

## Materiál v zakaleném stavu

**Tab. 5 - Mechanické vlastnosti materiálu v zakaleném stavu [15]**

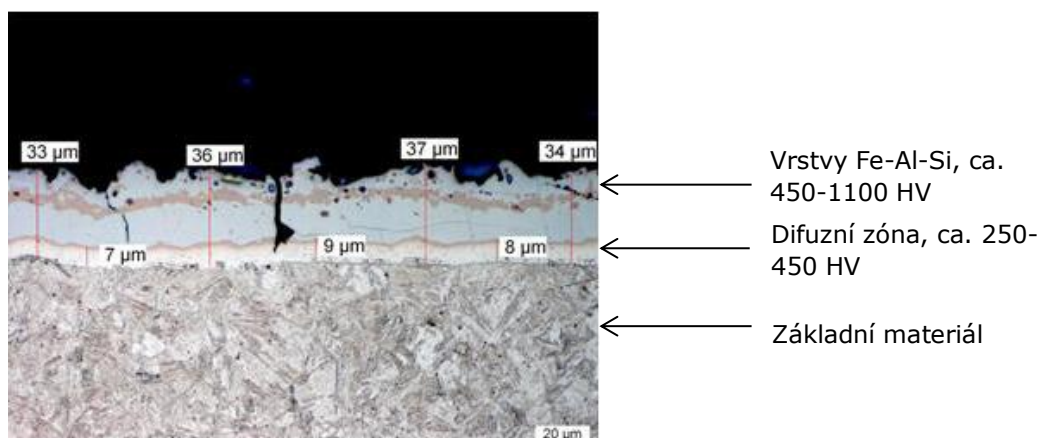
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tažnost			Tvrdost HV 10/ HV 30
		$A_{80\text{ mm}}$ [%] <b>min.</b>	$A_{50\text{ mm}}$ [%] <b>min.</b>	A [%] <b>min.</b>	
950 – 1205	1300 - 1650	4,5	5	6	400 - 520

Povlak na bázi *Al-Si* nanesený na plechu, má po zakalení také své předepsané hodnoty uvedené v tabulce 6. [15]

**Tab. 6 - Předepsané hodnoty celkové tloušťky vrstvy povlaku na bázi *Al-Si* v zakaleném stavu [15]**

Index povlaku	Celková tloušťka vrstvy na každé straně v $\mu\text{m}$		Tloušťka difuzní vrstvy na každé straně v $\mu\text{m}$
	Typická hodnota	Rozmezí	Předběžné hodnoty
AS080	21	15 – 30	$\leq 12$
AS150	35	30 – 50	$\leq 16$

Na obrázku 21 je metalografický výbrus s celkovou tloušťkou vrstvy i s rozhraními mezi základním materiálem, difuzní vrstvou a vrstvou *Fe-Al-Si*. [15]



**Obr. 21 - Vrstva *Al-Si* (AS150) po kalení do lisu se změřenými tloušťkami vrstvy [15]**

## 8 Příprava vzorků pro experimentální část

Vzorky ocelových plechů z materiálu 22MnB5 pro experiment byly vyřezány ze středových tunelů Škody Octávie III. Dále byly tyto vzorky odvezeny na řezací laser, kde bylo vyřezáno 190 ks zkušebních plechů o rozměru 105x45 mm. Všechny tyto operace byly provedeny v závodě Škody Auto a.s. v Mladé Boleslavi. Schéma a

rozměry svařených zkušebních vzorků pro zkoušku stříhem jsou znázorněny na obrázku 15.

## 9 Zkouška životnosti elektrodoých čepiček

Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN ISO 8166. Vysoké hodnoty mechanických vlastností zkoušeného materiálu 22MnB5 s následným tepelným zpracováním nedovolovaly vykonat odlupovací zkoušku, proto byla nahrazena stříhovou zkouškou.

Jak již bylo zmíněno, svařovací elektrodové čepičky byly chlazeny kapalným oxidem uhličitým. Pro ověření a úpravu svařovacích parametrů sloužilo prvních šest svarů. Od sedmého svaru zůstaly všechny parametry kromě chlazení elektrodoých čepiček stejné. V nastavení přístroje Miyachi MG3 Digital lze nastavit zaznamenávání hodnot pro jednotlivé svary nebo pro série několika po sobě jdoucích svarů. V experimentu bylo použito zaznamenávání série pro 5 svarů. Od 15. svaru měla být série 34 svarů do 49. svaru. Avšak po 30. svaru bylo svařování ukončeno. Přehled svarů a další informace jsou zobrazeny v tabulce 7.

**Tab. 7 - Značení a rozdělení svarů dle typu záznamu a typu zkoušky**

Číslo svaru	Typ záznamu	Typ zkoušky
2	Průběh svařovacích parametrů	
3	Průběh svařovacích parametrů	
4	Průběh svařovacích parametrů	
5	Průběh svařovacích parametrů	
6	Průběh svařovacích parametrů	Stříhem
7	Průběh svařovacích parametrů	Stříhem
8	Průběh svařovacích parametrů	Stříhem
9	Průběh svařovacích parametrů	Stříhem
10	Průběh svařovacích parametrů	Stříhem
11-15	Průběh svařovacích parametrů	Stříhem
16-30	Záznam teplot na el. čepičkách během svařování	

### 9.1 Svařovací parametry

Podkladem pro určení svařovacích parametrů byly diplomové práce [14] [16], které se zabývaly bodovým odporovým svařováním ocelových plechů z materiálu

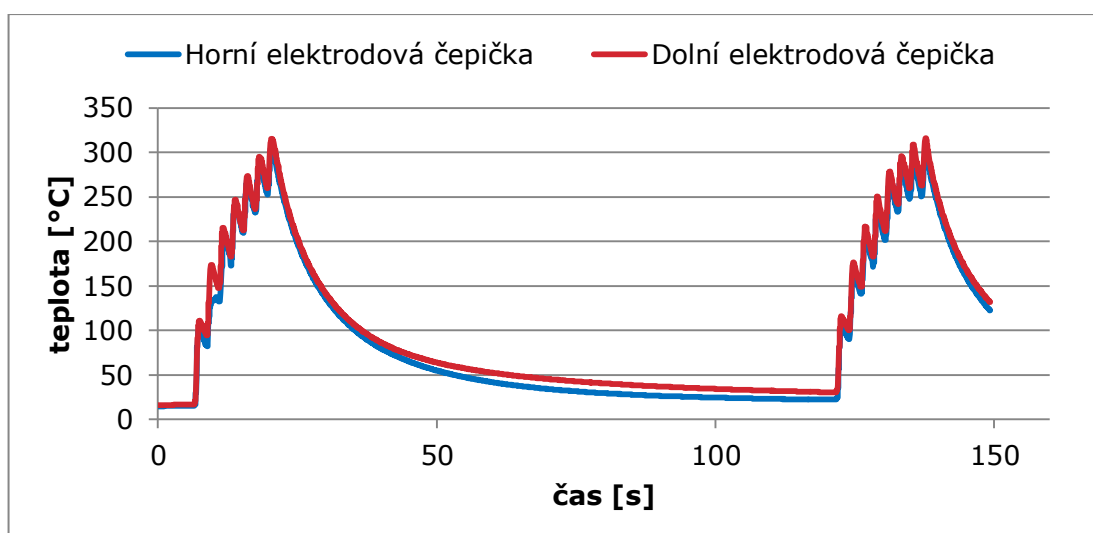
22MnB5. Svařování bylo provedeno v pracovním režimu IK. Byl nastaven konstantní svařovací proud  $I = 7,1$  kA pro celou sérii svařování. Svařovací parametry a změny svařovacího času jsou v tabulce 8. Od sedmého svaru byl svařovací čas konstantní. Kadence svařování byla 30/min. [14] [16]

**Tab. 8 - svařovací parametry pro svary 1 – 7**

Číslo svaru	Svařovací proud I [kA]	Svařovací čas t [ms]
1	7,1	300
2	7,1	300
3	7,1	300
4	7,1	350
5	7,1	350
6	7,1	350
7	7,1	390

## 9.2 Parametry chlazení a snímání teploty elektrodoých čepiček

Na každý svar do 15. svaru byl jeden vstřík  $\text{CO}_2$  po dobu 0,5 s. Tento čas odpovídá množství 1g  $\text{CO}_2$ . Po 15. svaru bylo zjištěno, že teplota na elektrodoých čepičkách dosahuje teplot nad  $300^\circ\text{C}$ . Proto byla prodloužena doba vstříku na 1,5 s ( $3\text{g CO}_2$ ). Průběh teplot na jednotlivých elektrodoých čepičkách je znázorněn na grafu 1.



**Graf 1 - Průběhy teploty pracovní části horní a dolní elektrody při svařování série svarů (svary číslo 16 až 30)**

Po 30. svaru přesahovala teplota opět hodnotu 300 C°, z tohoto důvodu nebylo možné ve svařování dále pokračovat a bylo rozhodnuto o změně chladícího média z CO<sub>2</sub> na H<sub>2</sub>O.

### 9.3 Zkouška stříhem

Zkouška stříhem probíhala na trhacím zařízení TIRA test 2300 (*obr. 22*) s možností zaznamenávání naměřených hodnot do softwaru LabNET.



**Obr. 22 - Trhací zařízení TIRA test 2300**

Měření průměrů svarových čoček bylo prováděno na měřicím zařízení Mitutoyo (*obr. 23*).

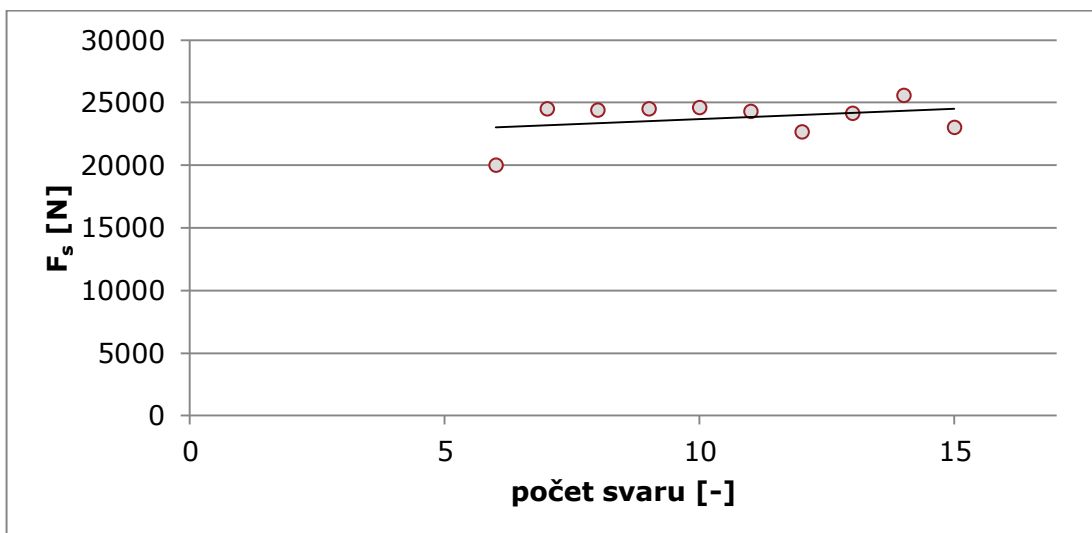


**Obr. 23 - Měřicí zařízení Mitutoyo**

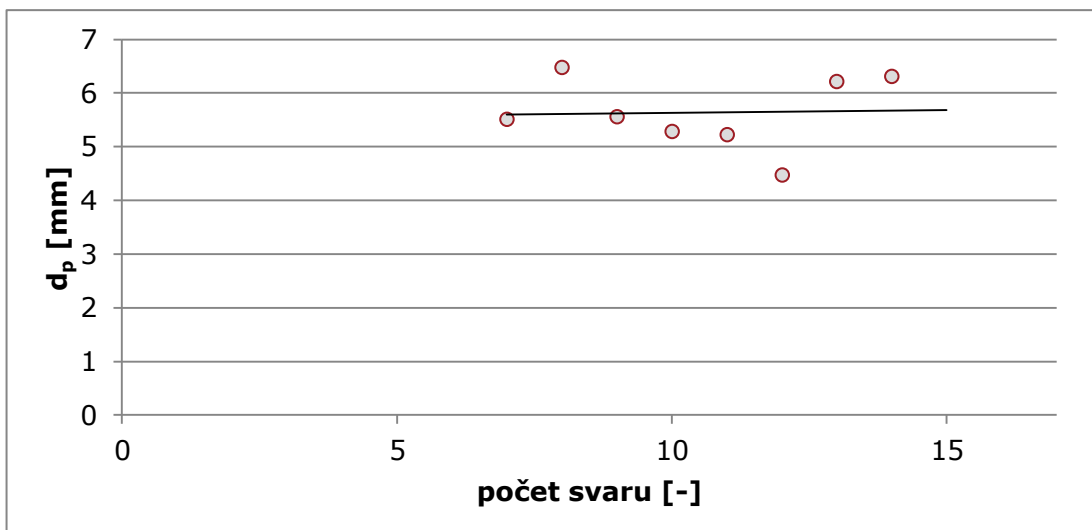


Zkušební vzorky byly upnuty do pracovních čelistí, vzhledem k přeplátování plechů, bylo nutné eliminovat tloušťku jednoho plechu vhodným nastavením čelistí tak, aby poloha vzorku byla svislá. Po upnutí vzorku do čelistí (vzdálenost mezi čelistmi byla 95 mm) byl vzorek zatěžován tahovou silou. Zkouška byla ukončena poté, co čelisti urazily dráhu 5 mm, tím bylo dosaženo porušení svaru.

Během zkoušky byly zaznamenávány hodnoty tahové síly v závislosti na posuvu čelistí do softwaru LabNET. Po vykonání zkoušky, byla softwarem vyhodnocena maximální stříhová síla  $F_s$ . Maximální střížné síly a střední hodnoty průměru zkušebních vzorků svařovaných elektrodoými čepičkami jsou uvedeny v příloze číslo 2.



**Graf 2 - Závislost maximální střížné síly na počtu svarů**

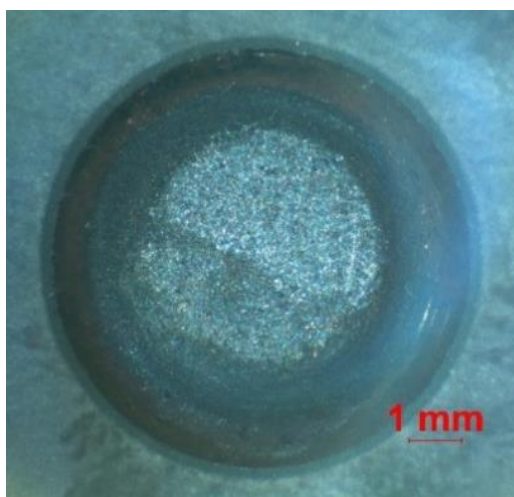


**Graf 3 - Závislost střední hodnoty průměru na počtu svarů**

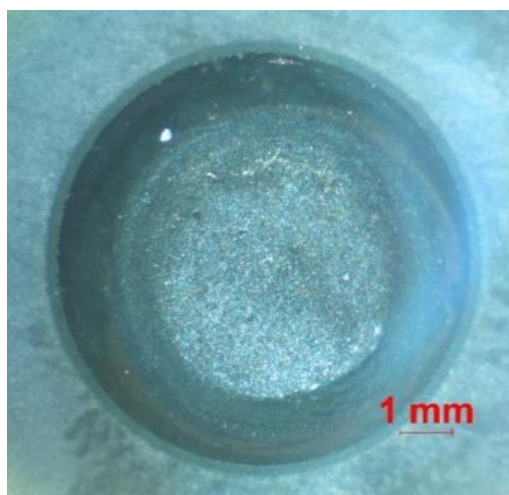
Křivky grafů 2 a 3 mají stoupající tendenci. Všechny hodnoty maximální sřížné síly leží nad hodnotou 20 kN. Hodnoty středních průměrů leží v rozmezí dvou milimetrů.

#### 9.4 Zhodnocení a shrnutí výsledků zkoušky

Původní hodnota průměru pracovní části nové elektrodové čepičky byla 5 mm. Po provedení 30 svarů byly hodnoty průměrů pracovní plochy dolní (*obr. 24*) a horní (*obr. 25*) elektrodové čepičky shodné 4,87 mm (důvodem menšího rozměru je zaoblený tvar pracovní části).



**Obr. 24 - Snímek pracovní části dolní elektrodové čepičky**



**Obr. 25 - Snímek pracovní části horní elektrodové čepičky**

Jednotlivé grafy závislostí  $F/t$ ,  $I/t$ ,  $U/t$  všech měřených svarů jsou v příloze 4. Z důvodu vysokých teplot pracovních ploch elektrodových čepiček bylo rozhodnuto o změně chlazení tekutým oxidem uhličitým na centrální chlazení vodou a použití přímých vsazovaných elektrod.

## 10 Zkouška životnosti elektrod

Svařovací parametry byly převzaty ze zkoušky životnosti elektrodových čepiček. Z důvodu výměny elektrodových čepiček za elektrody a jejich rozdílného materiálu sloužilo prvních 9 svarů pro úpravu svařovacích parametrů. Přehled svarů a další informace jsou zobrazeny v tabulce 9.

**Tab. 9 – Značení a rozdělení svarů dle typu záznamu a typu zkoušky**

Číslo svaru	Typ záznamu	Typ zkoušky
8	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
9	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
10	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
11-15	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
16-46	Záznam teplot na elektrodách během svařování	
47-51	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
52-95	Záznam teplot na elektrodách během svařován	
96-100	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
101		Sekáčová
102-195	Záznam teplot na elektrodách během svařován	
196-200	Průběh svařovacích parametrů	Statická stříhová
201-295	Záznam teplot na elektrodách během svařován	

296-300	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
301		Sekáčová
302-395	Záznam teplot na elektrodách během svařování	
396-400	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
401		Sekáčová
402-495	Záznam teplot na elektrodách během svařování	
496-500	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
501		Sekáčová
502-507	Průběh svařovacích parametrů	
508-695	Záznam teplot na elektrodách během svařování	
696-700	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
701		Sekáčová
702-895	Záznam teplot na elektrodách během svařování	
896-900	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
901-902		Sekáčová
901-905	Průběh svařovacích parametrů	
906-1095	Záznam teplot na elektrodách během svařování	
1096-1100	Průběh svařovacích parametrů	Střihem
1101		Sekáčová

## 10.1 Svařovací parametry

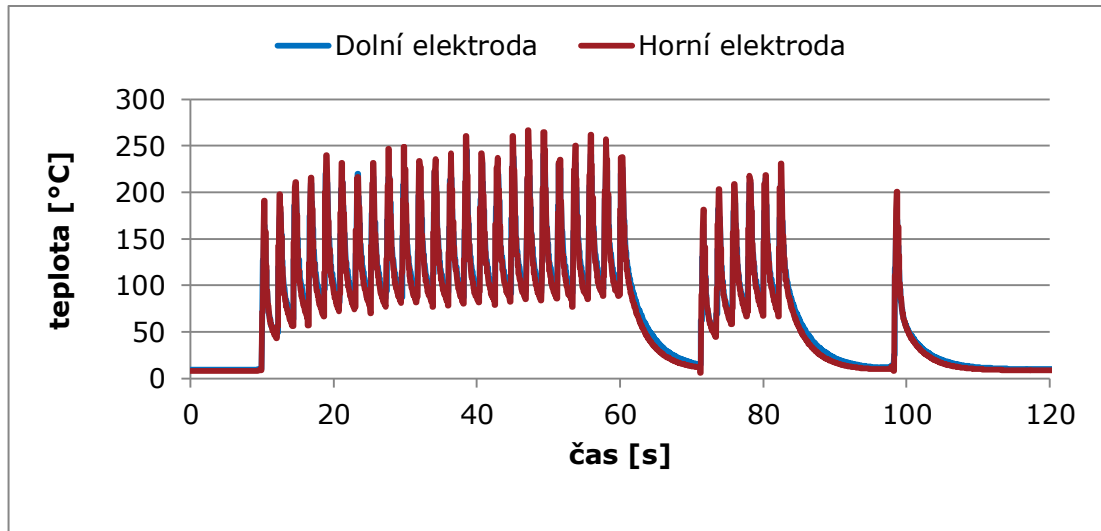
Pro celou sérii svařování byl nastaven konstantní svařovací proud  $I = 7,1$  kA. Od 9. svaru byl nastaven stejný svařovací čas. Kadence svařování byla 30/min. Svařovací parametry jsou uvedeny v tabulce 10.

**Tab. 10 – Svařovací parametry pro svary 1 – 9**

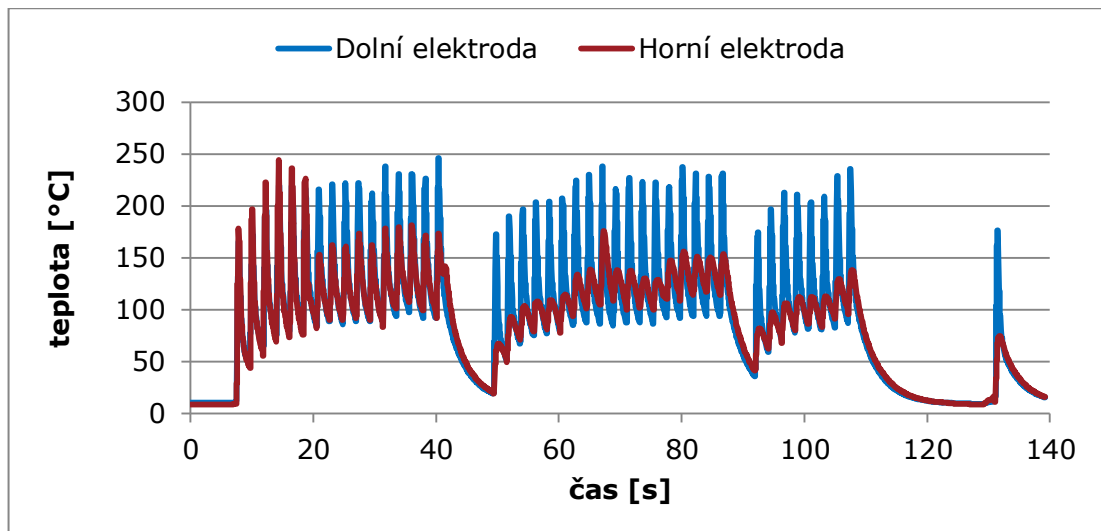
Číslo svaru	Svařovací proud I [kA]	Svařovací čas t [ms]
1	7,1	300
2	7,1	300
3	7,1	300
4	7,1	300
5	7,1	350
6	7,1	350
7	7,1	350
8	7,1	350
9	7,1	390

## 10.2 Parametry chlazení a snímání teploty elektrod

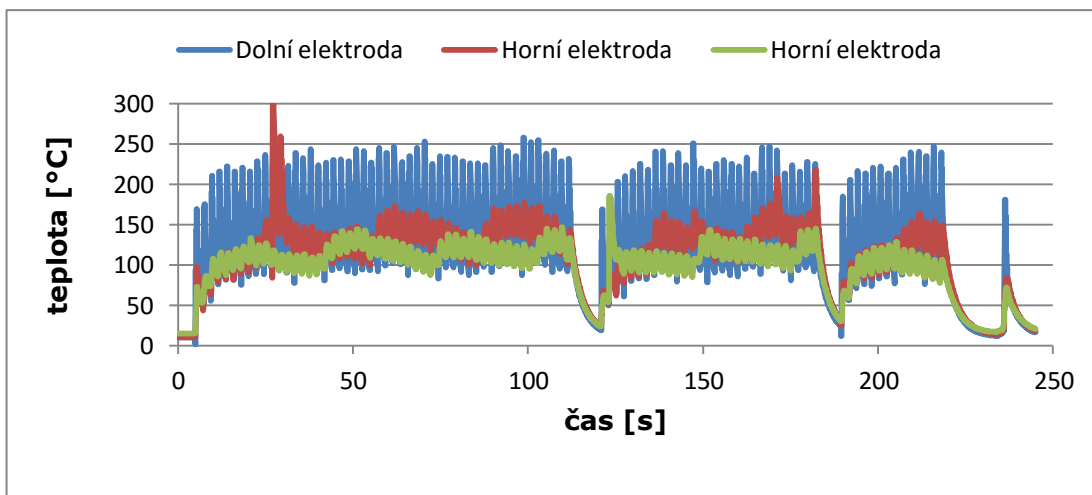
Na chladicí jednotce Hyfra SVK 140/1 byla nastavena hodnota teploty chladicího média (H<sub>2</sub>O) na 10 °C. V průběhu svařování se teplota vody na přívodu pohybovala v rozmezí 9,5-10,5 °C. Hodnoty teplot svarů jednotlivých sérií svařování jsou znázorněny na grafech 4-10.



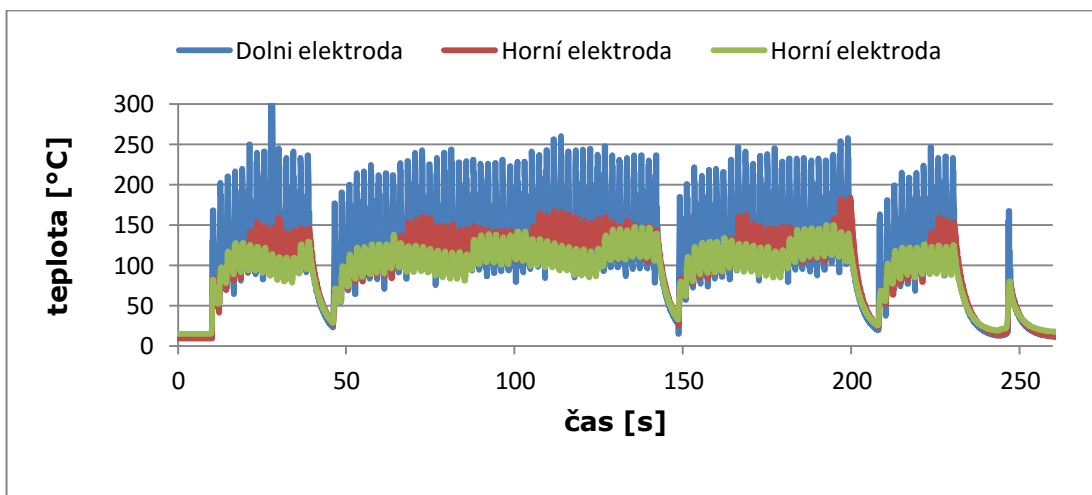
**Graf 4 - Průběhy teploty pracovní části horní a dolní elektrody při svařování série svarů (svary číslo 16 až 46)**



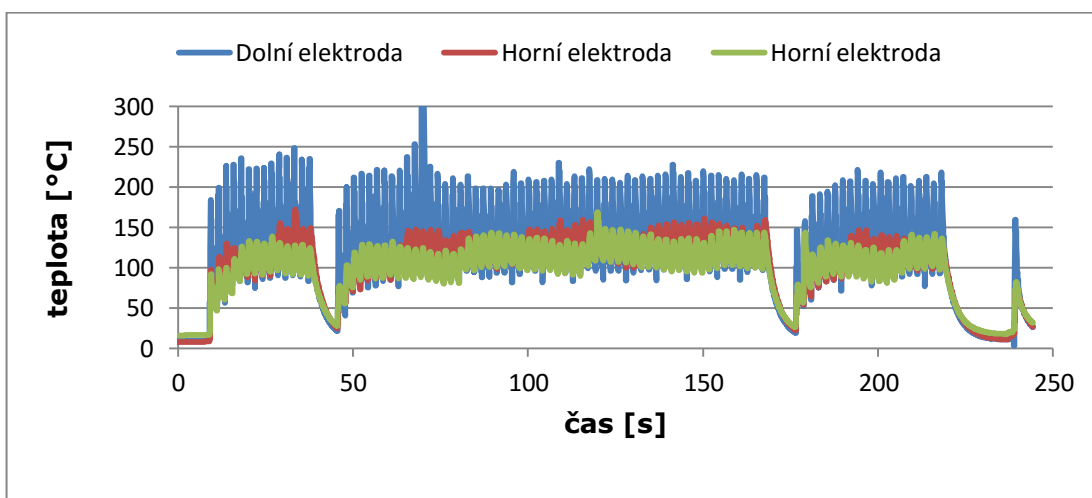
**Graf 5 - Průběhy teploty pracovní části horní a dolní elektrody při svařování série svarů (svary číslo 52 až 95)**



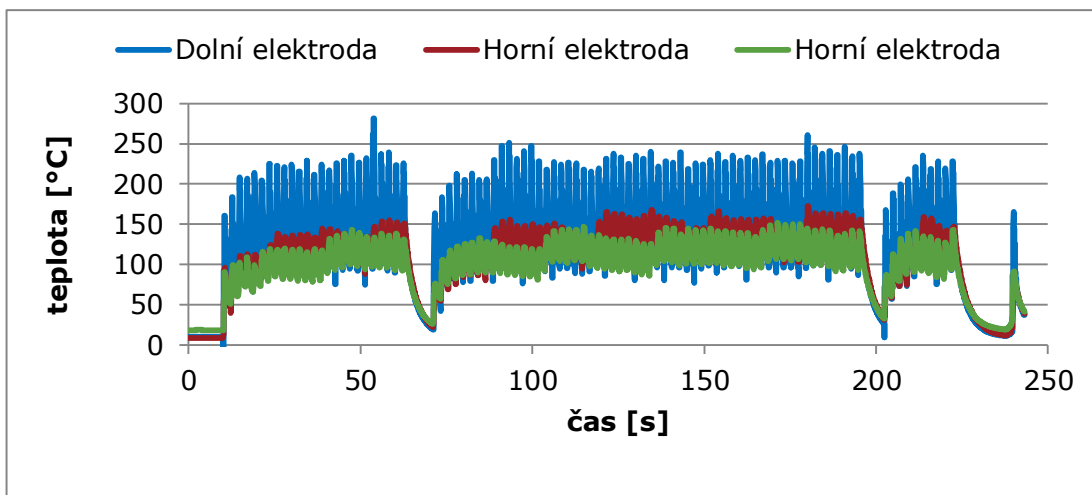
**Graf 6 - Průběhy teploty pracovní části horní a dolní elektrody při svařování série svarů (svary číslo 102 až 195)**



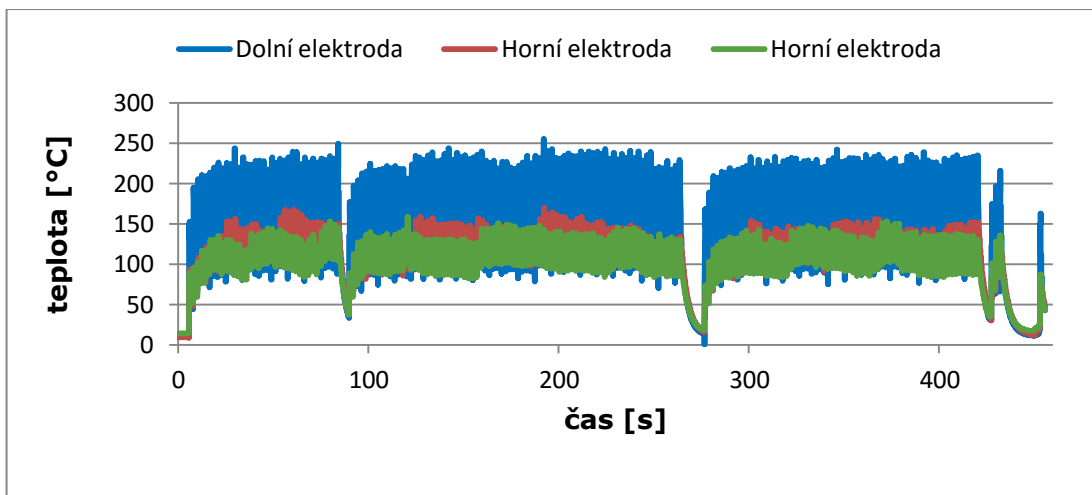
**Graf 7 - Průběhy teploty pracovní části horní a dolní elektrody při svařování série svarů (svary číslo 201 až 295)**



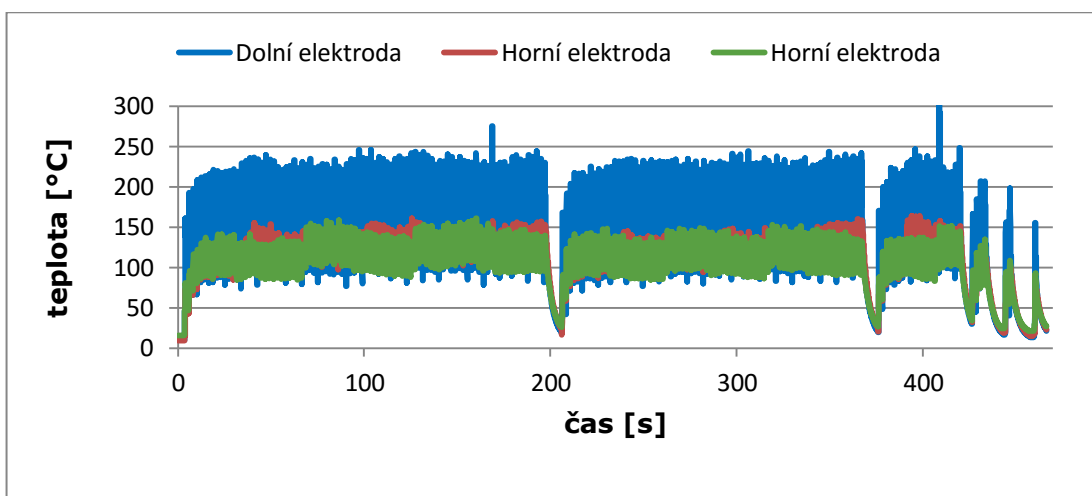
**Graf 8 - Průběhy teploty pracovní části horní a dolní elektrody při svařování série svarů (svary číslo 302 až 395)**



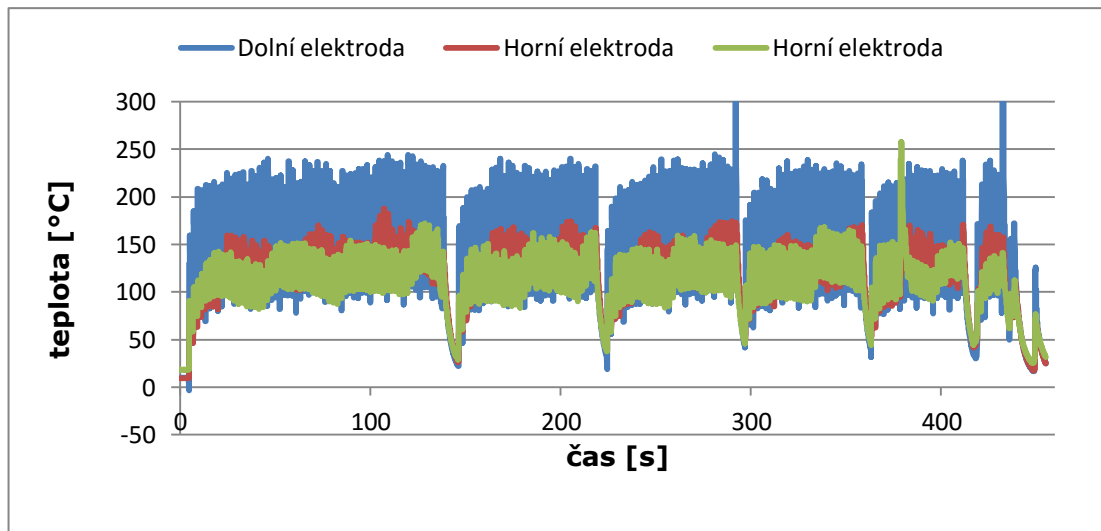
**Graf 9 - Průběhy teploty pracovní části horní a dolní elektrody při svařování série svarů (svary číslo 402 až 495)**



**Graf 10 - Průběhy teploty pracovní části horní a dolní elektrody při svařování série svarů (svary číslo 508-695)**



**Graf 11 - Průběhy teploty pracovní části horní a dolní elektrody při svařování série svarů (svary číslo 702 až 895)**



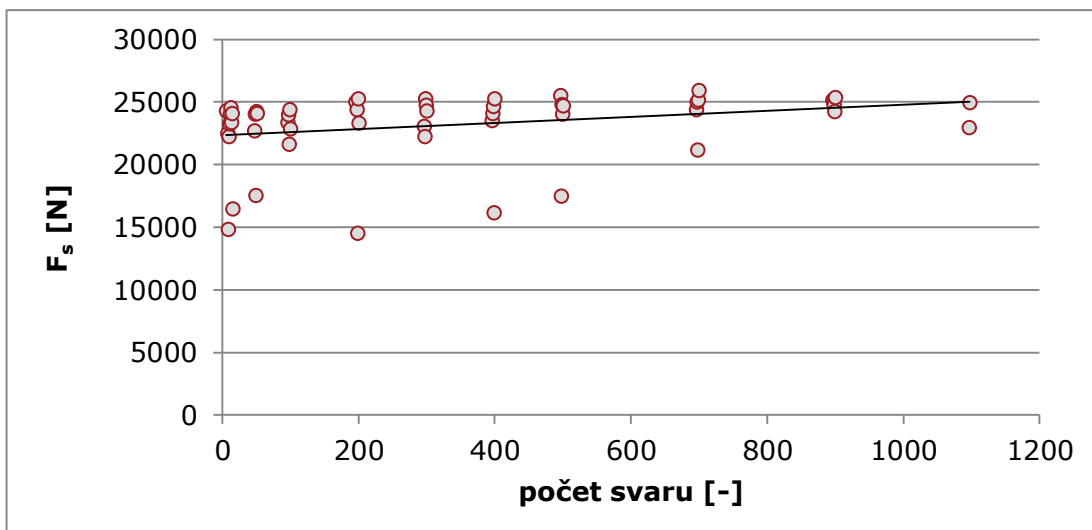
**Graf 12 - Průběhy teploty pracovní části horní a dolní elektrody při svařování série svarů (svary číslo 906 - 1095)**

Teplota horní elektrody je nižší než dolní elektrody. Vysvětlením pro tento jev je: dolní elektroda byla v neustálém kontaktu se svařovanými dílci, proto neměla žádnou časovou prodlevu na výraznější snížení své teploty na rozdíl od horní elektrody, která byla v kontaktu se svařovaným materiálem jen ve svařovacím časovém úseku. Jednotlivé poklesy teplot po určitém počtu svarů jsou dány prodlevou svařování z důvodu výměny svařovaných dílců. V některých grafech jsou hodnoty teplot v určitém místě skokově zvýšené, pokud došlo při svařování k překrytí jednotlivých svarů. Teploty horní elektrody při zanedbání teplotních skoků se pohybují kolem 150 °C. Na dolní elektrodě jsou maximální hodnoty teplot rozptýleny kolem 250°C.

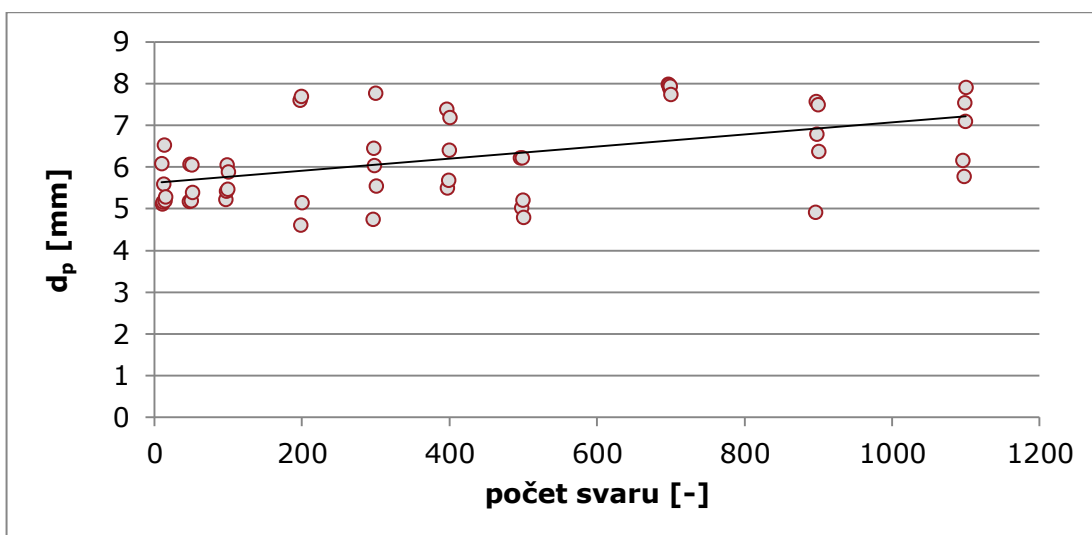
### 10.3 Zkouška stříhem

Maximální střížné síly a střední hodnoty průměru pro zkušební vzorky svařované přímými elektrodami jsou uvedeny v příloze číslo 3.





**Graf 13 - Závislost maximální střížné síly na počtu svarů**



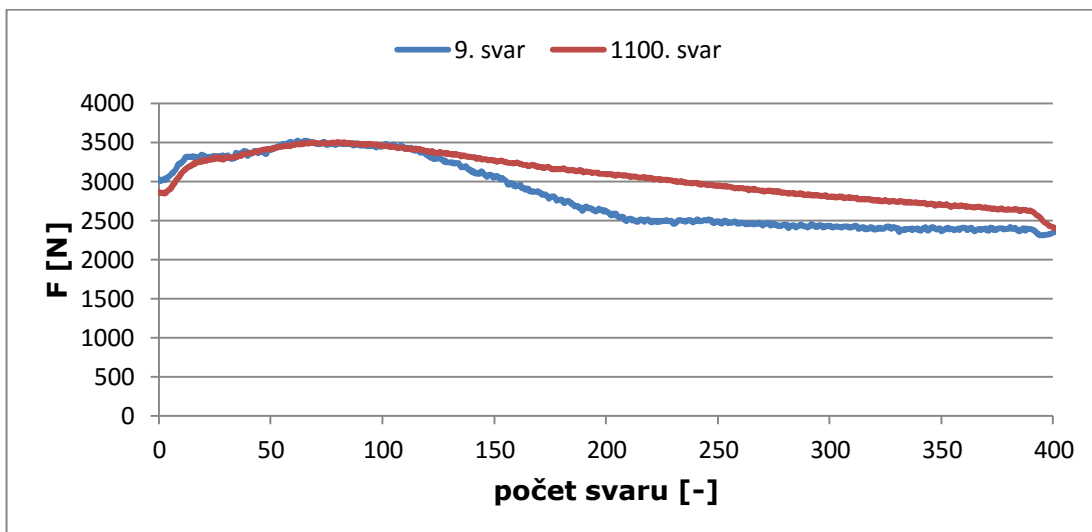
**Graf 14 - Závislost střední hodnoty průměru na počtu svarů**

Hodnoty maximální střížné síly se pohybují v rozmezí od 21 kN do 26 kN. Několik hodnot maximální střížné síly se nachází pod hranicí 20 kN. Hodnoty středního průměru, se pohybují v rozmezí od 4,3 mm do 8 mm. Tyto hodnoty nesmí klesnout u tří po sobě jdoucích svarů pod  $3,5\sqrt{t}$ . V experimentu je toto číslo 4,28 mm. Z tabulky v příloze 3 vyplývá, že tři hodnoty středního průměru po sobě jdoucích svarů neklesly pod tuto hodnotu. U obou grafů mají proložené křivky stoupající tendenci.

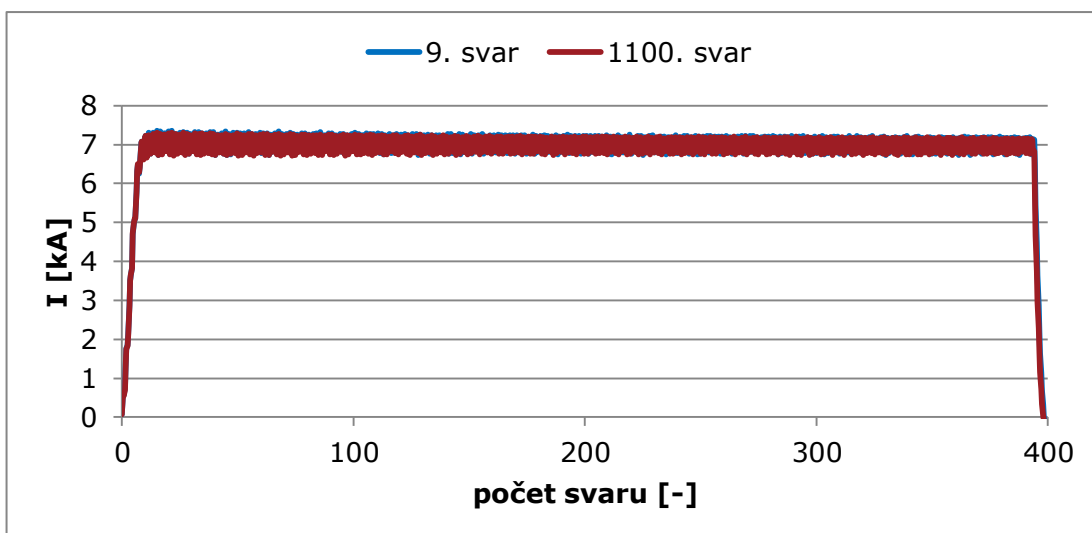
#### 10.4 Zhodnocení a shrnutí výsledků zkoušky

Z naměřených údajů přístrojem Miyachi MG3 Digital byly vytvořeny tři druhy grafů: F/t, I/t, U/t. Pro názornost rozdílů byly porovnány hodnoty z 9. a

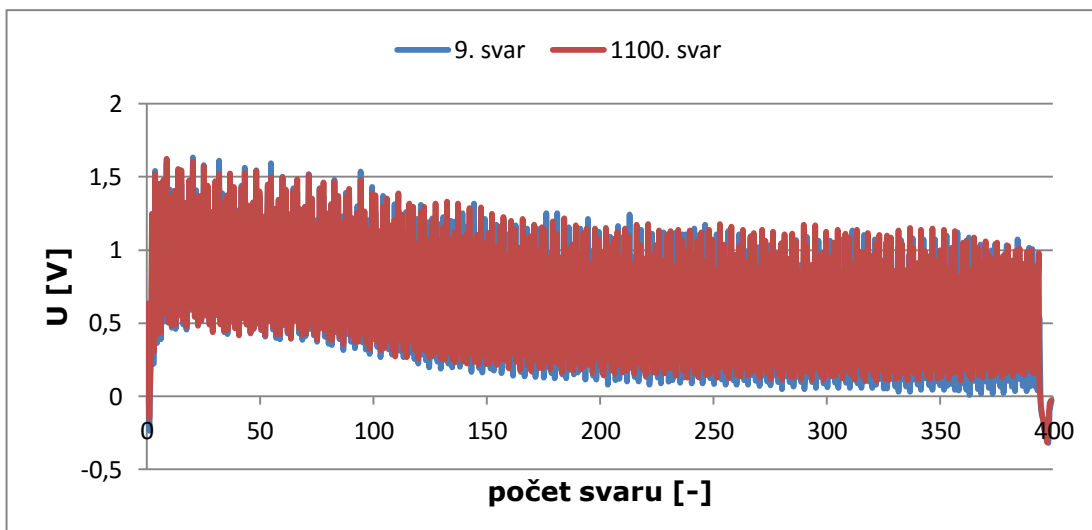
z 1100. svaru. Byl vybrán až 9. svar vzhledem ke stejným svařovacím parametrům s 1100. svarem. Jednotlivé grafy závislostí všech měřených svarů jsou v příloze 5.



**Graf 15 - Porovnání průběhu elektrodové síly na začátku a na konci experimentu**

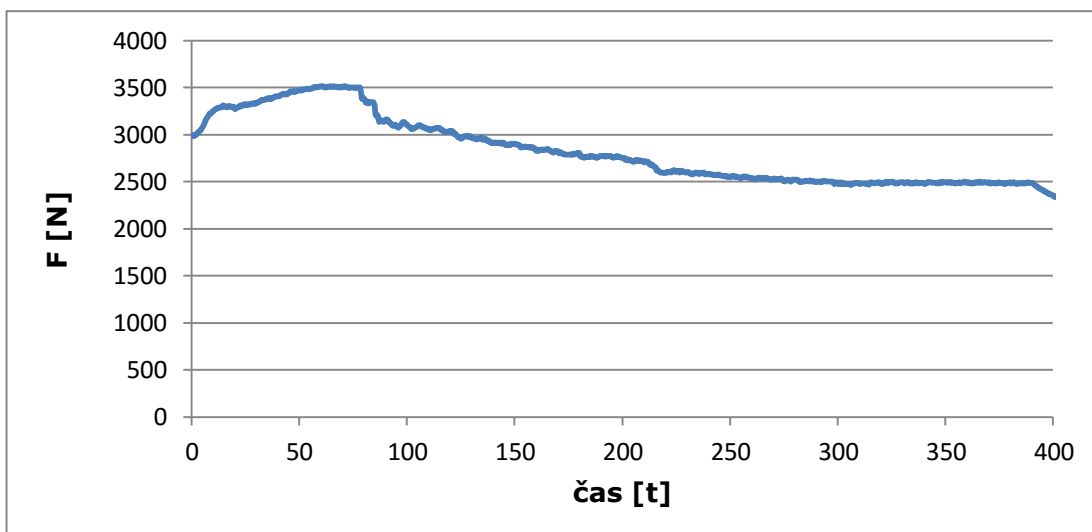


**Graf 16 - Porovnání průběhu proudu na začátku a na konci experimentu**

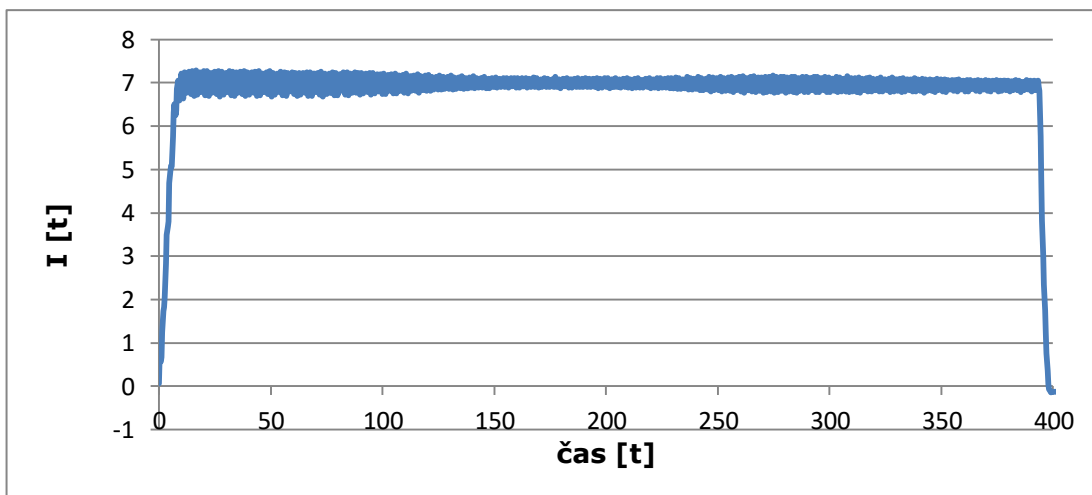


**Graf 17 - Porovnání průběhu napětí na začátku a na konci experimentu**

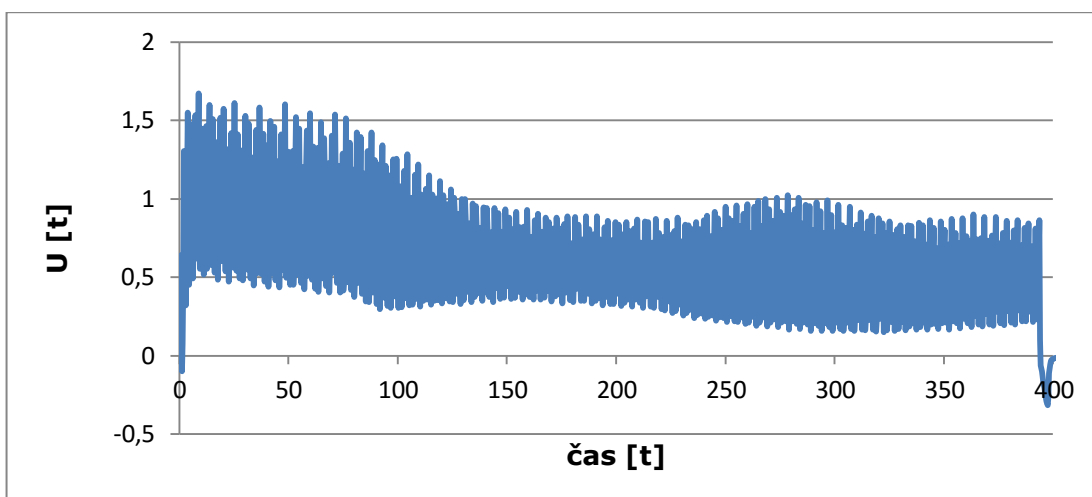
Vzhledem k nastavenému svařovacímu režimu IK, bylo počítáno s tím, že svařovací proud se nezmění. Křivka napětí 9. svaru je velmi podobná křivce 1100. svaru. Naopak svařovací síla s rostoucím počtem svarů rostla. Přesněji její maximální hodnota byla podobná, ale u prvních svarů bylo klesání přibližně od 120 do 220 ms prudké a poté byla hodnota svařovací síly zhruba konstantní. U posledních svarů experimentu byl nárůst síly podobný prvním svarům, ale od 120 ms klesala síla pozvolně přímkově až do 390 ms.



**Graf 18 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 196-200**



**Graf 19 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 196-200**



**Graf 20 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 196-200**

Graf 18 zobrazuje skokové poklesy svařovací síly. Tyto poklesy jsou dány rozstříkem (*obr. 26*). Na grafech 19 a 20 je možné zpozorovat od 120 do 230 ms zmenšený rozsah pulzujících hodnot. Porovnáním vzorků s viditelnými rozstříky a průběhů svařovacích parametrů těchto svarů, bylo zjištěno, že rozstřík má vliv na průběh svařovacích parametrů.



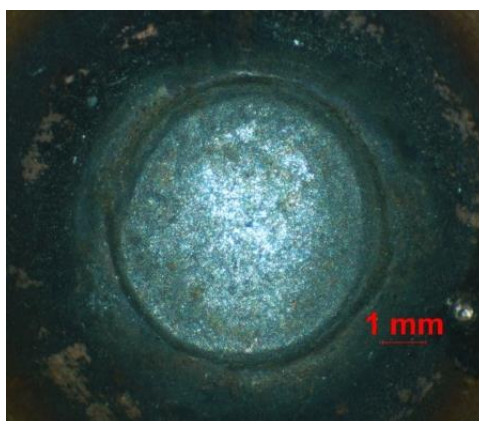
**Obr. 26 – Rozstřík 196. svaru**

Změna rozměrů elektrod vlivem opotřebení je uvedena v tabulce 11.

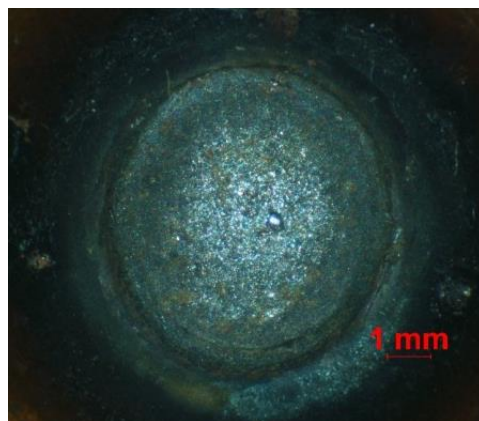
**Tab. 11 - Změny rozměrů elektrod vlivem opotřebení**

	Průměr pracovní plochy nově obrobene elektrody [mm]	Průměr pracovní plochy po 1101. svaru [mm]	Délka nově obrobene elektrody [mm]	Délka elektrody po 1101. svaru [mm]
<b>Dolní elektroda</b>	5	6,29	60,9	60,85
<b>Horní elektroda</b>	5	6,75	60,4	60,35

Snímky pracovních ploch elektrod po provedení 1101 svarů jsou na obrázcích 27 a 28.



**Obr. 27 – Snímek pracovní části dolní elektrody**

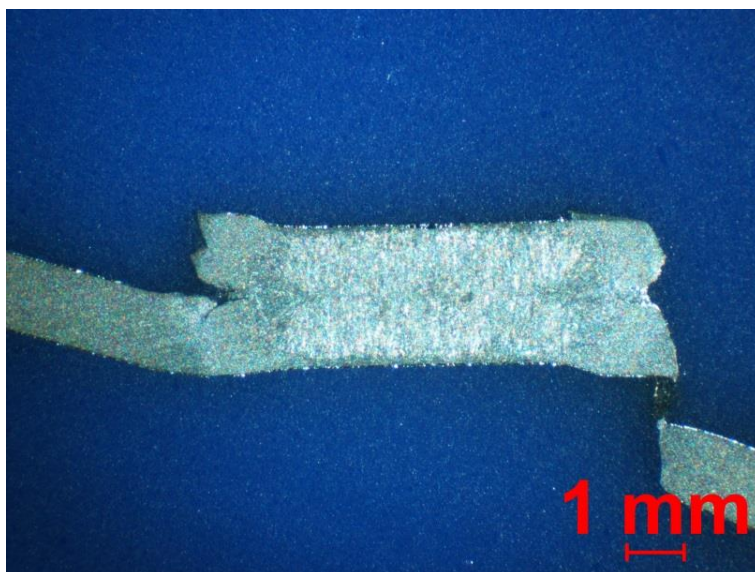


**Obr. 28 - Snímek pracovní části dolní elektrody**

Z grafu 13 vyplývá rostoucí únosnost svarů s počtem svařených spojů, proto byly pro doplnění a vysvětlení vytvořeny metalografické výbrusy svarů číslo 14 a 1100. Snímky makrostruktury těchto svarů jsou na obrázcích 29 a 30.



**Obr. 29 - Makrostruktura svaru číslo 14**



**Obr. 30 - Makrostruktura svaru číslo 1100**

## **11 Závěr**

Teoretická část shrnuje informace o odporovém svařování, zejména o bodovém odporovém svařování. Snahou bylo získat co nejvíce informací o kvalitě a hodnocení bodových svarů a problematice životnosti elektrod. Tyto údaje sloužily jako podklad pro samotnou experimentální část.

V experimentální části jsou popsány všechny přístroje, které byly použity pro vykonání experimentu. Podrobněji byl popsán materiál, z kterého byl vyroben plech pro zkušební vzorky, vzhledem k náročnosti výroby z hlediska technologie. V experimentu bylo hlavním cílem najít hodnotu počtu svarů, po kterých nebudou svary splňovat pevnostní kritéria. Nejprve bylo svařováno elektrodovými čepičkami chlazenými kapalným oxidem uhličitým. Svařování však muselo být ukončeno z důvodů vysokých teplot svařovacích čepiček. Nebylo možné dostatečně ochladit svařovací čepičky daným chladícím médiem. Z vyhodnocených vzorků nelze vyjádřit výsledek pro malý počet svarů. Svařování vodou chlazenými přímými elektrodami bylo provedeno až do 1101. svaru. Bylo ukončeno po sekáčovém zkoušení 1101. svaru, kdy po vizuální kontrole svaru bylo rozhodnuto o ukončení experimentu.

Po vyhodnocení statické zkoušky stříhem byly údaje překvapující a neobvyklé. S rostoucím počtem svarů rostla i hodnota středního průměru svarů a hodnota maximální střižné síly. Možností, jak zpřesnit a potvrdit výsledky realizovaného experimentu, by bylo hodnocení kvality svarů odlupovací zkouškou. Nicméně svařovaný plech má vysoké hodnoty mechanických vlastností, proto by bylo velmi obtížné plechy pro zkušební vzorky ohnout na tvar daný příslušnou normou po svaření vzorku. Vzorky by bylo nutné ohnout do předepsaného tvaru ještě před svařováním.

Bylo zjištěno, že svary u kterých se vytvořily rozstříky, mají křivku grafů průběhu svařovací síly se skokovými poklesy síly. Svary, které jsou bez rozstříků, mají křivku průběhu svařovací síly bez skokových poklesů.

Z metalografického rozboru svarů vyplývá, že svařovací parametry jsou naddimenzovány pro patřičný rozměr elektrody.

## Seznam použité literatury

- [1] PACÁK, Jiří. *Bodové odporové svařování vysokopevnostních plechů v automobilovém průmyslu*. Liberec, 2007. Diplomová práce. TUL-Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie
- [2] [https://de.wikipedia.org/wiki/Nikolai\\_Nikolajewitsch\\_Benardos](https://de.wikipedia.org/wiki/Nikolai_Nikolajewitsch_Benardos). [online]. 29.3.2016 [cit. 2016-03-29]
- [3] HOLÁSEK, Ján. *Odporové zvaranie*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1968. ISBN 63-030-68.
- [4] ČSN EN ISO 4063. *Svařovací a příbuzné procesy: přehled metod a jejich číslování*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [5] ČSN EN ISO 14270. *Rozměry vzorku a postup pro mechanizované odlupovací zkoušení odporových bodových, švových a výstupkových svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [6] ČSN EN ISO 14273. *Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [7] ČSN EN ISO 17653. *Odporové svařování: Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška krutem odporových bodových svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [8] ČSN EN ISO 12996. *Mechanické spojení: Destruktivní zkoušení spojů: Rozměry vzorku a postup zkoušek pro zkoušení kombinovaným namáháním tahem a stříhem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [9] CONTROLTEST. Metoda prozařováním. [online]. 2009 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.controltest.cz/metody-ndt/prozarovanim.php>
- [10] GAMMALUX NDT. Metody. [online]. 2013 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.gammalux.cz/metody.php>



- [11] ČSN EN ISO 14329. *Odporové svařování: Destruktivní zkoušky svarů: Typy porušení a geometrická měření odporových bodových, švových a výstupkových svarů*. Praha: Český normalizační úřad, 2004.
- [12] ČSN EN ISO 8166. *Odporové svařování: Způsob hodnocení životnosti bodových svařovacích elektrod při konstantním nastavení stroje*. Praha: Český normalizační institut, 2004
- [13] Schinkmann. *Odporové svařování, bodové svařování, švové svařování*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>
- [14] LUKAVSKÝ, Michal. *Odporové svařování pro automobilový průmysl*. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie.
- [15] VW TL 4225. *Legovaná zušlechťená ocel pro kalení do lisu – bez povrchové úpravy nebo s předběžnou povrchovou úpravou: Požadavky na materiál polotovarů a dílů*. Volkswagen akciová společnost, 2012.
- [16] VOTAVA, Pavel. *Odporové svařování martenzitických ocelí s variantním tepelným zpracováním*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie.
- [17] ČSN EN ISO 14323. *Odporové svařování a výstupkové svařování: Destruktivní zkoušky svarů: Rozměry vzorku a postup pro rázovou zkoušku stříhem a rázovou křížovou zkoušku tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015
- [18] FILIP, Zdeněk. *Analýza svařovacích parametrů u svařovacího stroje TECNA – TYP 6124 a chlazení elektrod*. Liberec, 2014. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie
- [19] Schinkmann. *Svařovací lisy, odporové svařování, svařování oceli, svařování hliníku*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/projekcni-lisy-trifazove-invertorove-1>

- [20] PLÍVA, Zdeněk. *Odporové svařování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1975. ISBN 04-219-75.
- [21] ČSN 05 0003. *Odporové zvaranie: Základné pojmy*. Praha: Vydavateľství norem, 1991.
- [22] KUNCIPÁL, Josef a kol. *Teorie svařování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1986.
- [23] HLAVATÝ, I. *Rozdělení metod tlakového odporového svařování. Teorie a technologie svařování* [online]. 2009 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/10-21.pdf>
- [24] NEUMANN, Heinz. *Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technických procesů: Etapa 3 „Ověření výsledků v provozních podmínkách“*. Liberec, 2015.
- [25] ČSN EN ISO 15609-5. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů: Stanovení postupu svařování: Část 5: Odporové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [26] ČSN EN ISO 14373. *Odporové svařování: Postup pro bodové svařování nepovlakovaných a povlakovaných nízkouhlikových ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [27] ČSN EN ISO 14271. *Odporové svařování: Zkoušení tvrdosti podle Vickerse (nízká síla a mikrotvrdost) odporových bodových, výstupkových a švových svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [28] ČSN EN ISO 17635. *Nedestruktivní zkoušení svarů: Všeobecná pravidla pro kovové materiály*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [29] ČSN EN ISO 25184. *Přímé elektrody pro odporové bodové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 1997.

[30] ČSN EN ISO 5821. *Odporové svařování: Elektrodové čepičky pro bodové odporové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[31] NEUMANN, Heinz a Jiří PACÁK. Chlazení elektrodových čepiček u odporového bodového svařování kapalným oxidem uhličitým jako prostředek pro zvýšení jejich životnosti. *Zváranie – Svařování*. 2015, roč. 64, č. 11-12, s. 255-259. ISSN 0044-5525.

[32] ČSN EN ISO 14610. *Svařování a příbuzné procesy: Definice metod svařování kovů*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

[33] JANOTA, Martin. *Procesy a riadenie odporového zvarania*. Bratislava: Výskumný ústav zvaračský, 1985. 323 s.

# Seznam příloh

Příloha č. 1: Přehled metod a číslování

Příloha č. 2: Naměřené průměry a maximální střížné síly pro jednotlivé svary

Příloha č. 3: Naměřené průměry a maximální střížné síly pro jednotlivé svary

Příloha č. 4: Průběhy jednotlivých svařovacích parametrů pro příslušné vzorky svařované elektrodovými čepičkami

Příloha č. 5: Průběhy jednotlivých svařovacích parametrů pro příslušné vzorky svařované elektrodami

**Příloha č. 1**

**Tab. 12 - Přehled metod a číslování [4]**

<b>Číslo metody</b>	<b>Česky</b>	<b>Anglicky</b>
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 překlátováním	Lap seam welding
222	Švové svařování s rozválcováním	Mash seam welding
225	Stykové švové svařování s páskem	Foil butt-seam welding
226	Překlátované 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	Flash welding with preheating
242	Odtavovací stykové svařování bez	Flash welding without
25	Stlačovací stykové svařování	Resistance butt welding
29	Ostatní způsoby odporového svařování	Otheir resistance welding
291	Vysokofrekvenční odporové svařování	HF resistance welding

**Příloha č. 2**

**Tab. 13 - Naměřené průměry a maximální střížné síly pro jednotlivé svary svařované elektrodovou čepičkou**

<b>Číslo svaru</b>	<b>d<sub>1</sub> [mm]</b>	<b>d<sub>2</sub> [mm]</b>	<b>d<sub>p</sub> [mm]</b>	<b>F<sub>s</sub> [N]</b>
6	4,14	5,22	4,68	20000
7	5,46	5,57	5,52	24505
8	6,29	6,68	6,48	24430
9	5,59	5,54	5,57	24520
10	5,72	4,86	5,29	24604
11	5,11	5,36	5,23	24295
12	4,38	4,57	4,47	22673
13	5,94	6,49	6,22	24143
14	6,82	5,80	6,31	25585
15	nezměřeno	nezměřeno		23043

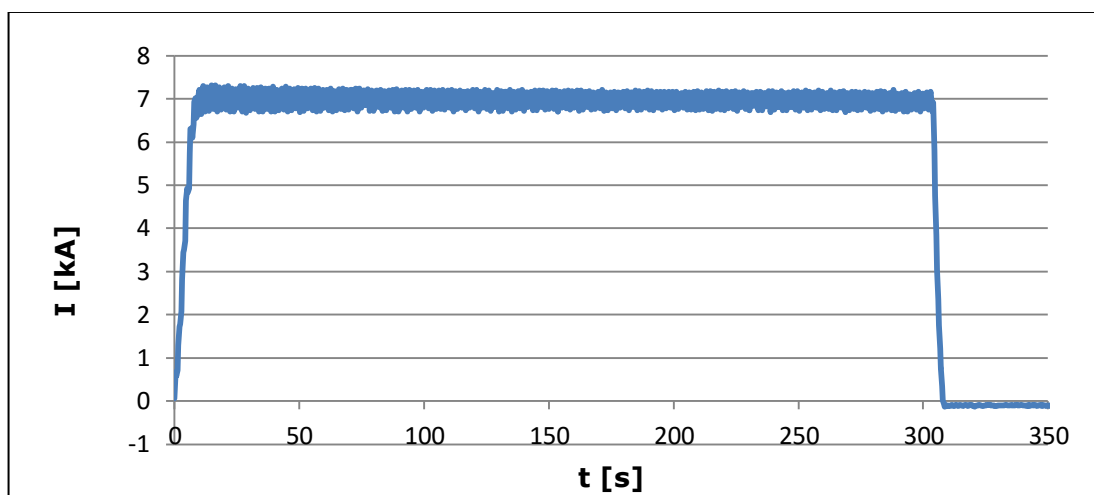
Příloha č. 3

**Tab. 14 - Naměřené průměry a maximální střížné síly pro jednotlivé svary svařované elektrodou**

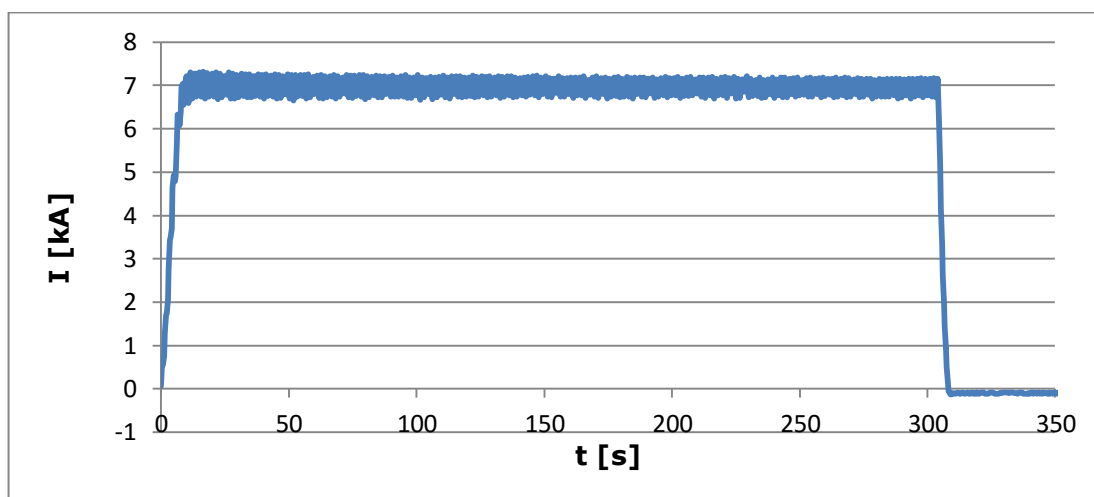
Číslo svaru	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>p</sub> [mm]	F <sub>s</sub> [mm]
6	5,97	7,34	6,66	22894
7	4,43	5,39	4,91	18187
8	5,47	5,95	5,71	23971
9	5,68	6,49	6,09	24332
10	5,14	5,08	5,11	22525
11	5,19	5,13	5,16	14822
12	5,64	5,52	5,58	22269
13	5,90	7,14	6,52	23280
14	4,99	5,40	5,20	24067
15	5,30	5,27	5,29	24555
47	5,10	5,25	5,17	23391
48	5,87	6,25	6,06	24100
49	4,89	5,50	5,19	16505
50	6,19	5,91	6,05	22730
51	5,44	5,32	5,38	24027
96	4,61	5,82	5,22	17571
97	5,01	5,82	5,42	24262
98	5,53	6,56	6,05	24085
99	5,46	5,46	5,46	23402
100	5,44	6,33	5,88	23985
196	nezměřeno	nezměřeno		21632
197	7,76	7,44	7,60	24391
198	4,39	4,82	4,60	22889
199	7,50	7,89	7,70	24998
200	5,07	5,22	5,15	24392
296	4,30	5,18	4,74	14522
297	5,62	7,27	6,45	25260
298	5,04	7,03	6,04	23323
299	7,10	8,45	7,77	23056
300	4,84	6,25	5,54	22263
396	7,81	6,95	7,38	25261
397	4,61	6,39	5,50	24744
398	4,96	6,40	5,68	24300
399	5,80	6,99	6,40	23518
400	7,53	6,85	7,19	24103
496	7,39	5,04	6,22	24639

497	4,68	5,36	5,02	16180
498	7,06	5,36	6,21	25255
499	5,25	5,18	5,21	25546
500	4,38	5,21	4,80	17513
696	7,77	8,21	7,99	24826
697	7,58	8,34	7,96	24039
698	7,37	8,40	7,88	24726
699	7,76	8,11	7,93	24394
700	7,26	8,21	7,73	25040
896	4,07	5,76	4,92	21200
897	6,85	8,29	7,57	25183
898	6,76	6,80	6,78	25926
899	7,09	7,90	7,50	25171
900	6,71	6,03	6,37	25008
1096	6,66	5,65	6,15	24787
1097	4,95	6,61	5,78	24276
1098	7,35	7,73	7,54	25379
1099	7,11	7,09	7,10	22966
1100	7,82	8,01	7,91	24951

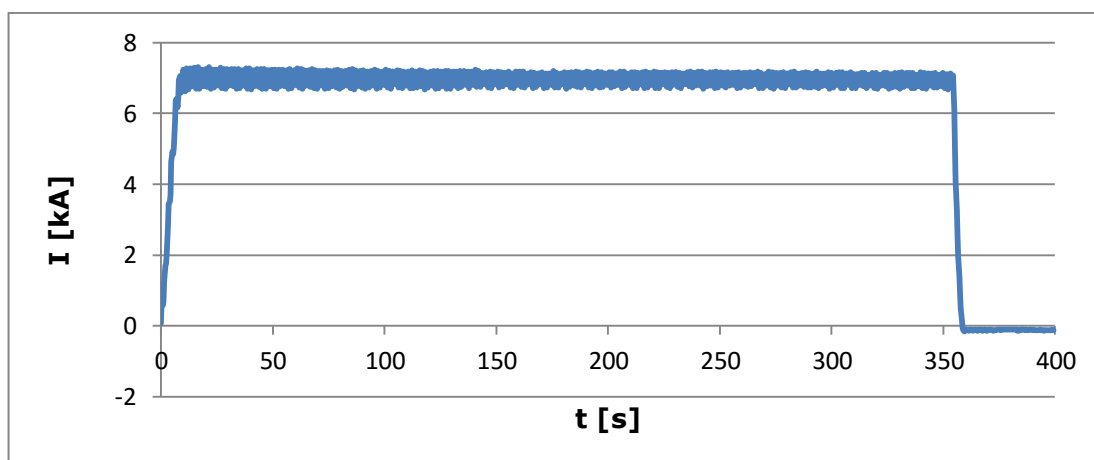
#### Příloha č. 4



**Graf 21 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 2**

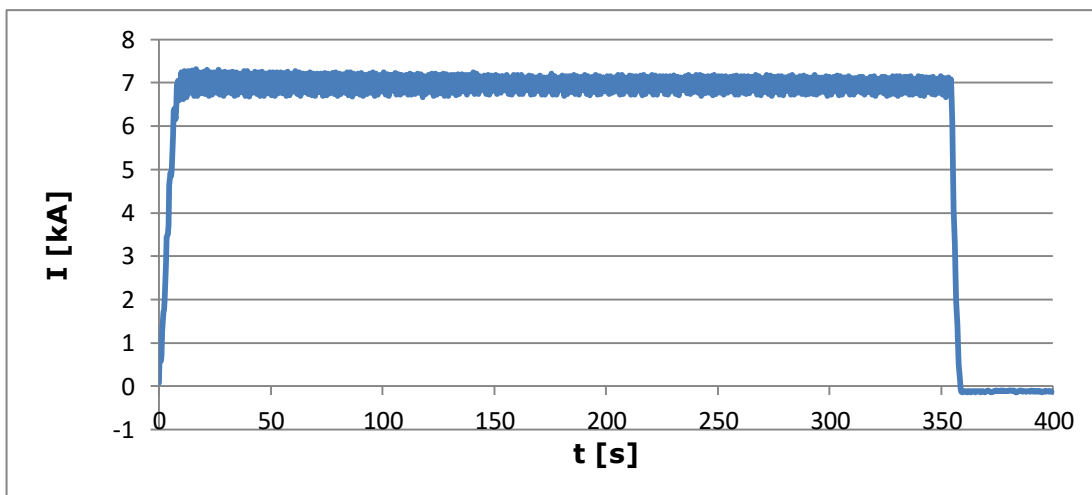


**Graf 22 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 3**

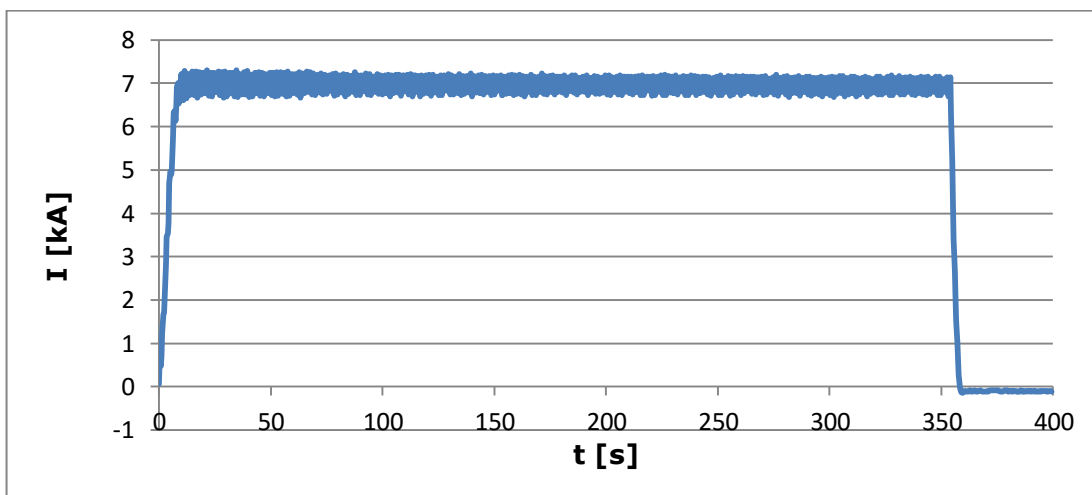


**Graf 23 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 4**

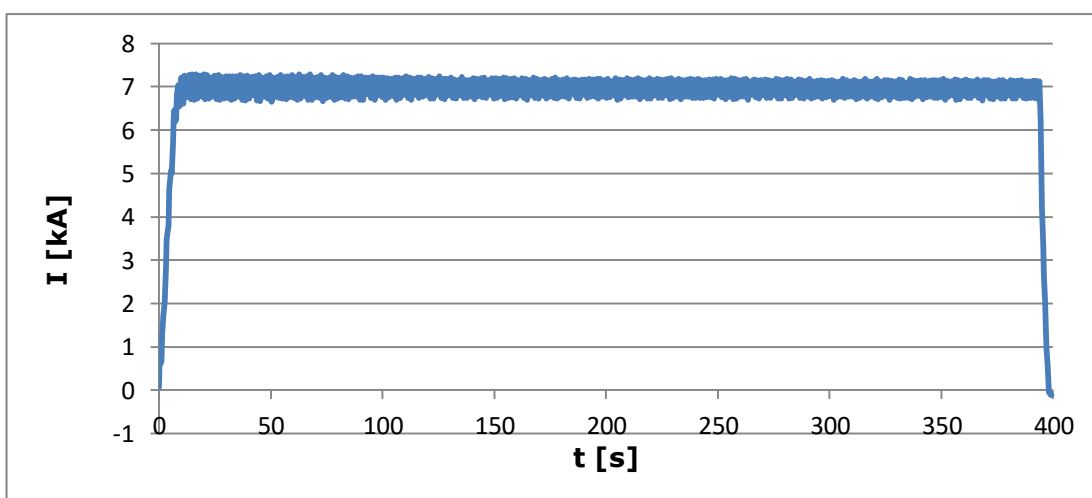




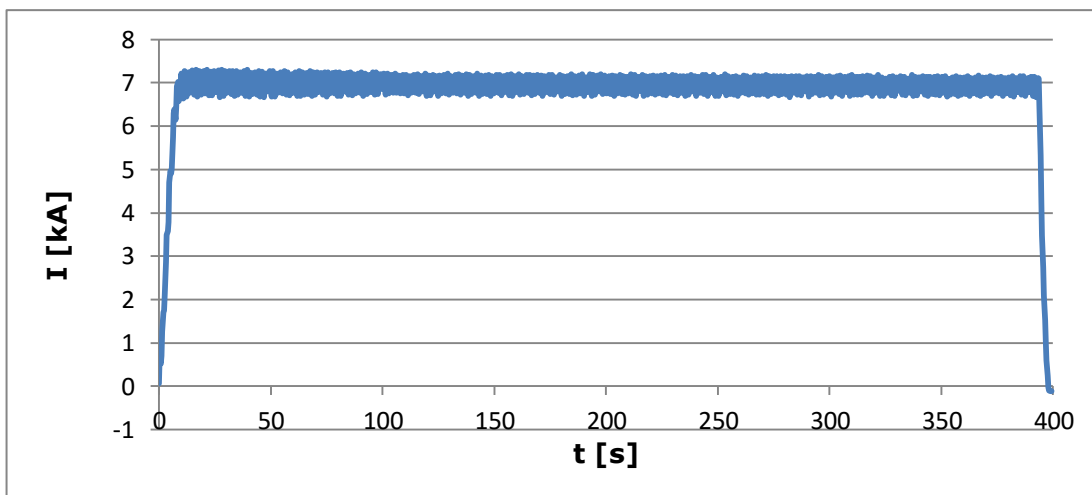
**Graf 24 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 5**



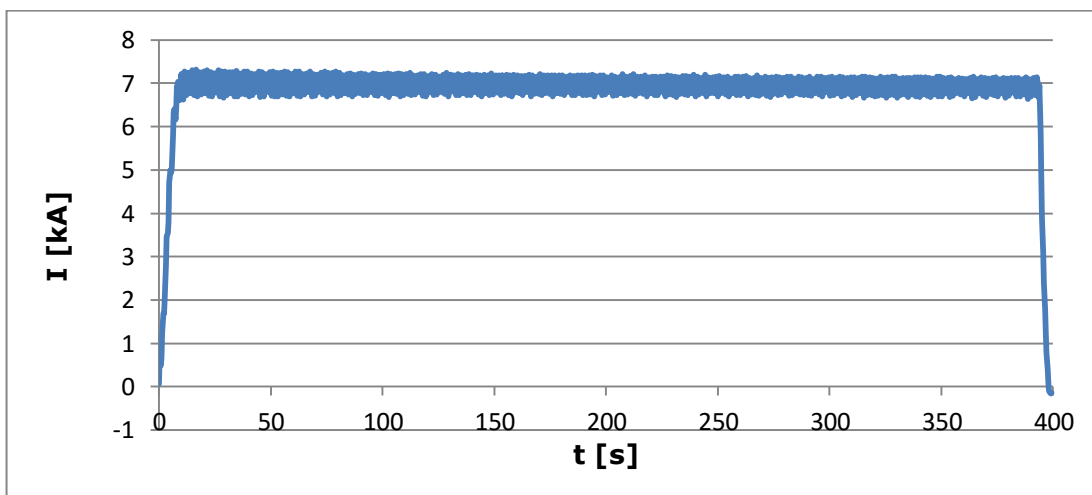
**Graf 25 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 6**



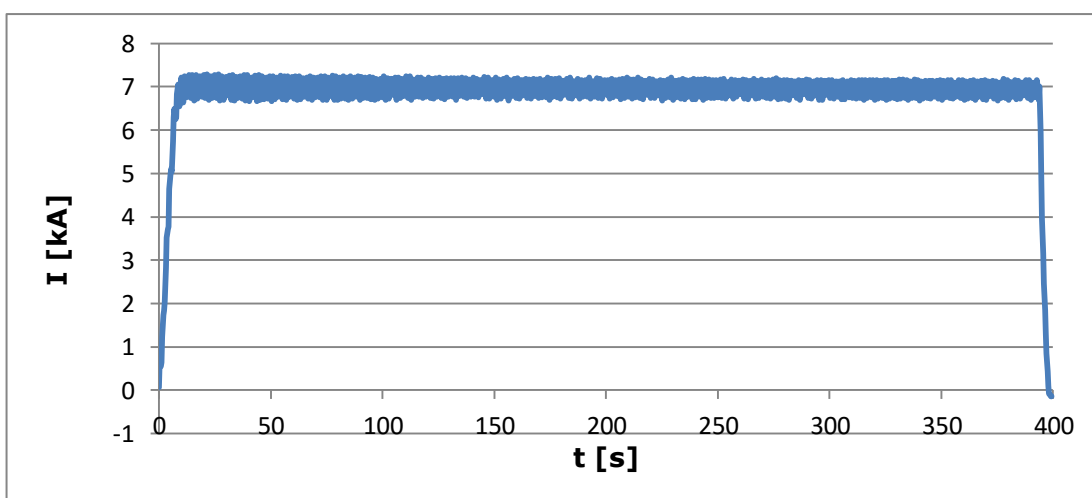
**Graf 26 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 7**



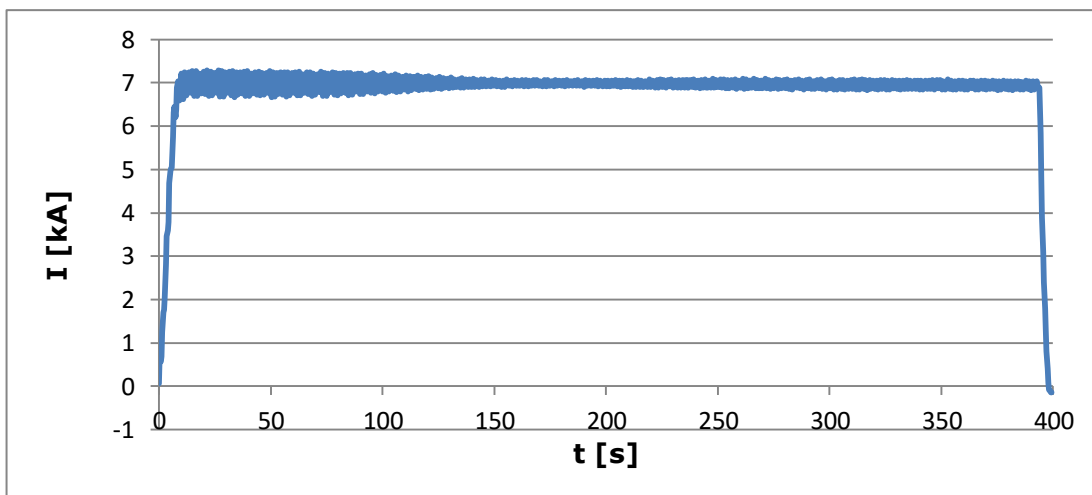
**Graf 27 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 8**



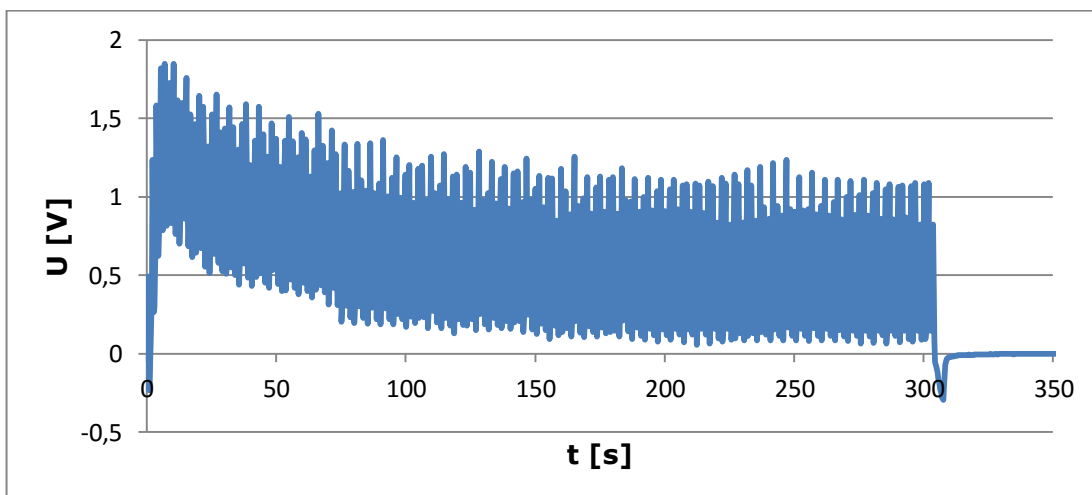
**Graf 28 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 9**



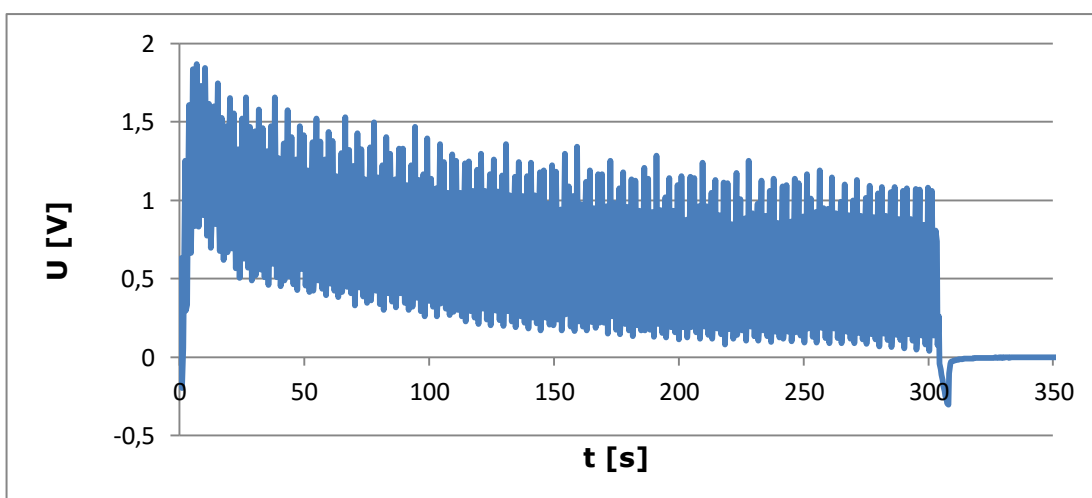
**Graf 29 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 10**



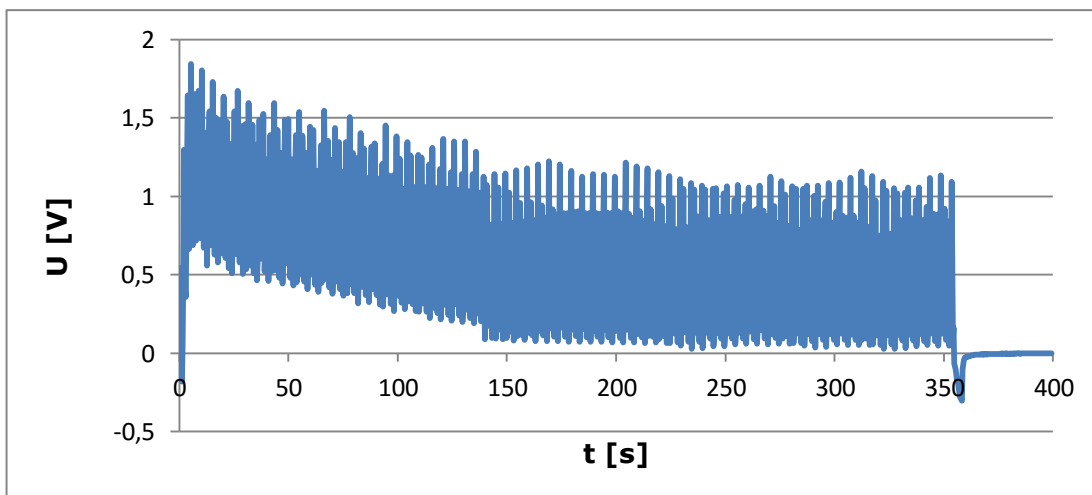
**Graf 30 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 11-15**



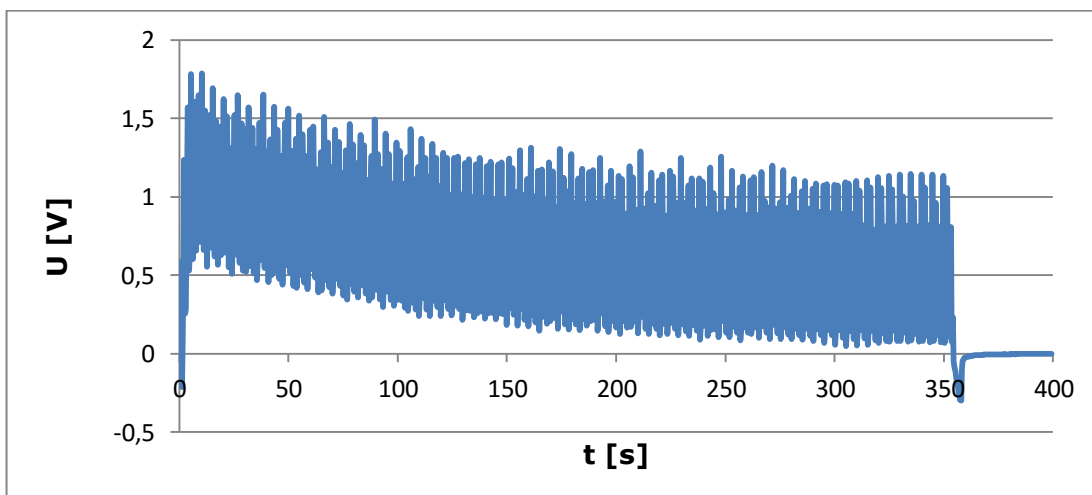
**Graf 31 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 2**



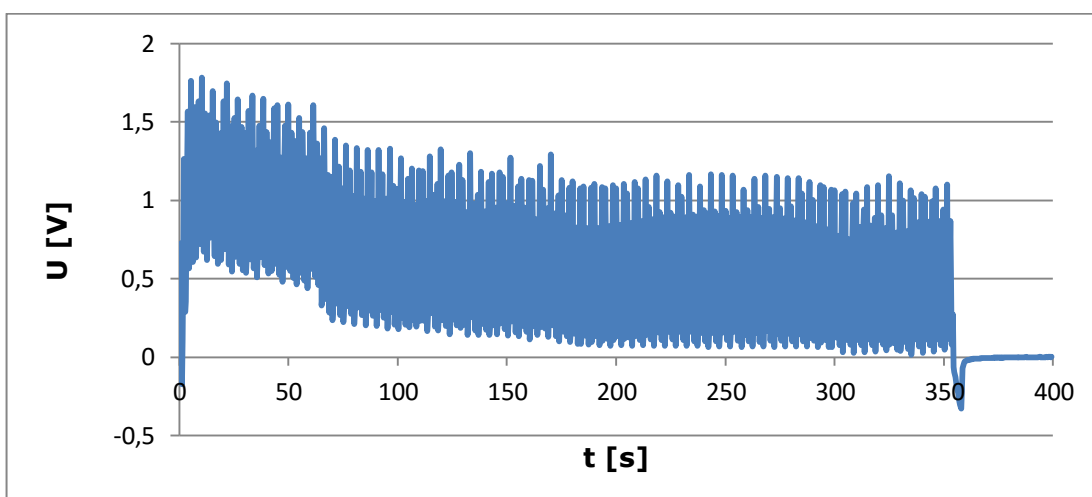
**Graf 32 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 3**



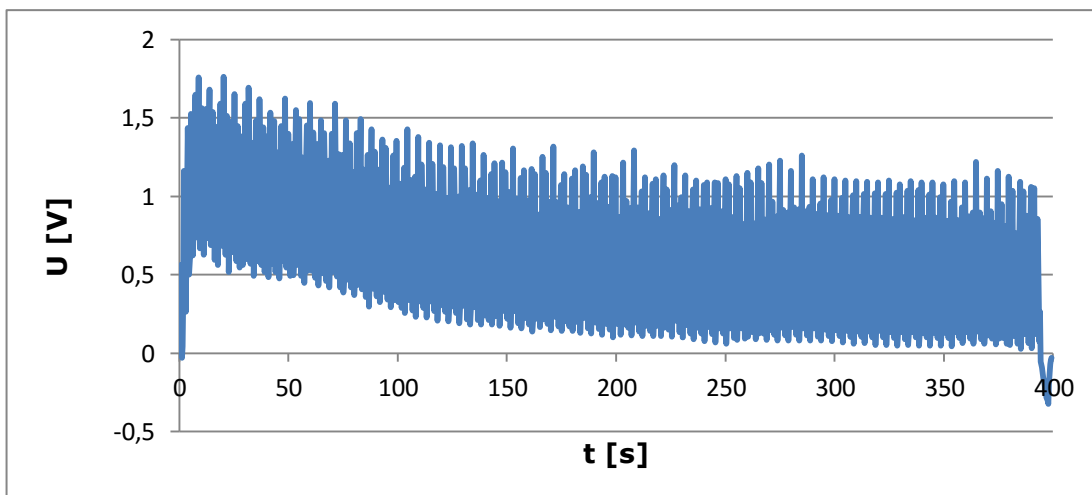
**Graf 33 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 4**



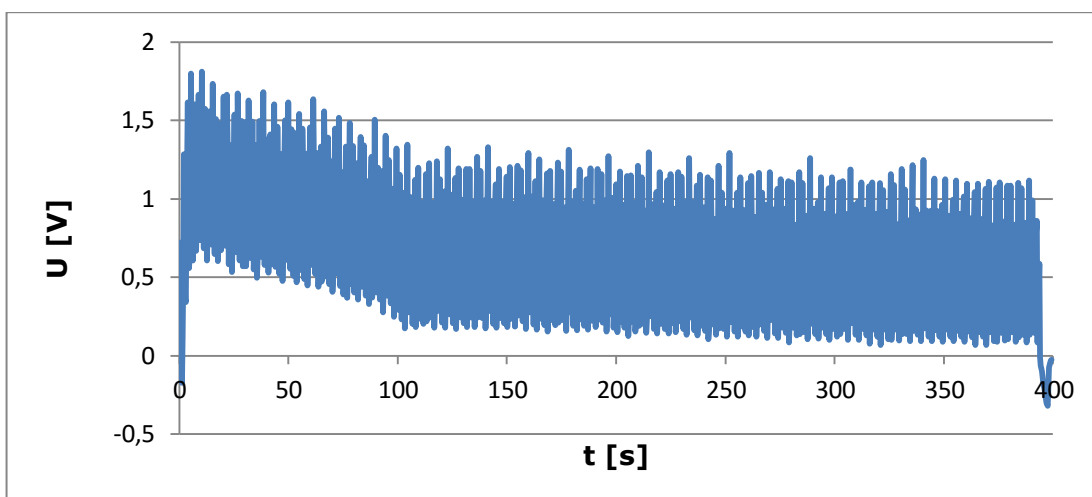
**Graf 34 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 5**



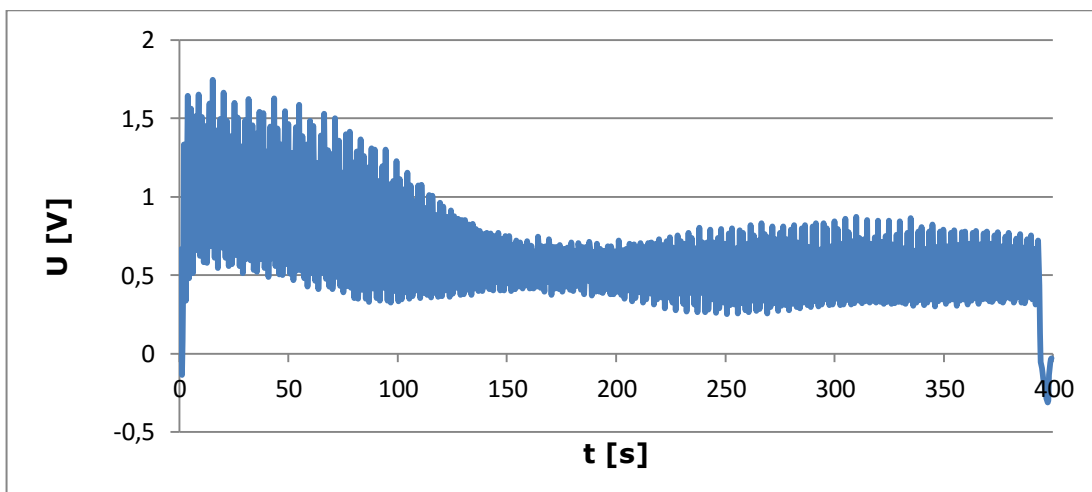
**Graf 35 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 6**



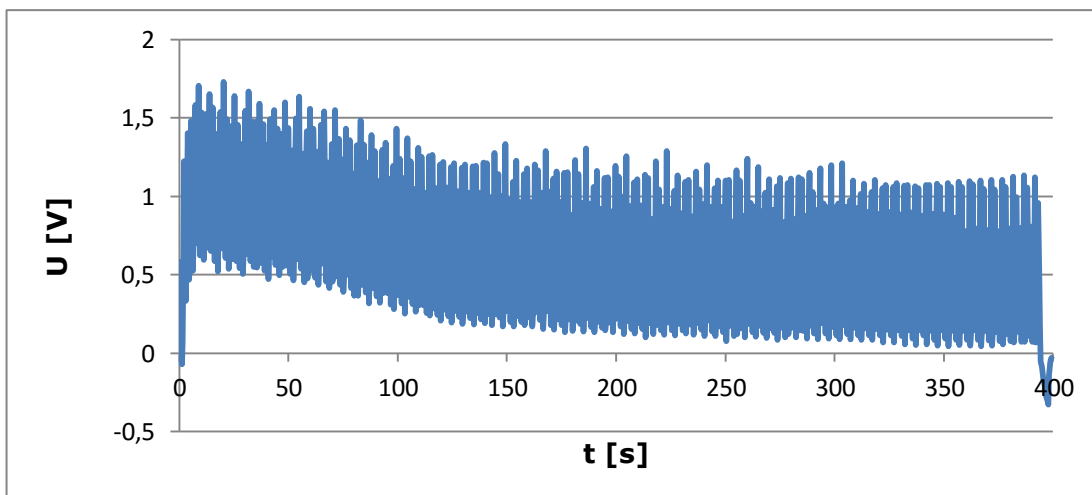
**Graf 36 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 7**



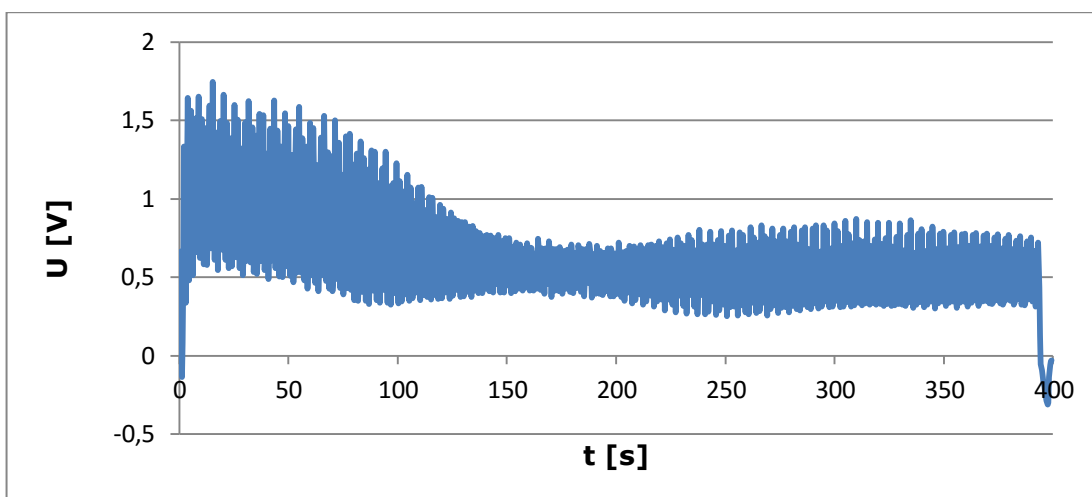
**Graf 37 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 8**



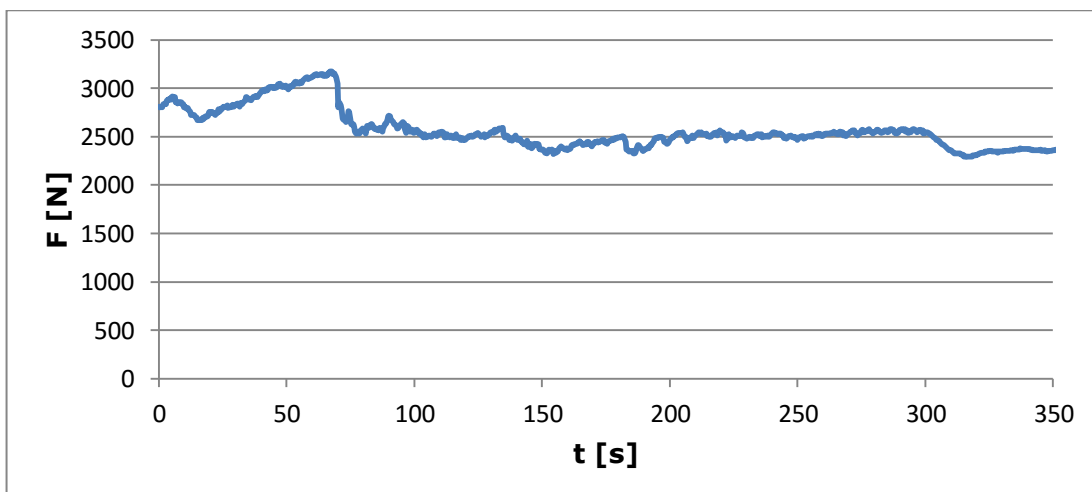
**Graf 38 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 9**



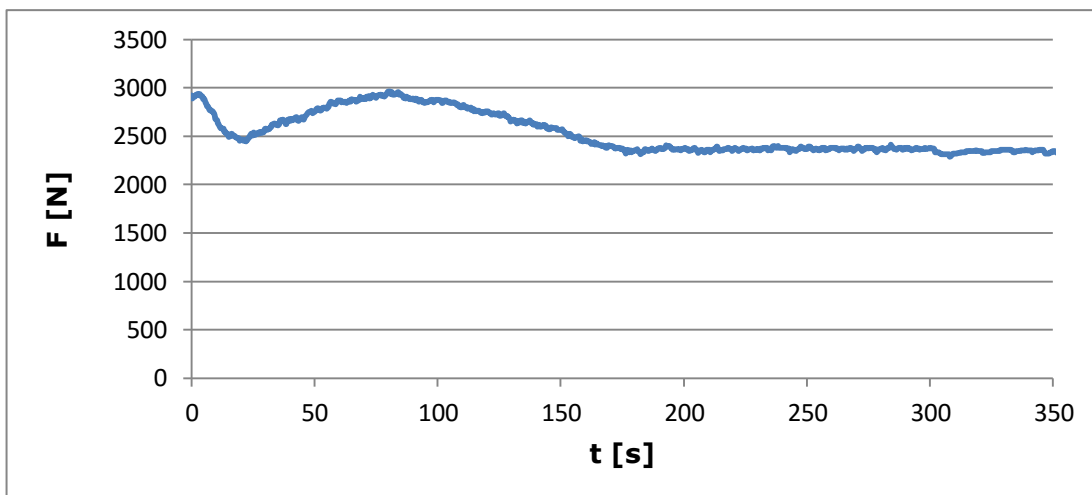
**Graf 39 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 10**



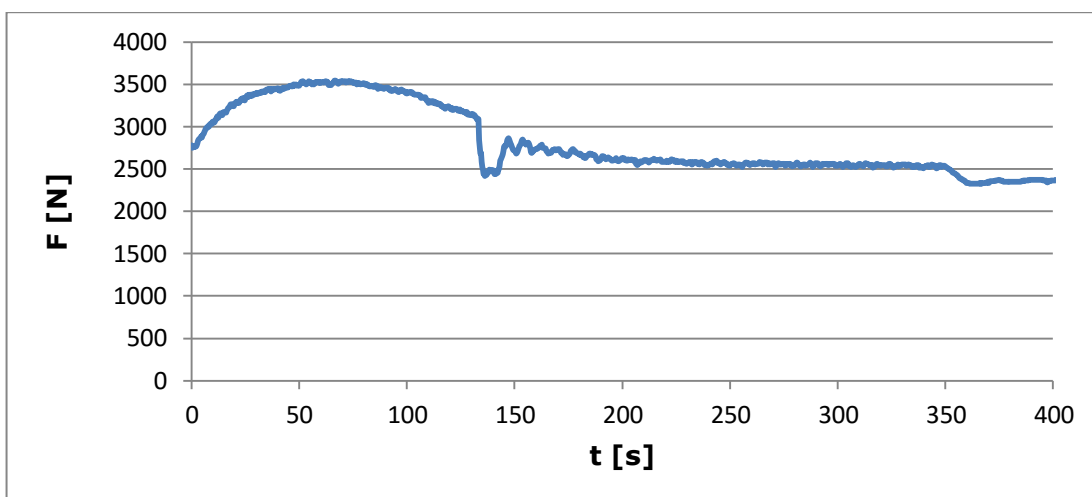
**Graf 40 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 11-15**



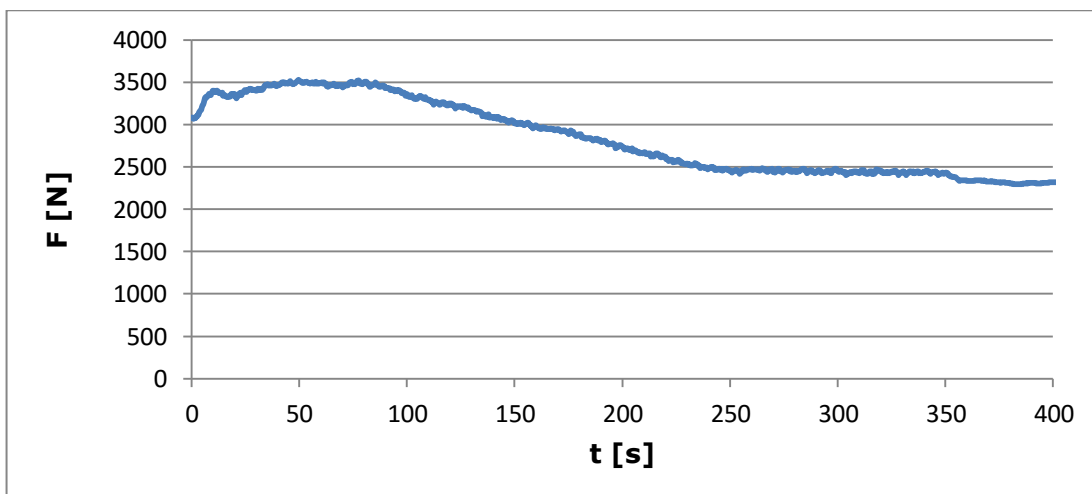
**Graf 41 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorek č. 2**



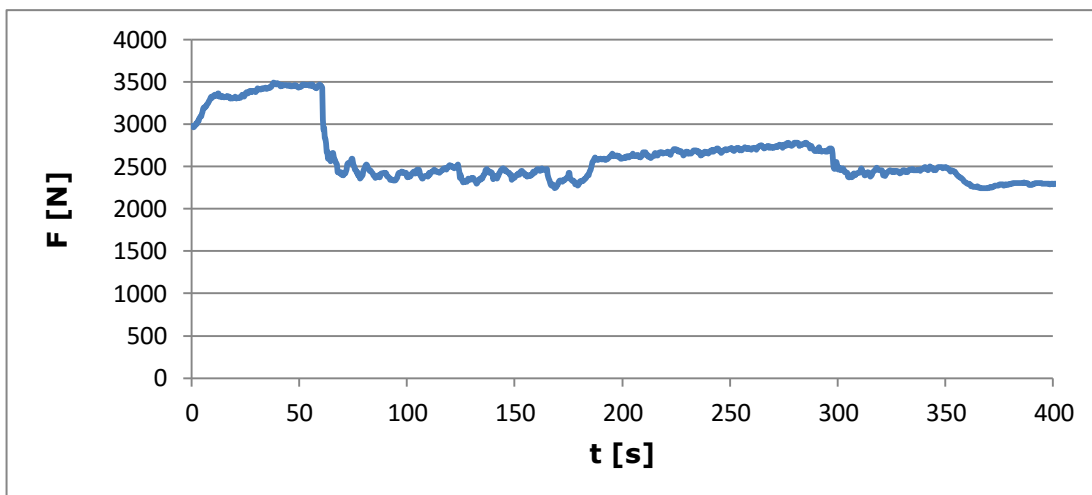
**Graf 42 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorek č. 3**



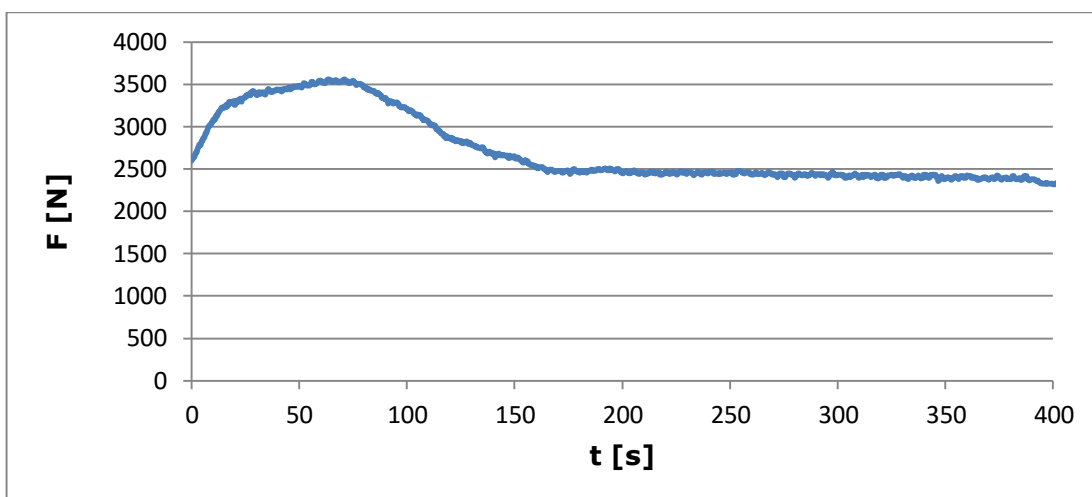
**Graf 43 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorek č. 4**



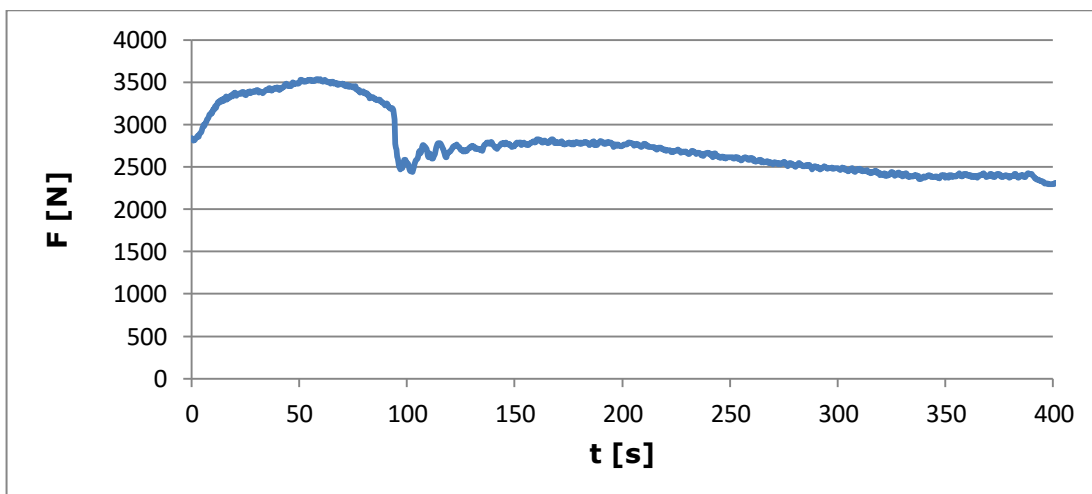
**Graf 44 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorek č. 5**



**Graf 45 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorek č. 6**

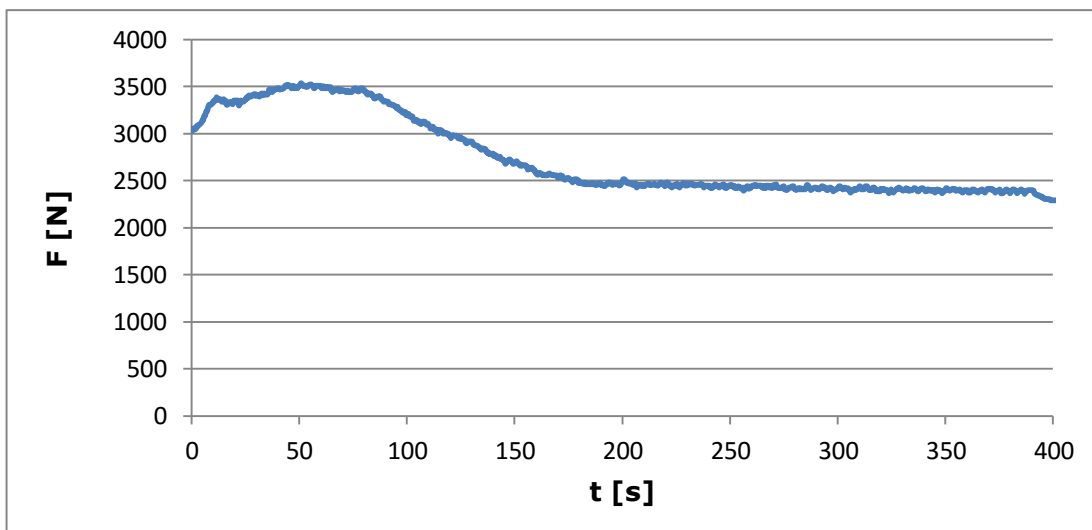


**Graf 46 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorek č. 7**

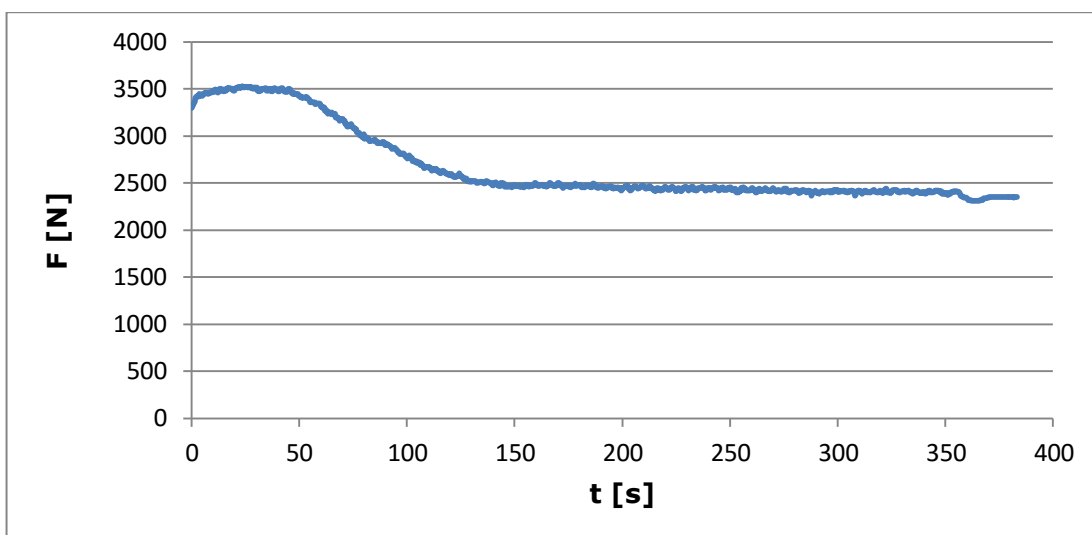


**Graf 47 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorek č. 8**

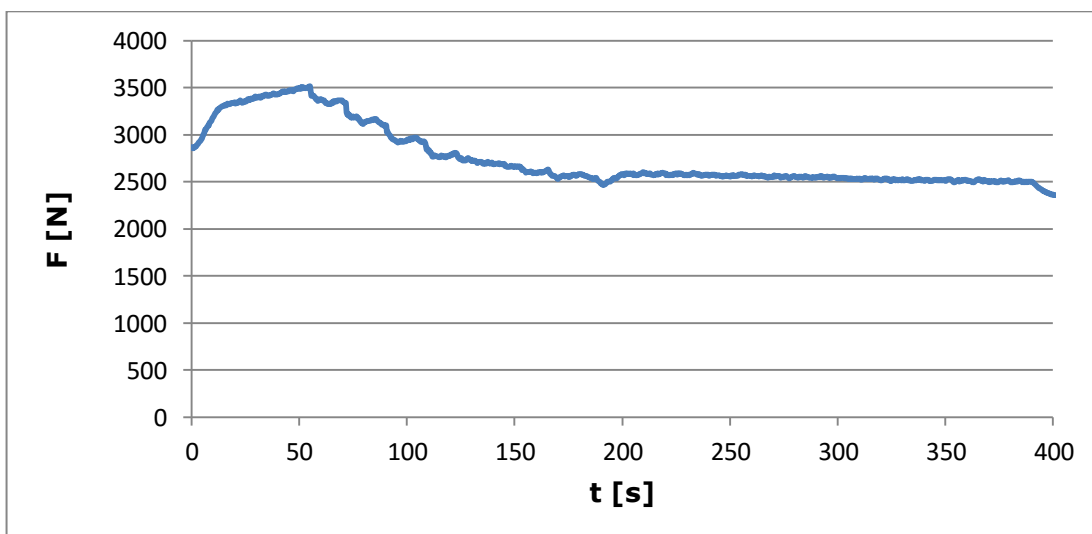




**Graf 48 - Průběh elektrostatické síly v závislosti na čase pro vzorek č. 9**

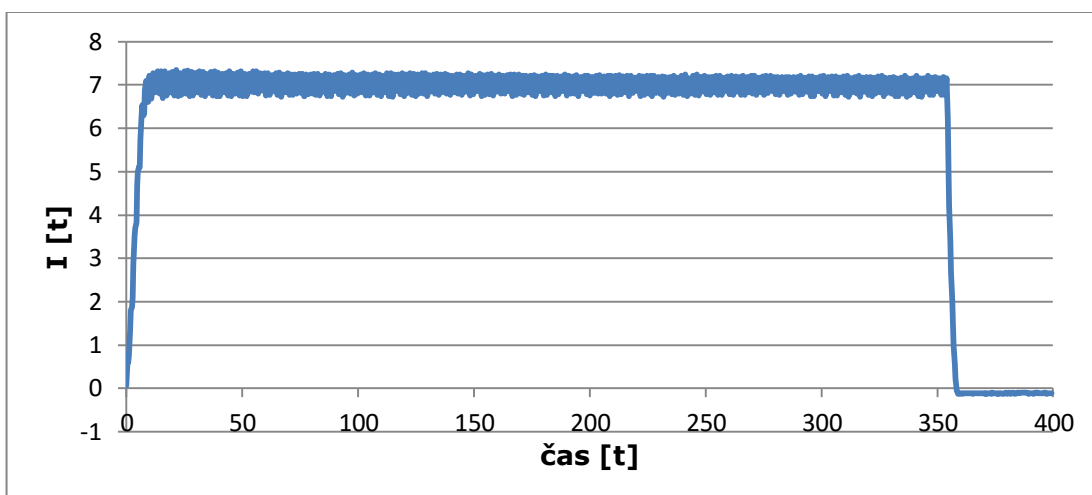


**Graf 49 - Průběh elektrostatické síly v závislosti na čase pro vzorek č. 10**

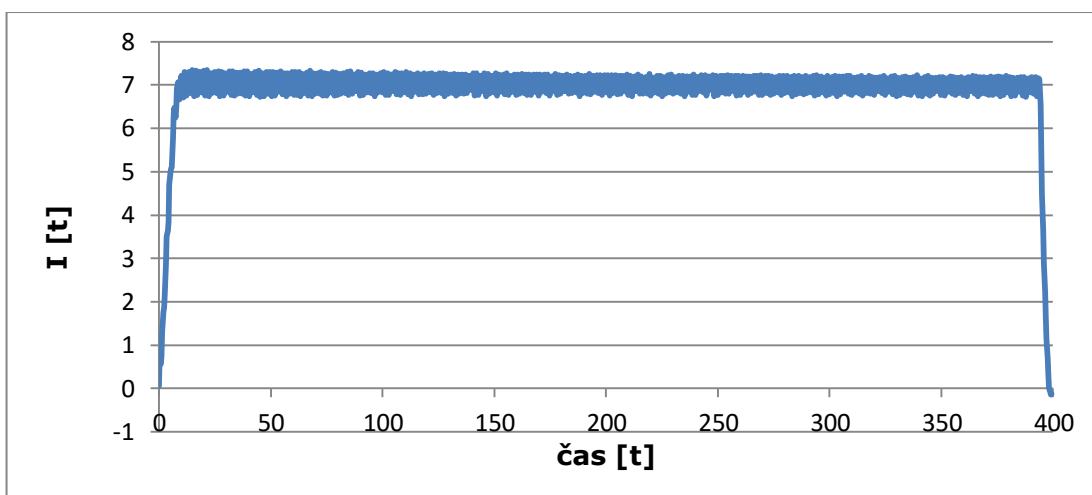


**Graf 50 - Průběh elektrostatické síly v závislosti na čase pro vzorky č. 11-15**

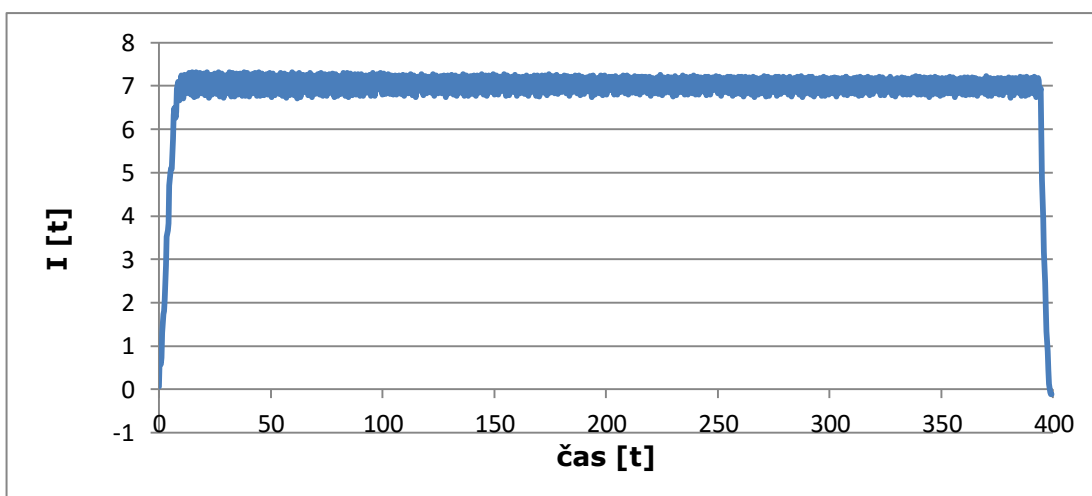
## Příloha č. 5



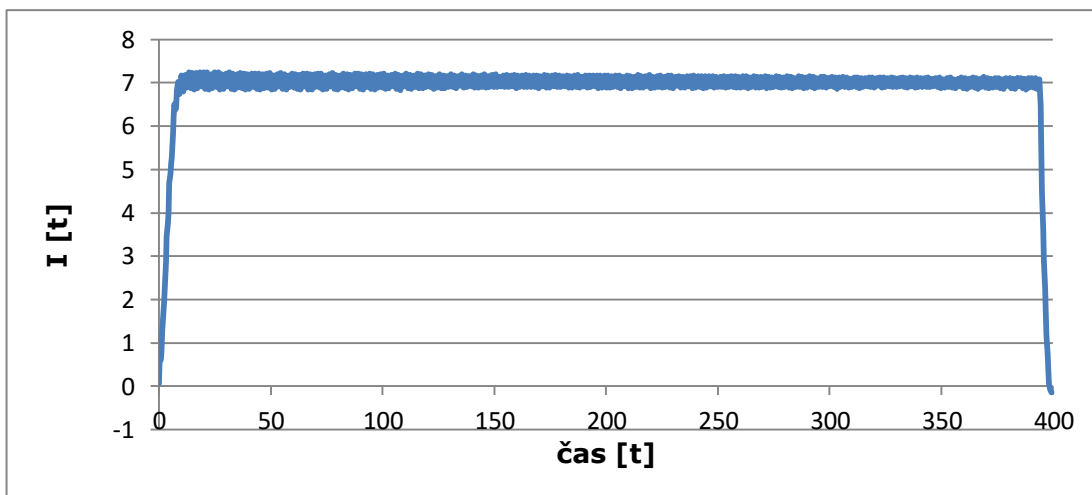
**Graf 51 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 8**



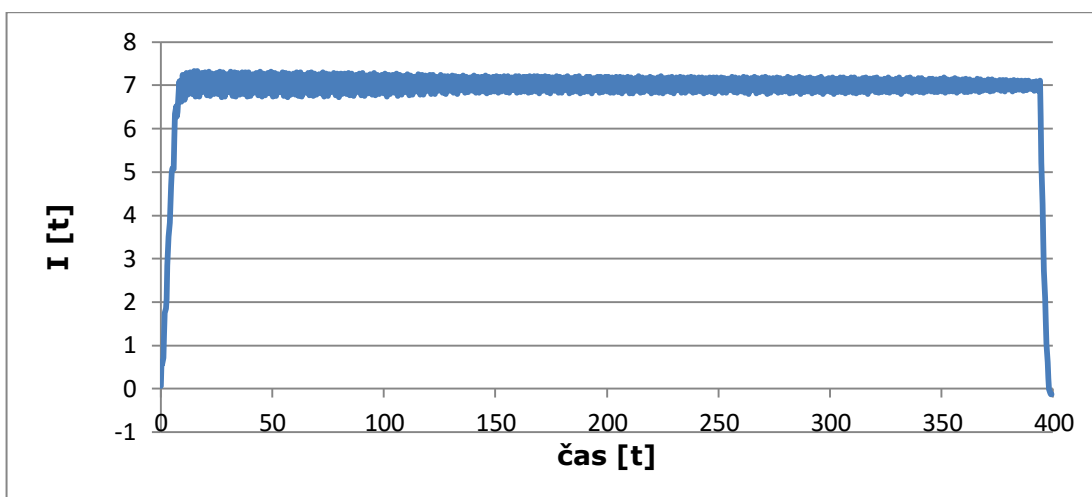
**Graf 52 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 9**



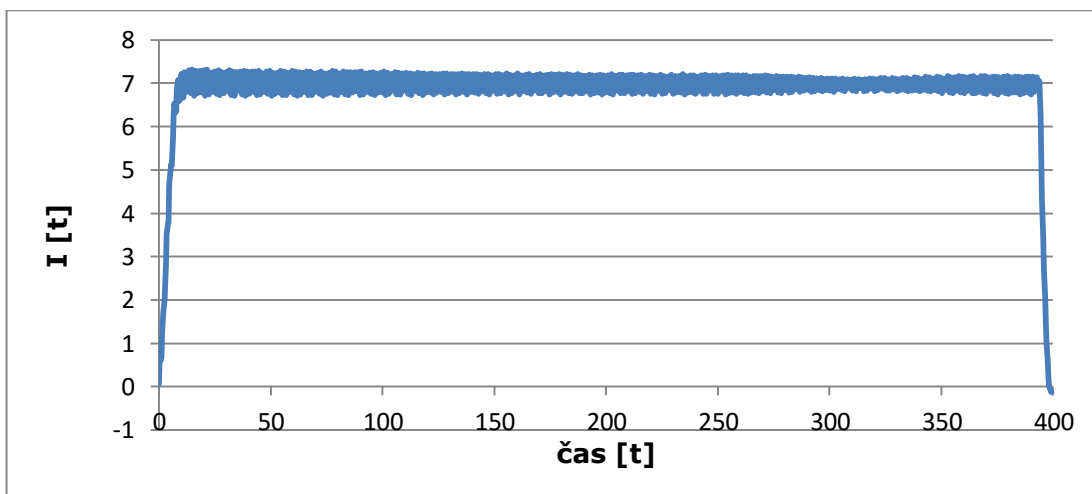
**Graf 53 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorek č. 10**



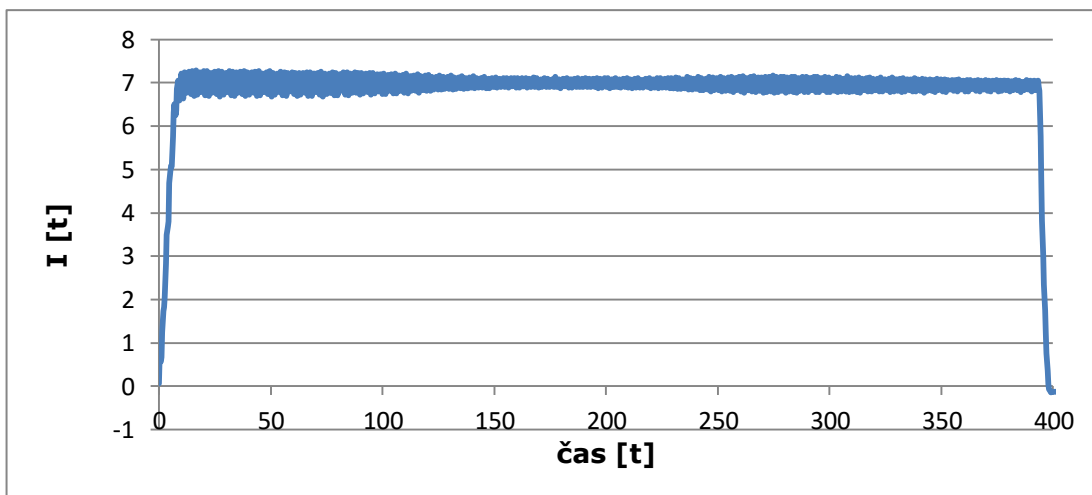
**Graf 54 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 11-15**



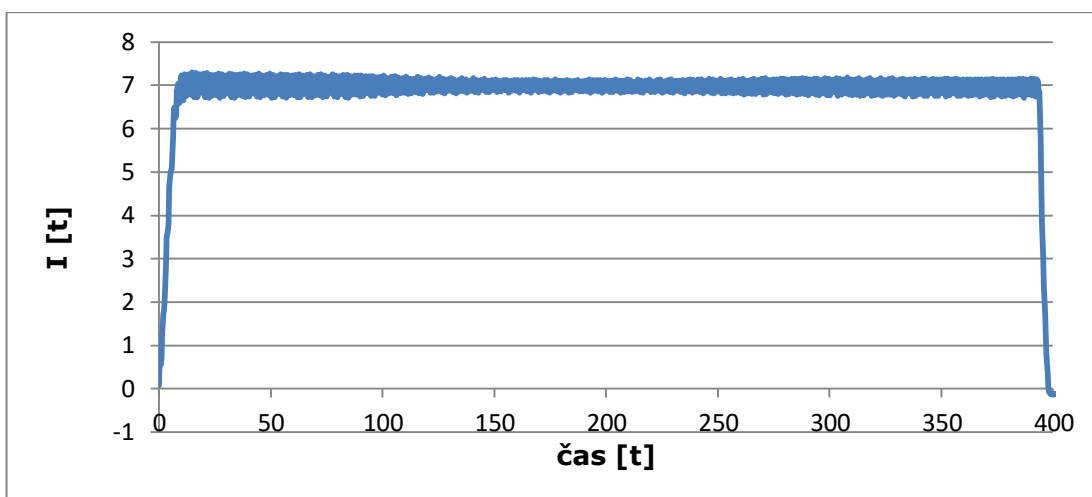
**Graf 55 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 47-51**



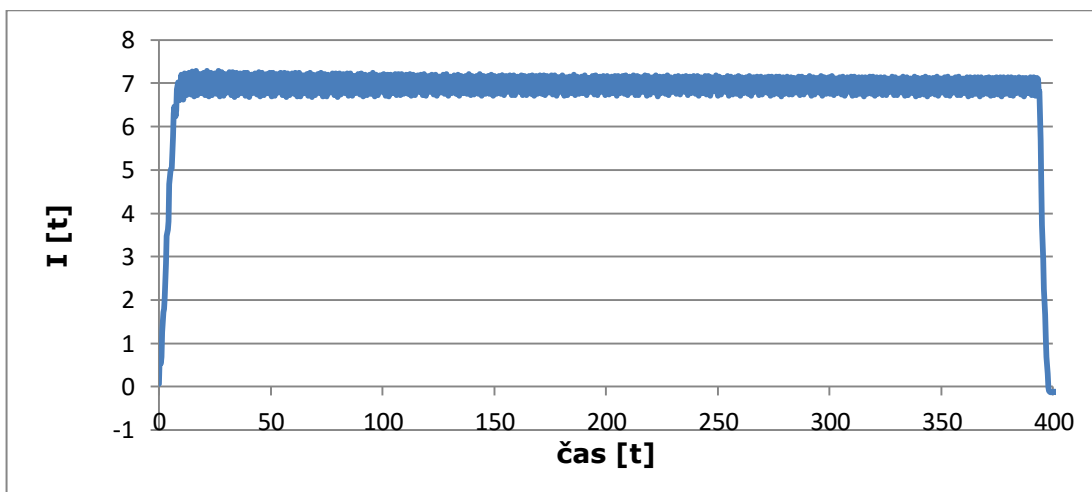
**Graf 56 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 96-100**



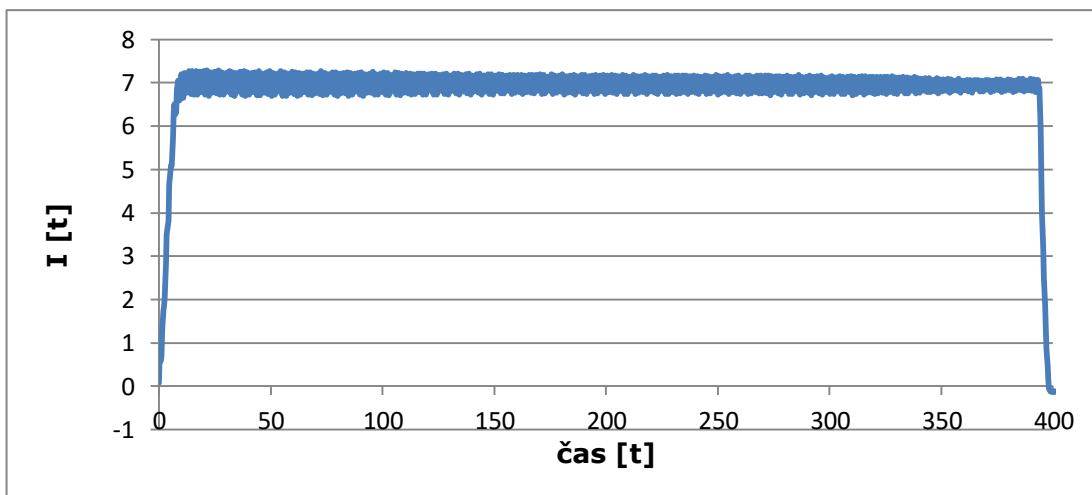
**Graf 57 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 196-200**



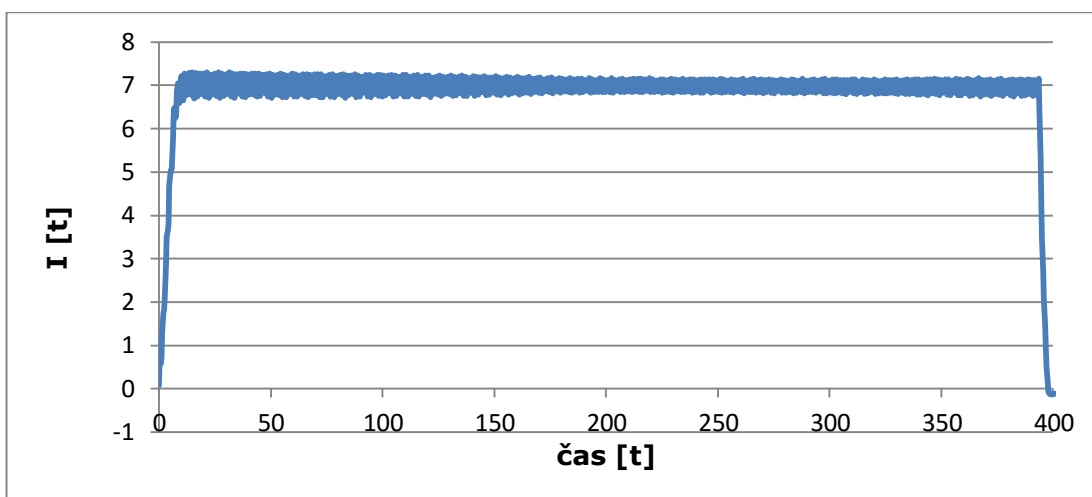
**Graf 58: Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 296-300**



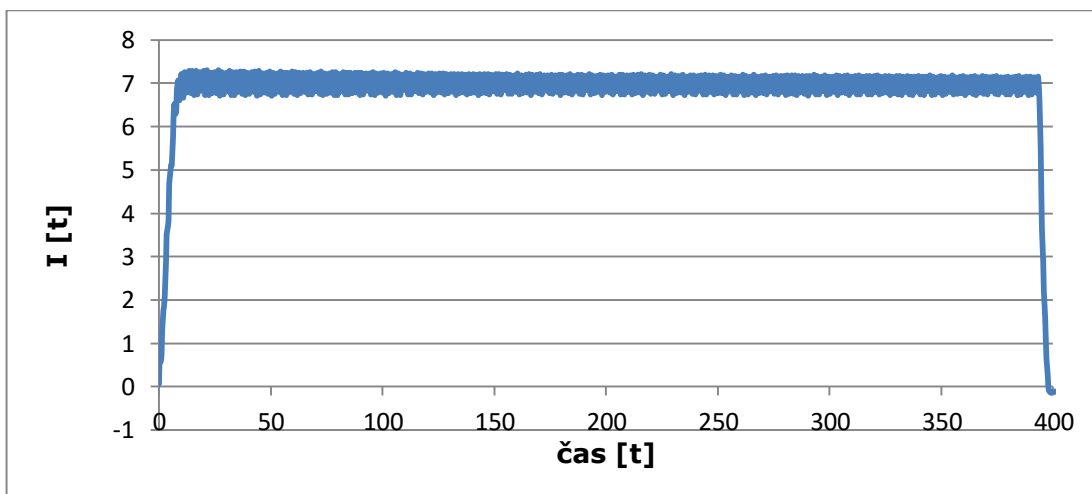
**Graf 59 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 396-400**



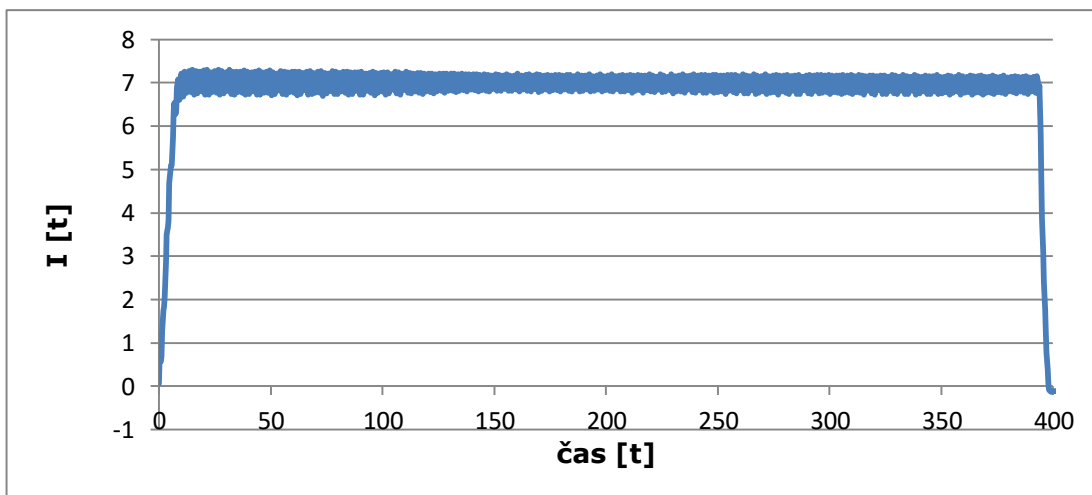
**Graf 60 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 496-500**



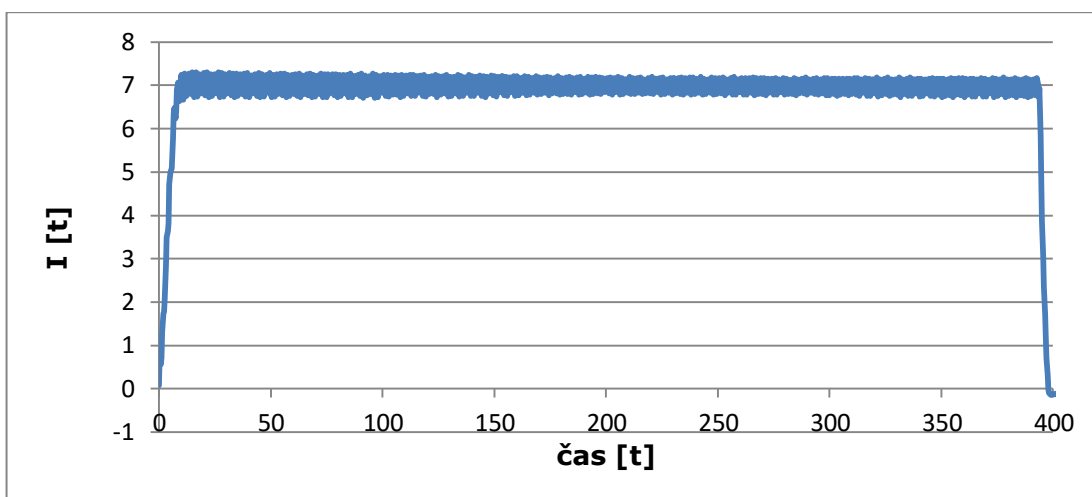
**Graf 61 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 502-507**



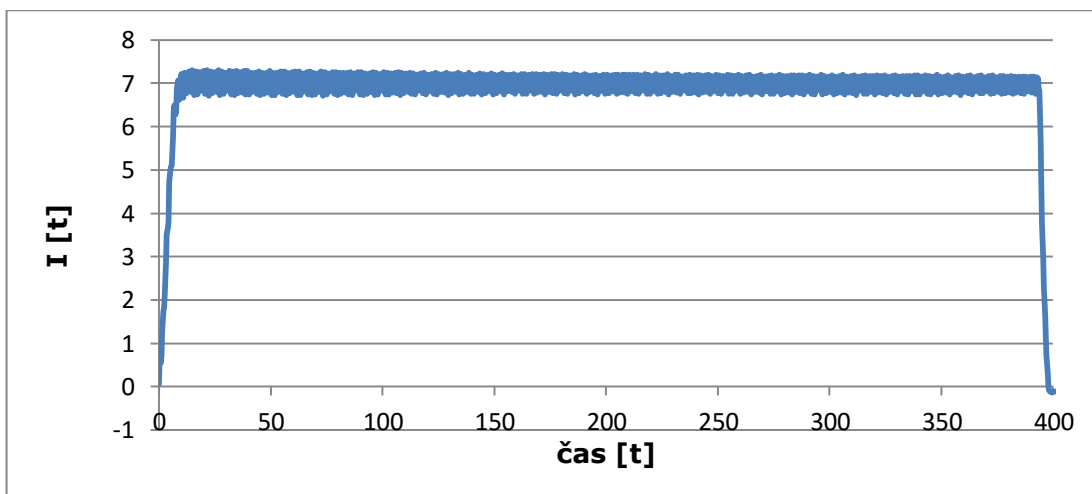
**Graf 62 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 696-700**



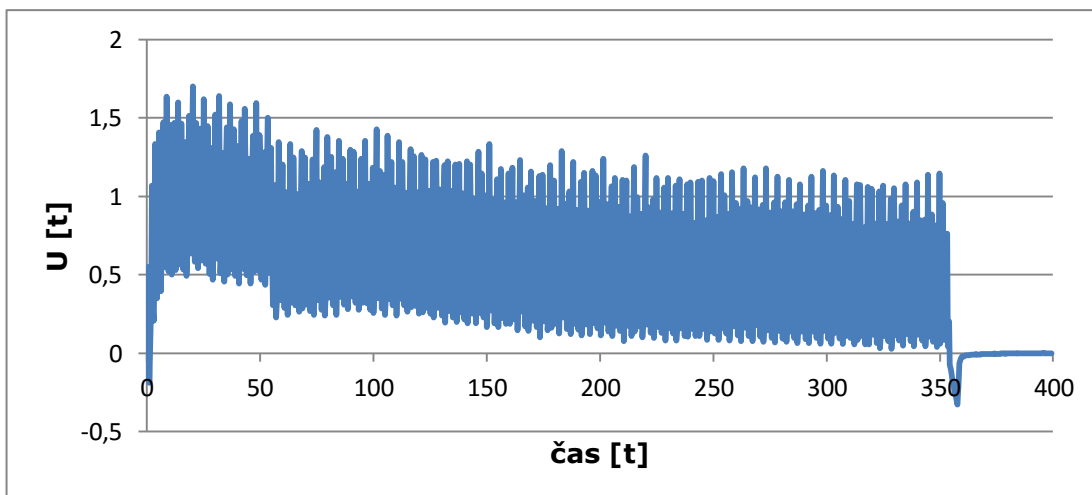
**Graf 63 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 898-900**



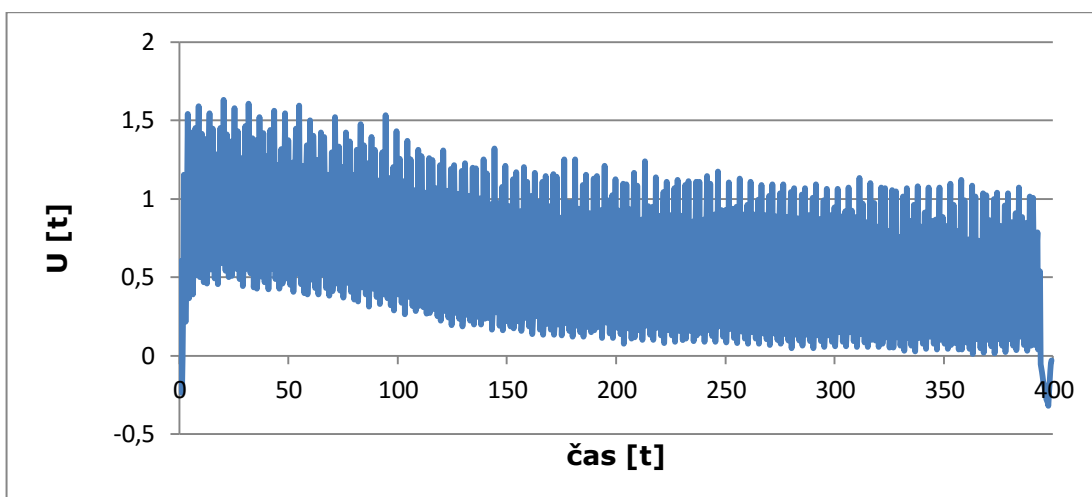
**Graf 64 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 901-905**



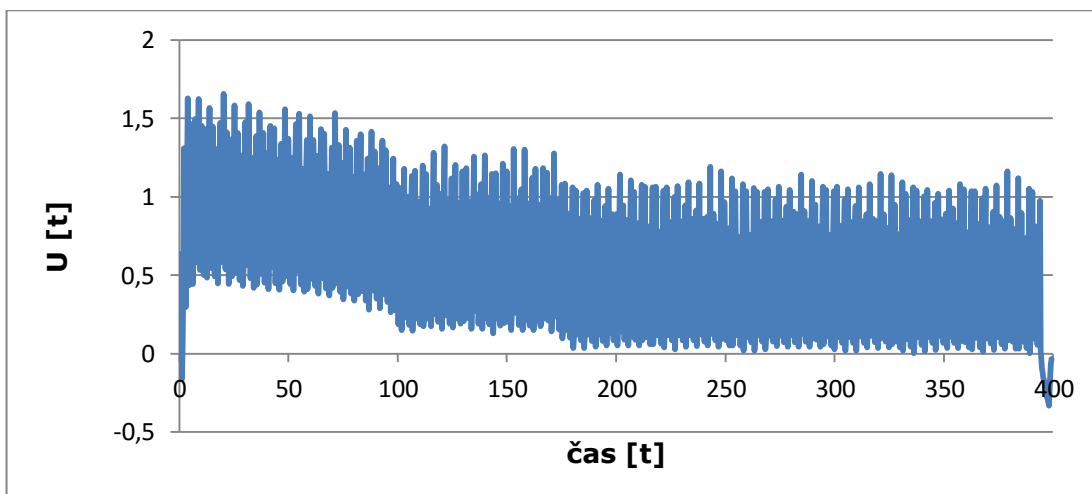
**Graf 65 - Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro vzorky č. 1096-1100**



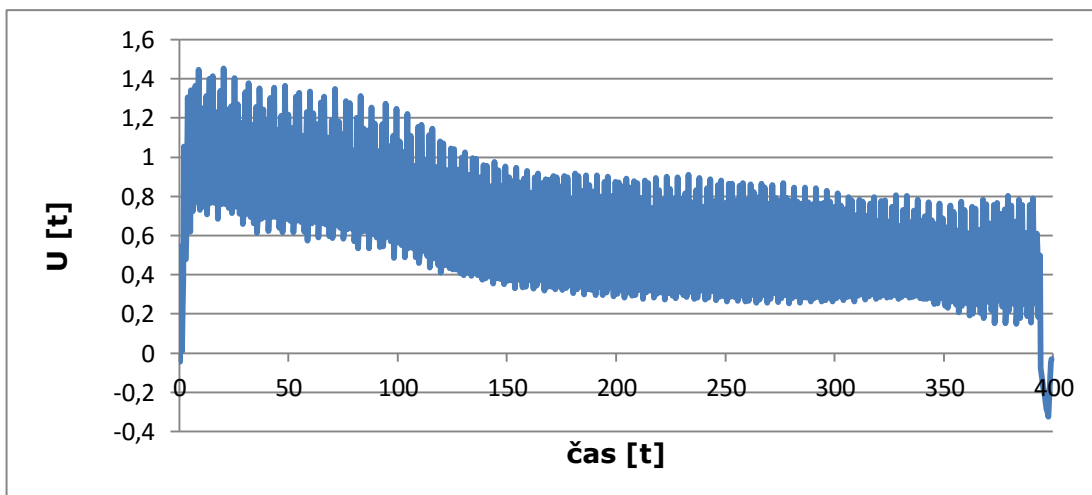
**Graf 66 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 8**



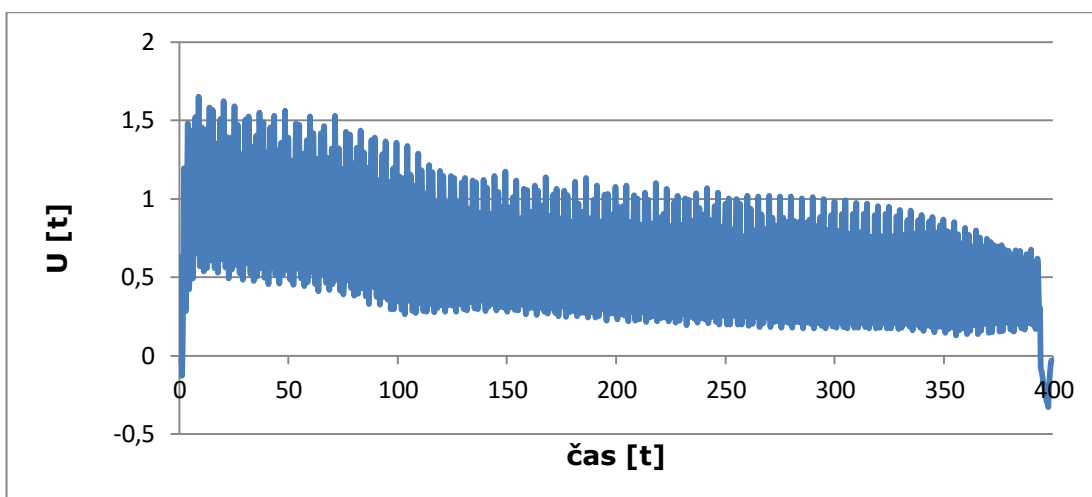
**Graf 67 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 9**



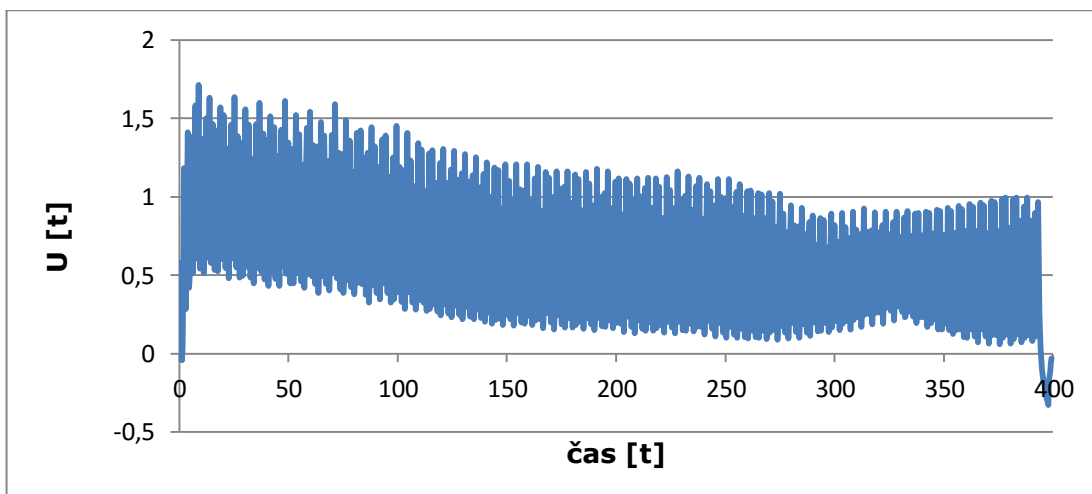
**Graf 68 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorek č. 10**



**Graf 69 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 11-15**

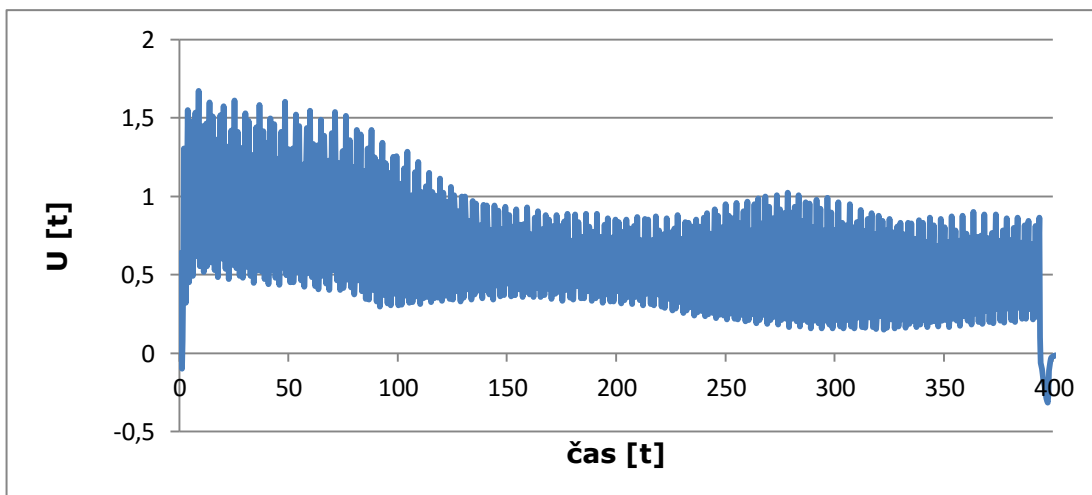


**Graf 70 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 47-51**

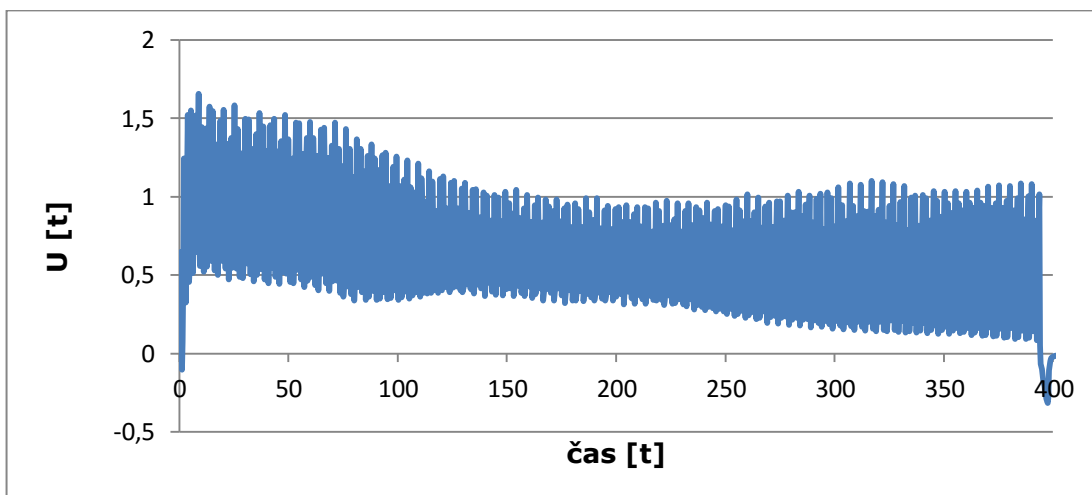


**Graf 71 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 96-100**

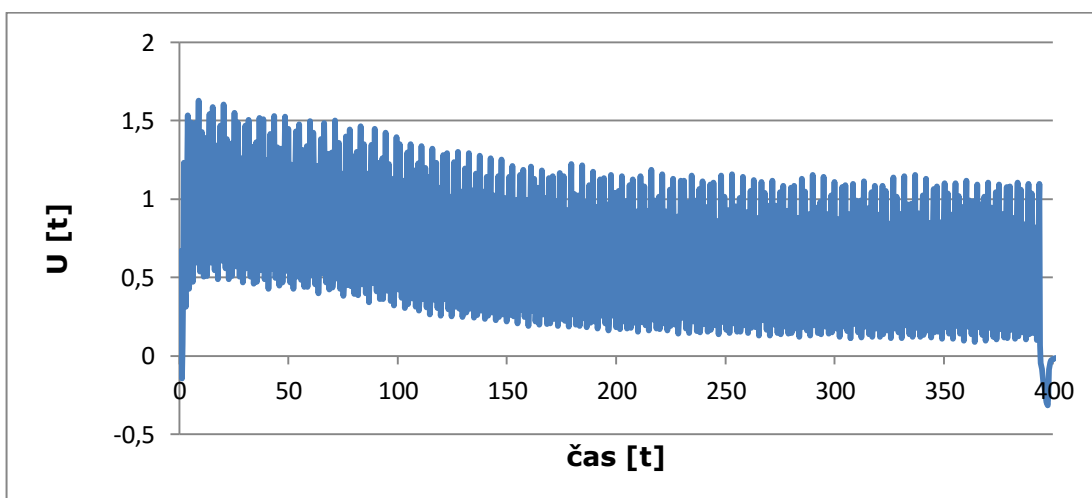




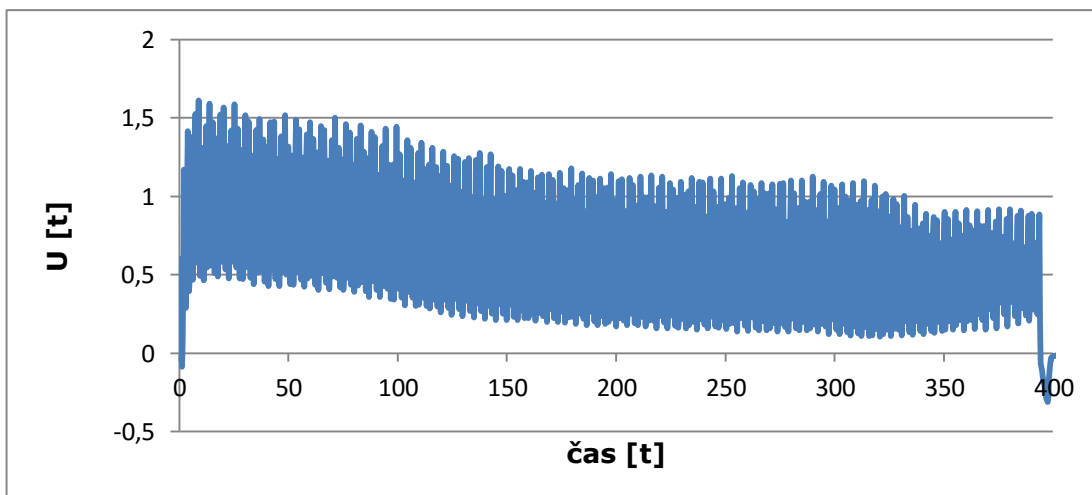
**Graf 72 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 196-200**



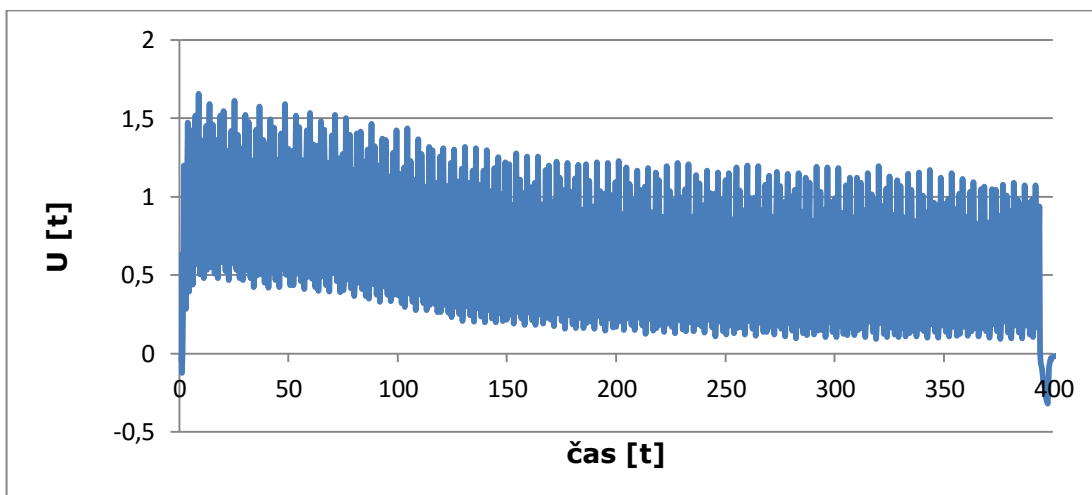
**Graf 73 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 296-300**



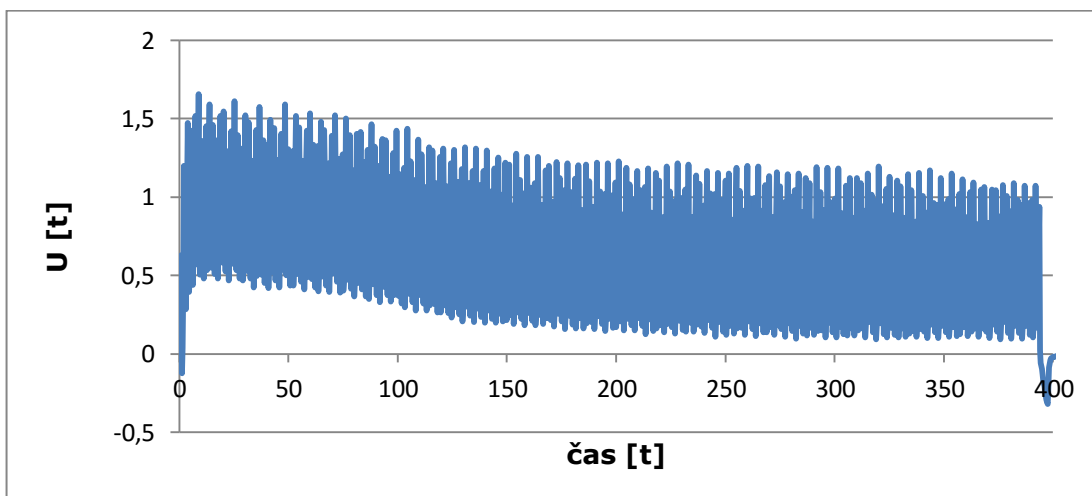
**Graf 74 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 396-400**



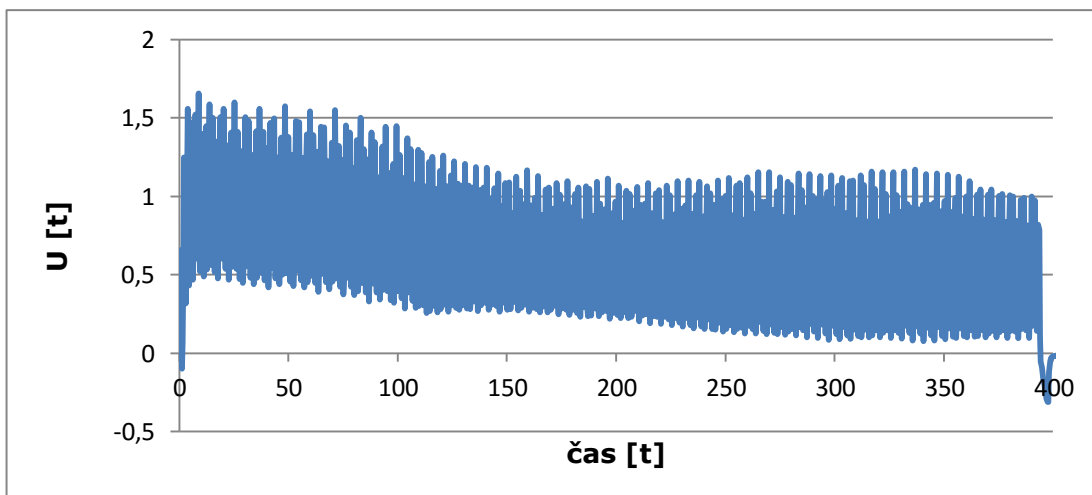
**Graf 75 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 496-500**



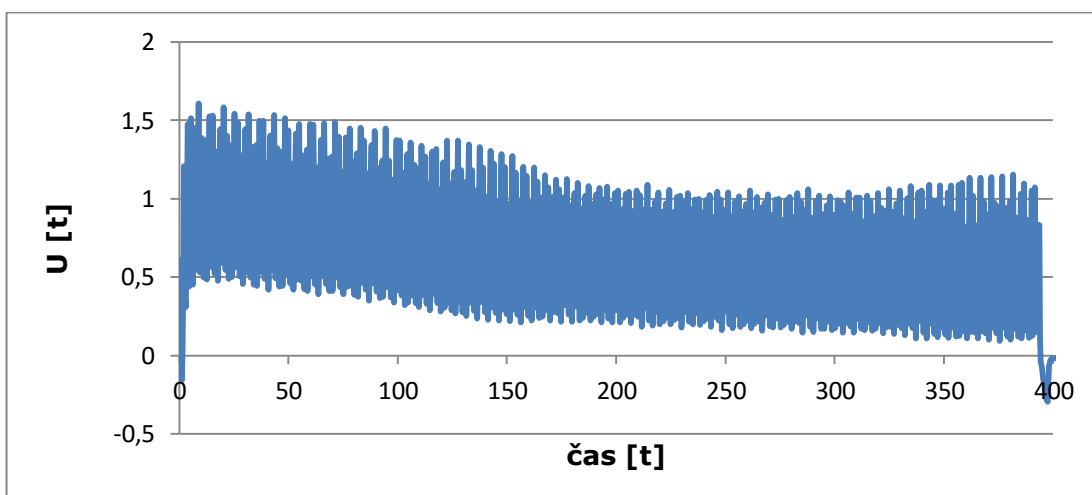
**Graf 76 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 502-507**



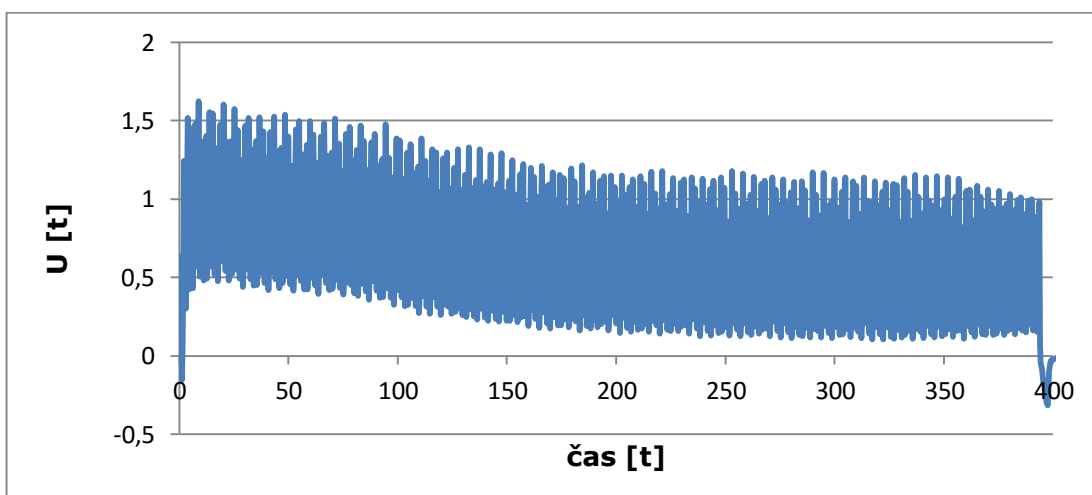
**Graf 77 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 696-700**



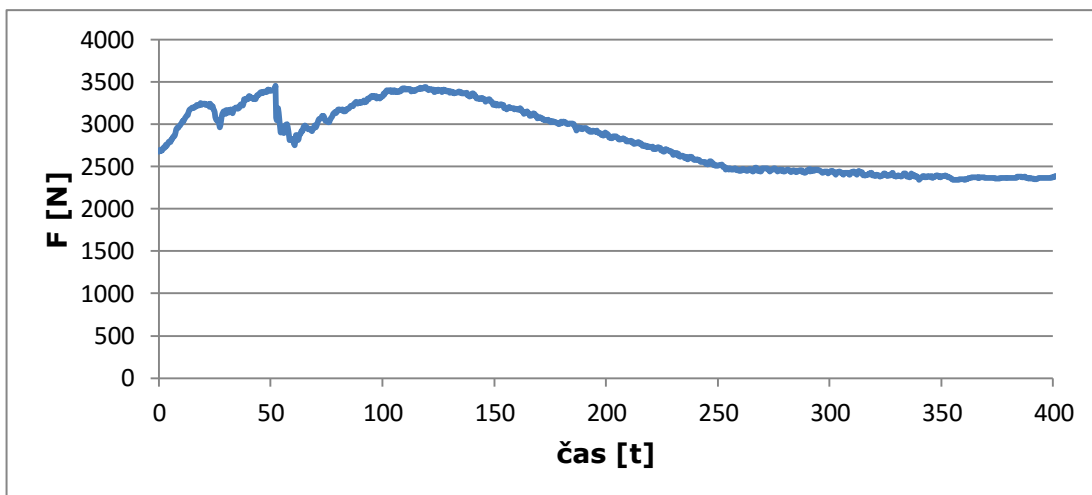
**Graf 78 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 896-900**



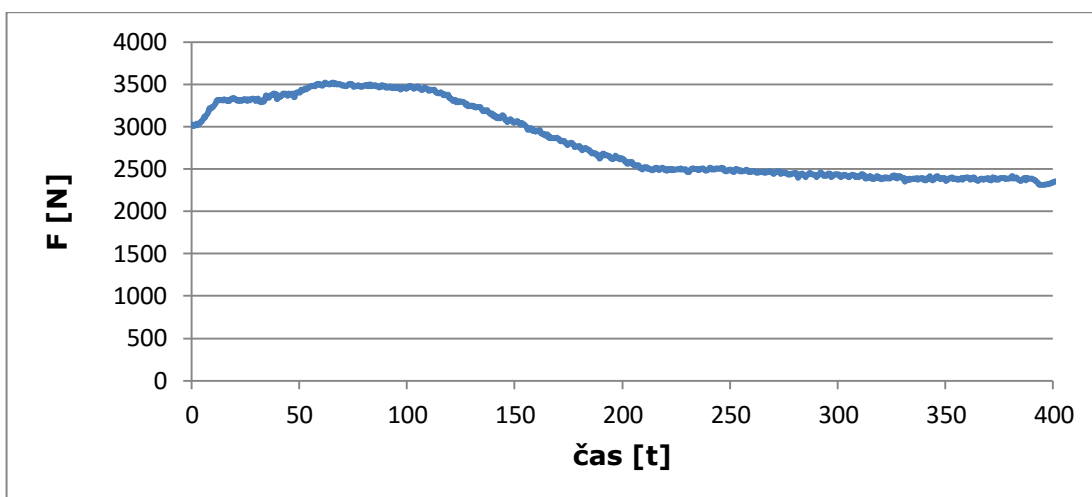
**Graf 79 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 901-905**



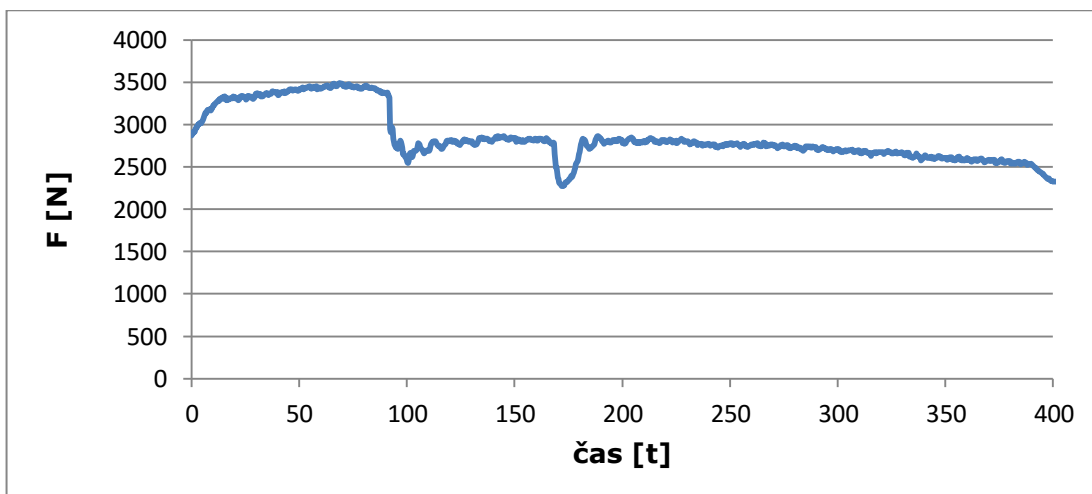
**Graf 80 - Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro vzorky č. 1096-1100**



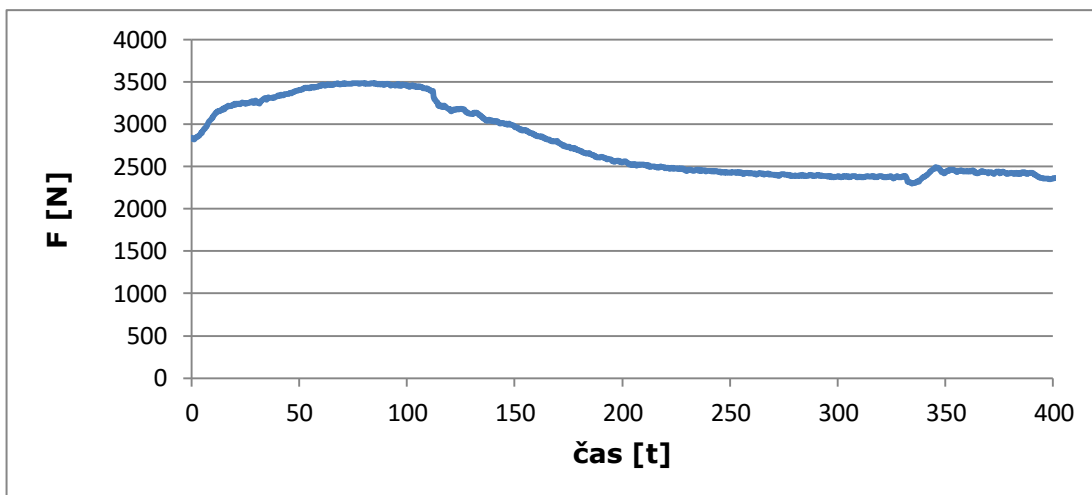
**Graf 81 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorek č. 8**



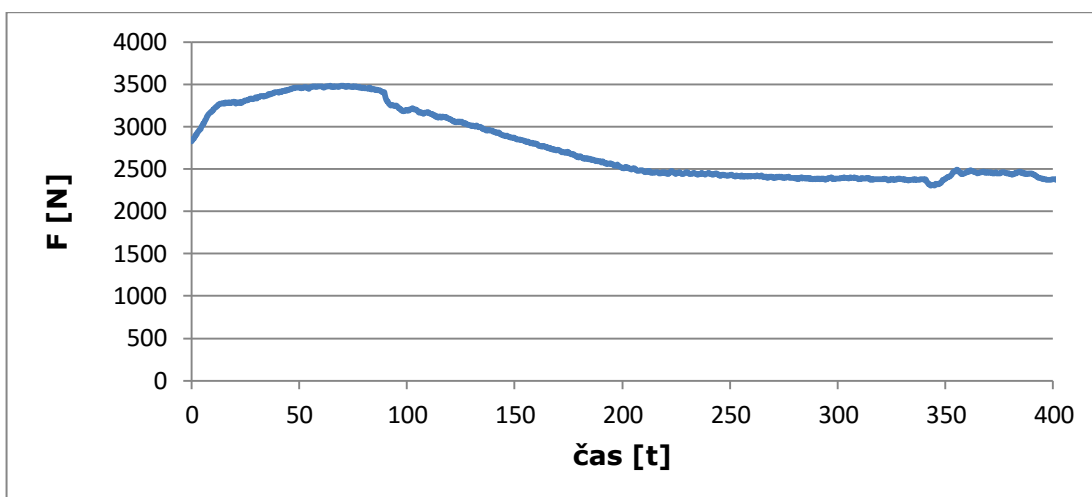
**Graf 82 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorek č. 9**



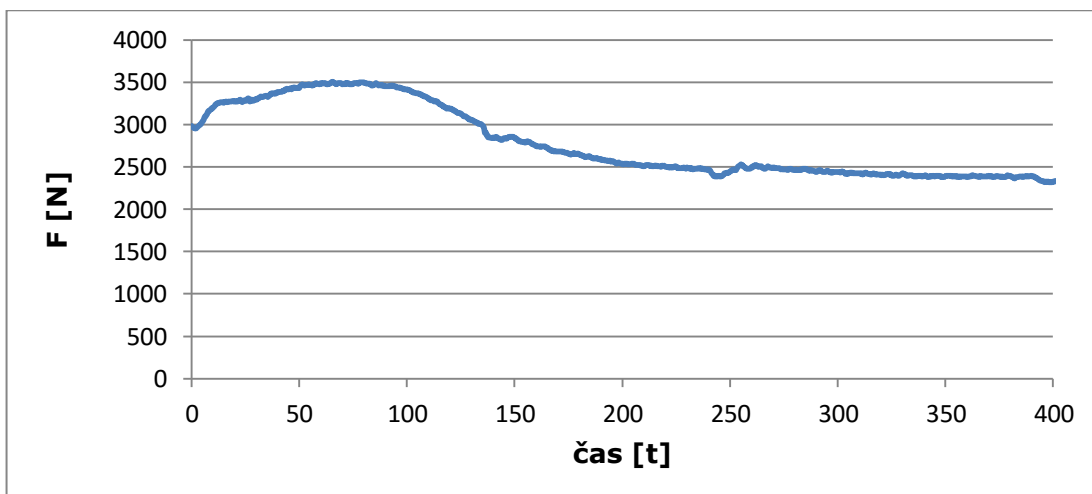
**Graf 83 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorek č. 10**



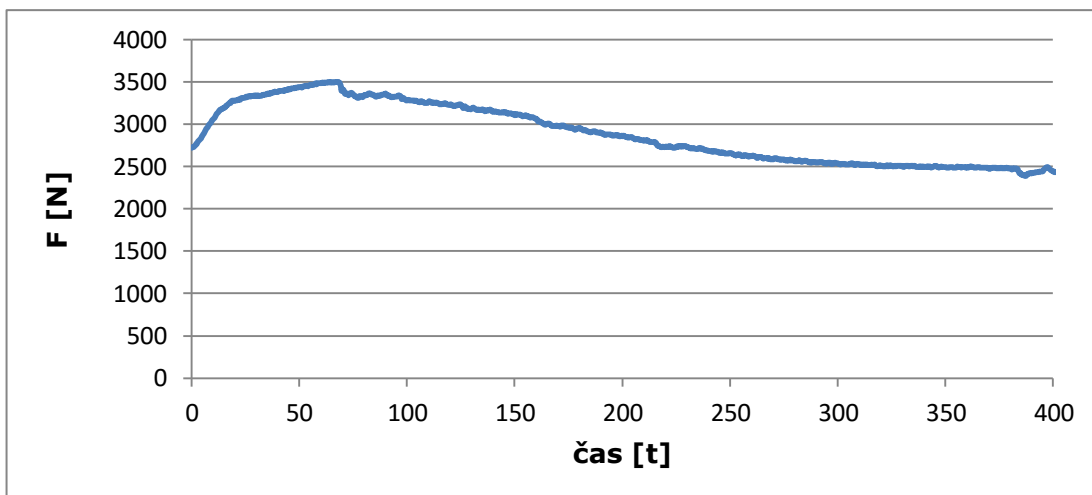
**Graf 84 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 11-15**



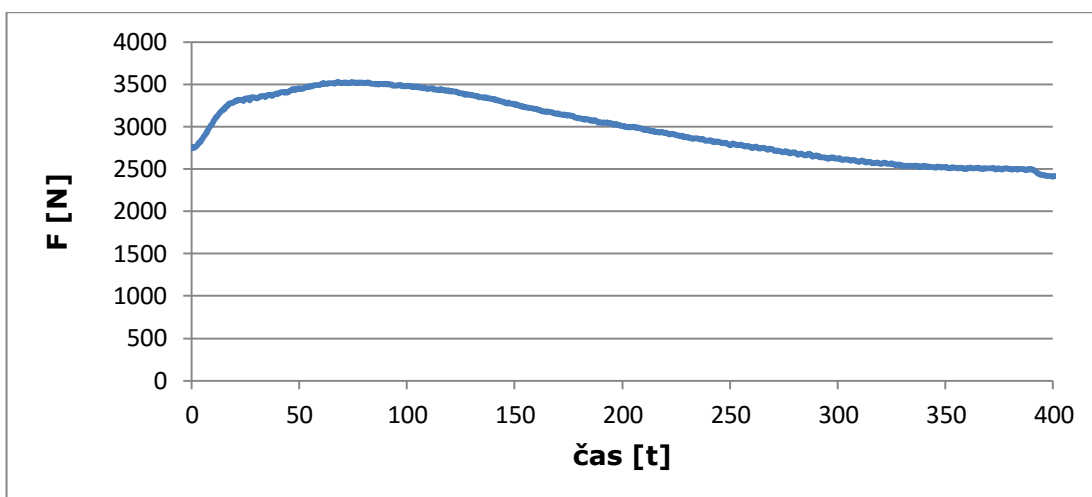
**Graf 85 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 47-51**



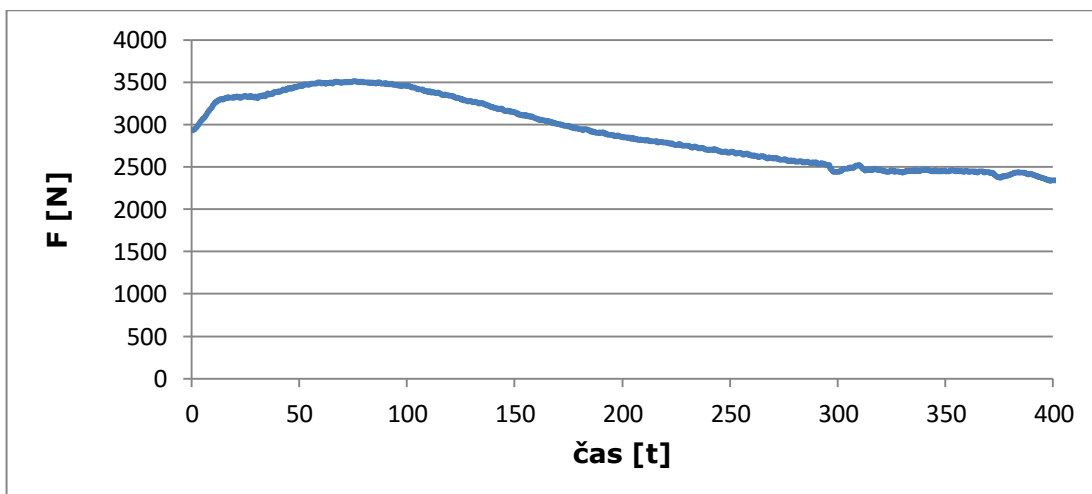
**Graf 86 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 96-100**



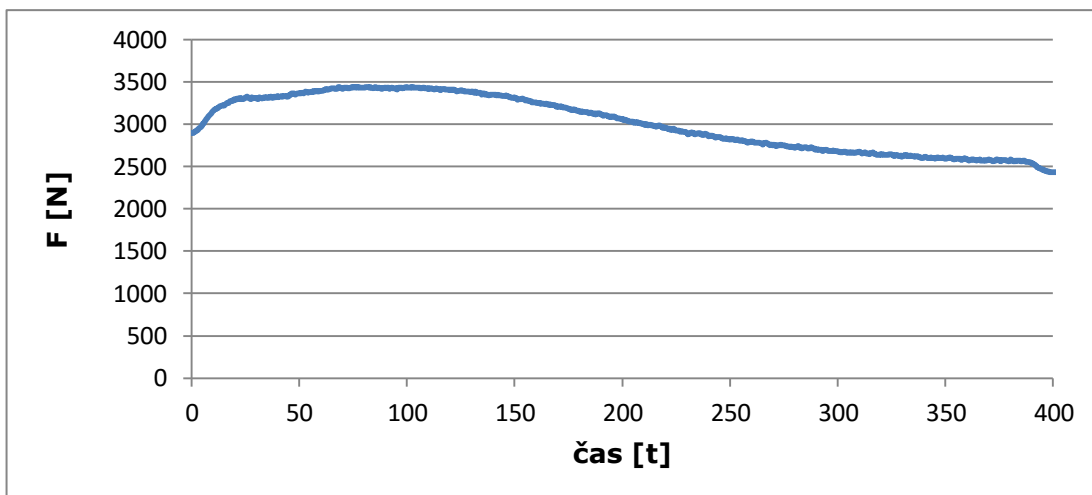
**Graf 87 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 296-300**



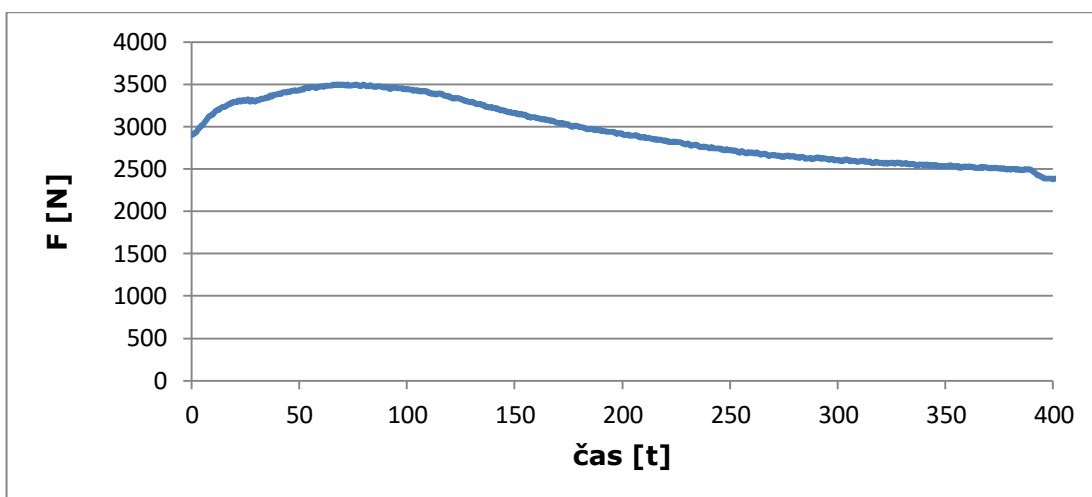
**Graf 88 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 396-400**



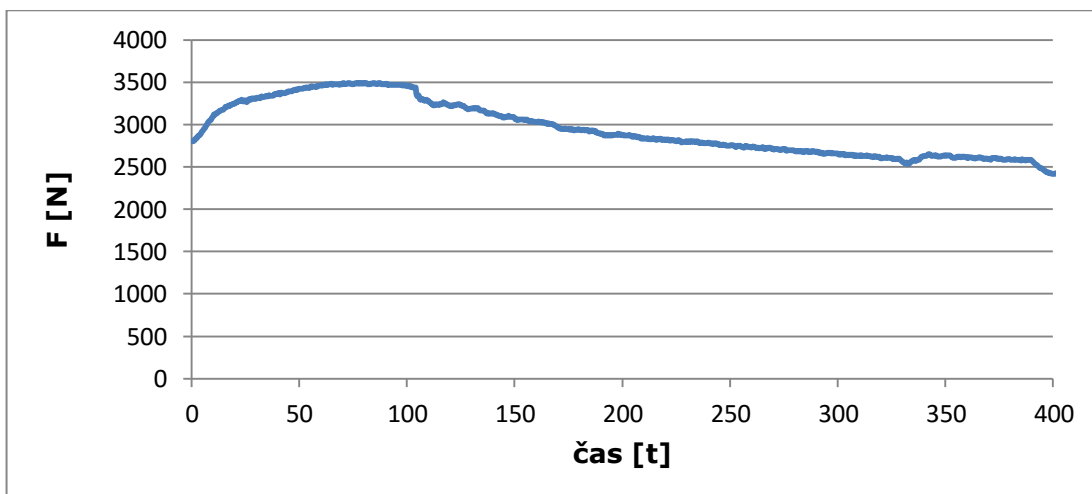
**Graf 89 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 496-500**



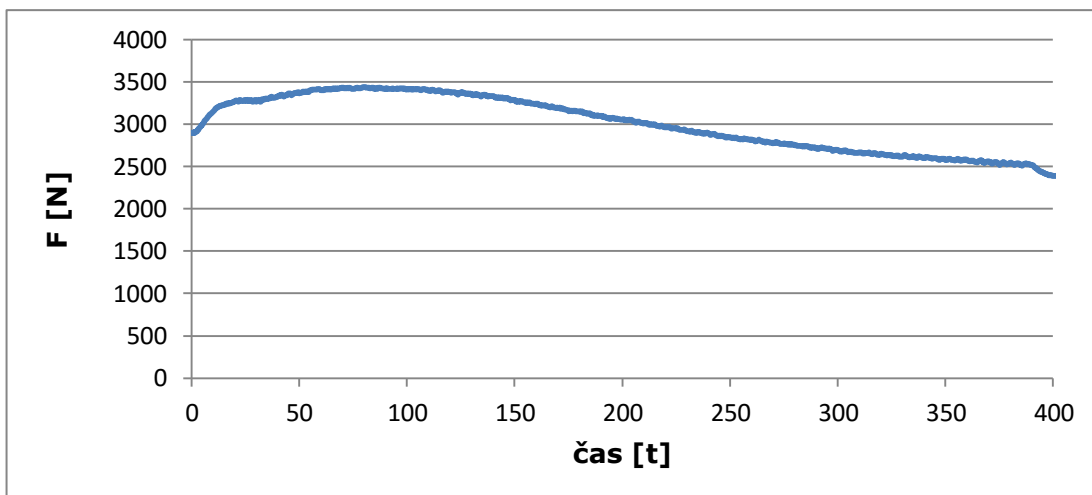
**Graf 90 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 502-507**



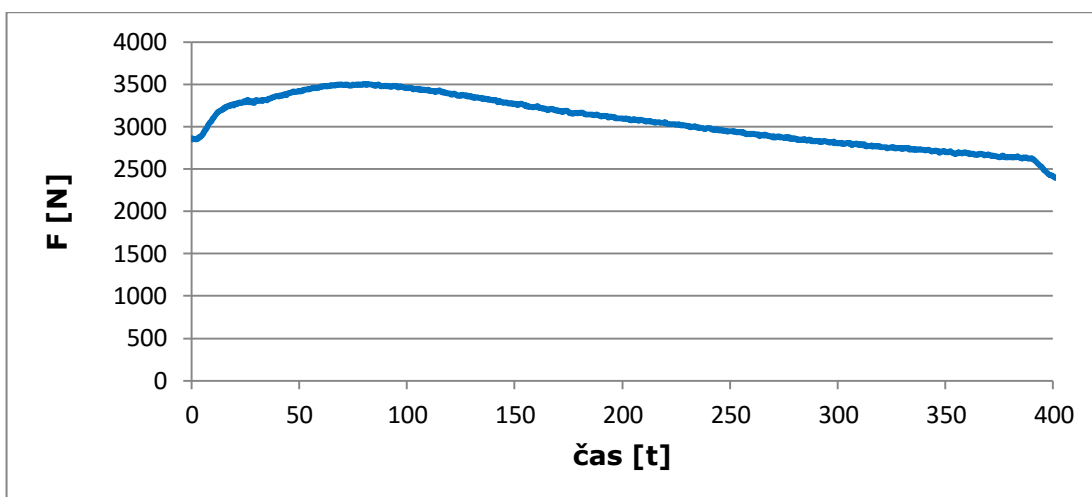
**Graf 91 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 696-700**



**Graf 92 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 896-900**



**Graf 93 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 901-905**



**Graf 94 - Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro vzorky č. 1096-1100**