



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## BODOVÉ ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ

RESISTANCE SPOT WELDING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Kosinka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

BRNO 2016

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jakub Kosinka**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Bodové odporové svařování

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Závislost pevnosti bodového svaru na rozměrech svarové čočky a TOO. Stanovení optimálních parametrů svařování.

### Cíle bakalářské práce:

Porovnání makrostruktury a pevnosti bodových svarů provedených tvrdým a měkkým svařovacím režimem při stejném Joulově teple.

### Seznam literatury:

KŘÍŽ, R. a P. VÁVRA. Strojírenská příručka. Praha: SCIENTIA. 1998. Svazek 8. 251 s.

ISBN 80-7183-054-2

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s.

ISBN 0-87170-382-3

AMBROŽ, Oldřich, B. KANDUS a J. KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0

MESSLER, R. W. Jr.. Principles of Welding. New York, USA. 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.

ŽÁK, Jan, M. NOVÁK. Teorie svařování. VUT v Brně, 1988, 142 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

KOSINKA Jakub: Bodové odporové svařování.

---

Tato práce popisuje princip bodového odporového svařování a stanovuje parametry, na kterých kvalita svarové čocky závisí. Dále srovnává makrostrukturu a mechanické vlastnosti bodových svarů zhotovených měkkým a tvrdým režimem svařování. V rámci experimentu vyhodnocuje pevnost svaru, přesněji řečeno soudržnost svařence v závislosti na počtu bodových svarů a jejich vzájemné poloze.

Klíčová slova: bodové odporové svařování, tvrdý svařovací režim, měkký svařovací režim, tepelně ovlivněná oblast

## **ABSTRACT**

KOSINKA Jakub: Spot resistance welding.

---

The project describes the principle of resistance spot welding and sets the parameters which the quality of the weld nugget depends on. Moreover, it compares the macrostructure and mechanical properties of the spot welds made by soft or hard welding mode. In the experimental part, there is evaluating the strength of weld, precisely said cohesiveness weldments depending on the number of spot welds and their mutual position.

Keyword: spot resistance welding, hard mode welding, soft mode welding, heat-affected zone

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KOSINKA, Jakub. *Bodové odporové svařování*. Brno, 2016. 32s, 5 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 27.5.2016

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

Dále děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za pomoc při realizaci experimentu, jenž je součástí praktické části této práce.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům a přátelům za podporu během studia.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1 ROZBOR ZADÁNÍ</b> .....	10
<b>1.1 Technologie odporového svařování</b> .....	10
<b>1.2 Princip bodového svařování</b> .....	11
1.2.1 Způsoby vytváření bodových spojů .....	12
1.2.2 Vývin tepla ve svařovaném materiálu .....	14
1.2.3 Odvod tepla při bodovém odporovém svařování .....	16
<b>1.3 Výhody a nevýhody tvrdého a měkkého režimu svařování</b> .....	17
1.3.1 Měkký svařovací režim .....	18
1.3.2 Tvrdý svařovací režim .....	18
<b>1.4 Parametry bodového odporového svařování</b> .....	19
1.4.1 Svařovací přitlačná síla .....	19
1.4.2 Svařovací (sekundární) proud .....	21
1.4.3 Svařovací čas .....	22
1.4.4 Časový průběh svařovacích parametrů (svařovací program) .....	22
1.4.5 Materiál elektrod .....	22
<b>2 STRUKTURNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI</b>	
<b>BODOVÉHO SVARU</b> .....	23
<b>2.1 Makrostruktura bodového svaru</b> .....	23
<b>2.2 Mechanické zkoušky bodových svarů</b> .....	24
<b>3 EXPERIMENT</b> .....	26
<b>3.1 Realizace experimentu</b> .....	26
<b>3.2 Vyhodnocení experimentu</b> .....	31
<b>4 ZÁVĚRY</b> .....	32
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

\*\*\*\*\*

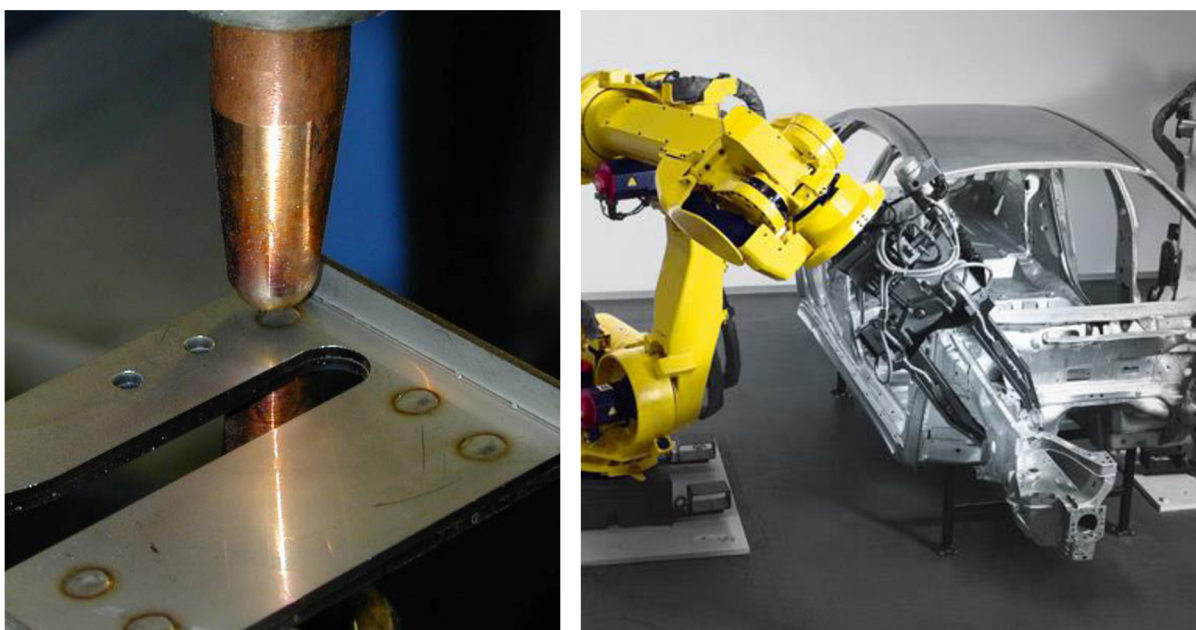


## ÚVOD [4], [8]

Dlouho jsem přemýšlel, jak svou bakalářskou práci na téma Bodové odporové svařování uvést. Vždyť obsah práce - tedy to o čem práce bude, jsem již nastínil v abstraktu - snad by se hodilo toto doplnit nějakými povšechnými obrázky, spjatými s touto technologií - k tomu necht' poslouží obr. 1.

Úvod bych chtěl věnovat krátkému zamyšlení se nad smyslem této práce - jako inspiraci jsem zvolil myšlenky T. G. Masaryka - text je doslova převzat z knihy Karla Čapka „Hovory s TGM“: „*Vždycky jsem pracoval rád a snažil se být praktický, obracel jsem se k praxi a do praxe; ale není praxe bez teorie. Teorie nemusí být formulována pro sebe, stačí, když podkládá a řídí praxi. / Tedy teorie pro praxi. / Ano, ale také praxe pro teorii. Teorie má hodnotu, i když nemůže sloužit praxi hned. Poznávat je právě tak důležité jako jednat. Jednáním poznáváme, tak jako poznáváním připravujeme správné jednání. Je-li někdy rozpor mezi teorií a praxí, pak je někde chyba: buď je špatná ta teorie, nebo ta praxe, často obojí. Při vši praktickosti jsem všude pro teorii, pro teoretické poznání vědecké a filozofické. Jsem proti planému spekulování, proti hře se slovy, jsem proti špatné praxi a proti práci zbytečné – tak jako teorie může být bezkvětná, tak bezplodnou může být praxe. Práce a užitek nejsou smyslem života – čert je velmi pracovitý, kutí ve dne v noci, a přece je hloupý. Aspoň náš čert český a slovenský. Jsem pro věcnost, pro poznání věci konkrétních.*“

Tyto myšlenky byly aktuální v minulém století a neztratily na svém významu ani dnes. Například ve „Sborníku výtahů z referátů výzkumníků a praktiků odporového svařování“ z roku 1955 se můžeme dočíst tomuto (cituji doslova - autorem textu je Václav Čapek): „*Odporového svařování se v Sovětském svazu užívá ve všech odvětvích výroby, i při velkých stavbách komunismu.*“ Dále tamtéž: „*Je nutno mít stále na paměti závažnost učení Lenina a Stalina o produktivitě práce, o nutnosti jejího zvyšování v zájmu nového uspořádání společnosti.*“ Přestože je toto učení překonáno, setkáme se i dnes s lidmi, kteří spatřují smysl svého života především ve výkonnosti své práce, ve službě ekonomickému systému, a kteří proklamují, že teorie musí výhradně sloužit praxi, přičemž pomíjí skutečnost, že jedním z hlavních cílů lidského života je poznání.



Obr. 1 Aplikace bodového odporového svařování v praxi [19], [22]

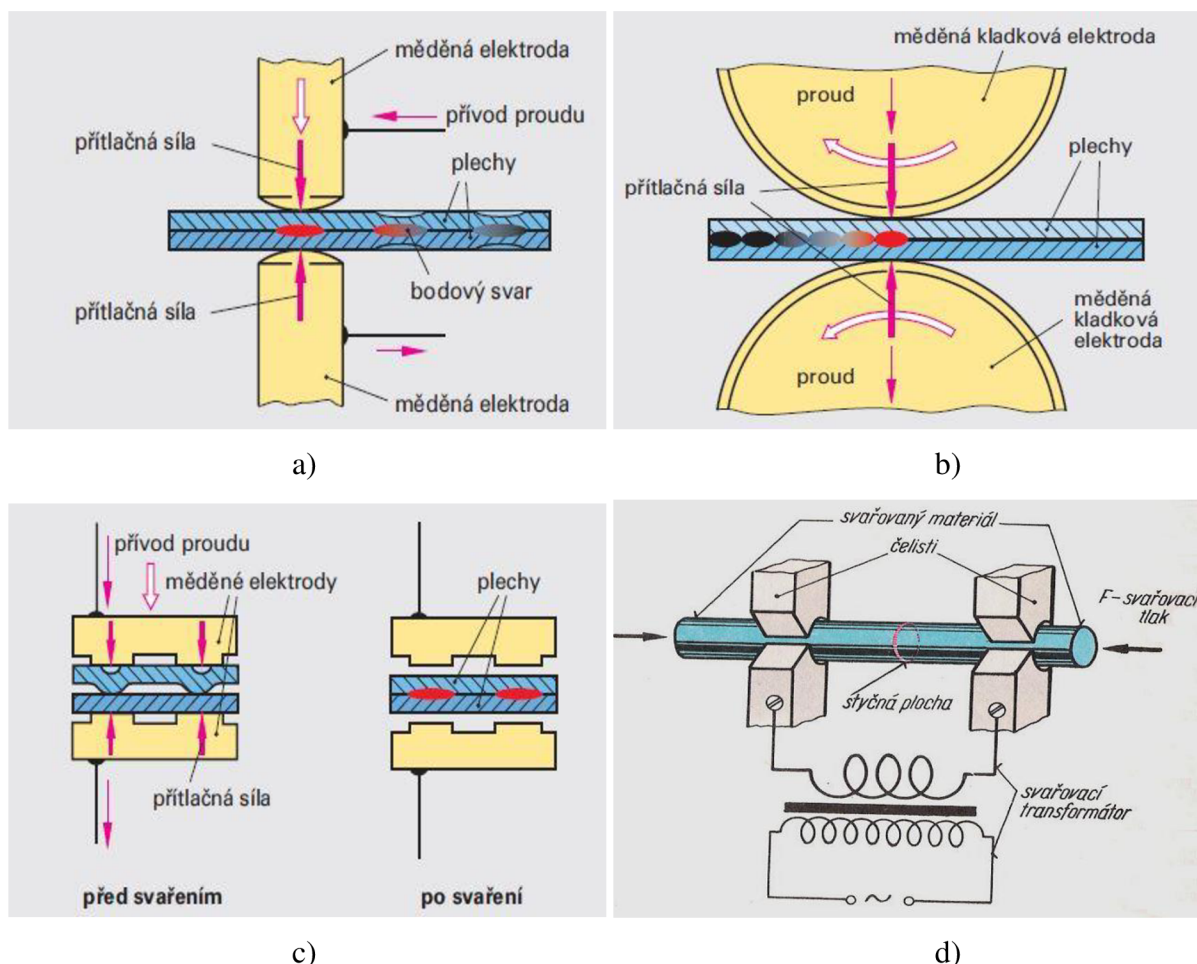
# 1 ROZBOR ZADÁNÍ

Abychom mohli stanovit závislost pevnosti bodového svaru na rozměrech svarové čochky a tepelně ovlivněné oblasti (dále jen TOO), je nutno se podrobněji seznámit s principem technologie bodového odporového svařování. Je třeba zjistit, na jakých parametrech kvalita bodového svaru závisí a tyto parametry zoptimalizovat tak, aby samotné stanovení této závislosti bylo co nejvíce objektivní a zahrnovalo v sobě co nejméně vedlejších vlivů.

## 1.1 Technologie odporového svařování [12], [14], [24]

Bodové odporové svařování řadíme z hlediska principu samotné technologie do tlakového odporového svařování. Svarového spoje docílíme ohřevem na svařovací teplotu elektrickým odporovým teplem, které se vyvine při průchodu proudu materiálem sevřeným mezi dobře vodivými elektrodami, za současného stlačení spojovaných součástí. Jedná se tedy o svařování, které se uskutečňuje bez přídavného materiálu.

Kromě odporového svařování bodového, je na obdobném principu založeno odporové svařování švové, odporové svařování na lisech (výstupkové) a odporové svařování stykové.



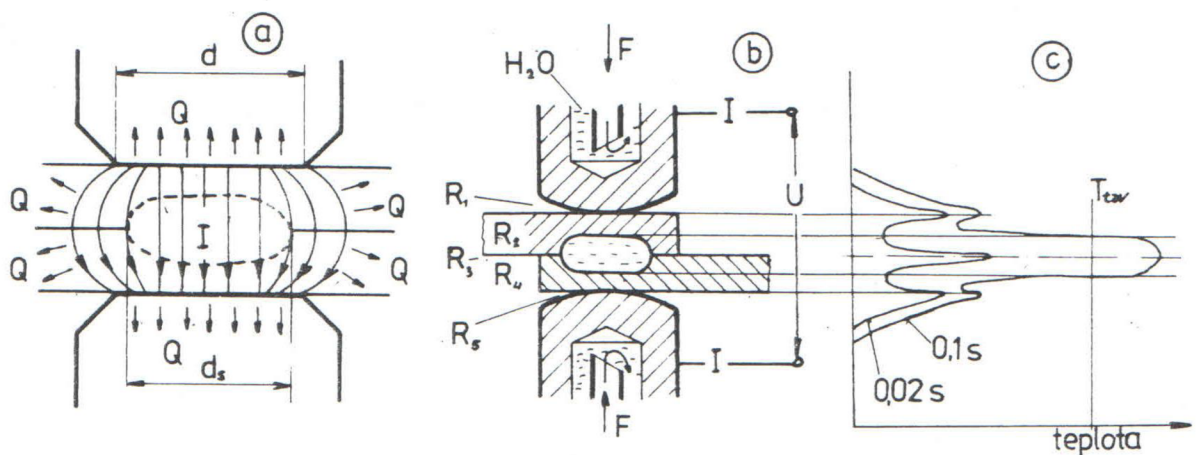
Obr. 2 Metody tlakového odporového svařování [5]

- a) bodové odporové svařování, b) švové odporové svařování,
- c) odporové svařování na lisech (výstupkové), d) stykové odporové svařování

## 1.2 Princip bodového svařování [1], [12], [14], [24]

Svařované kovové materiály – většinou dva (výjimečně tři) plechy se vloží mezi dobře vodivé elektrody, jež jsou připojeny na svařovací transformátor. Necháme-li materiálem procházet elektrický proud, docílíme vlivem tepla, způsobeného elektrickým odporem (tzv. Jouleova tepla), ohřevu svařovaných součástí na svařovací teplotu přednostně v místě jejich vzájemného styku. Tyto součásti pak k sobě navzájem přitlačíme, vypneme proud, načež dojde ke ztuhnutí roztaveného kovu na styčné ploše součástí a tím k zhotovení bodového svaru.

Má-li mít svar požadovanou kvalitu, je nutné, aby měla svarová čočka předepsané rozměry, které jsou závislé na průměru dotykové plochy elektrod a efektivitě využití vybraného tepla pro roztavení kovu. Během zlomku sekundy proběhnou složité a na sobě málo závislé děje provázené jak vývinem, tak současným odvodem tepla, o čemž bude pojednáno v následujících kapitolách.



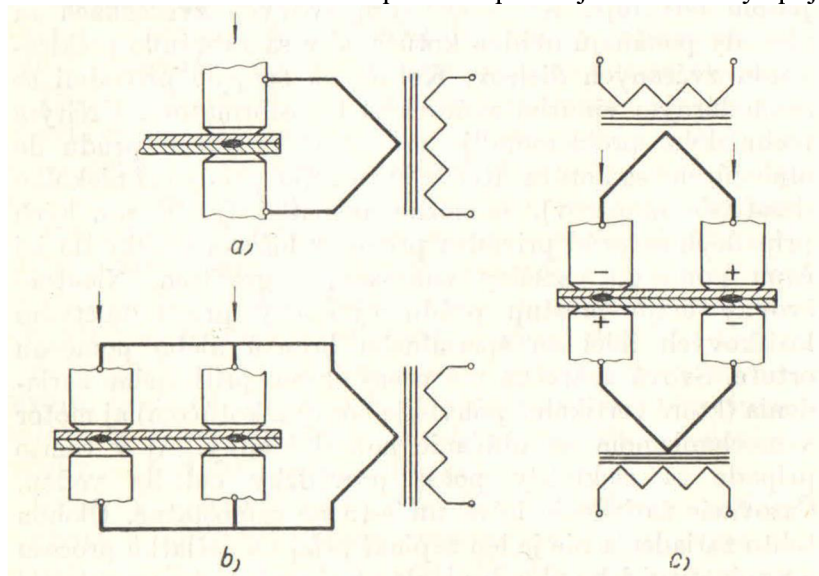
Obr. 3 Bodové odporové svařování [24]

- průběh proudu  $I$  a směr odvodu tepla  $Q$
- svarová čočka
- odpovídající rozložení teplot

### 1.2.1 Způsoby vytváření bodových svarů [14], [17]

S ohledem na způsob tvorby bodového svaru rozlišujeme dva druhy bodového svařování:

- ✓ přímé - při přímém bodovém svařování vzniká svarový spoj přímo mezi elektrodami - tedy svařovací elektrody jsou při přímém svařování orientovány navzájem proti sobě. Mezi elektrodami vzniká zpravidla pouze jeden svarový spoj.



Obr. 4 Přímé bodové svařování [14], [17]

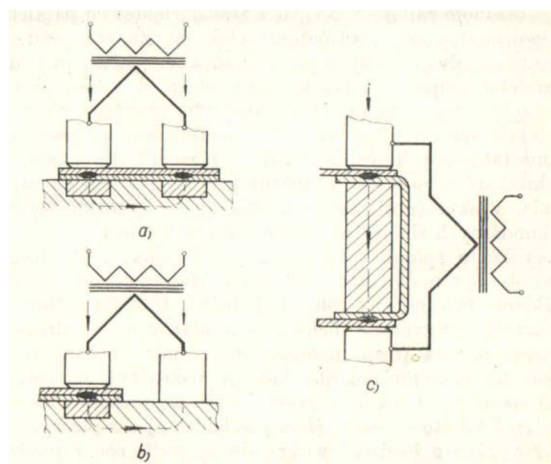
- a) jednotlivými body (jednobodové) protiběžnými elektrodami
- b) dvojbodové v paralelním zapojení
- c) dvojbodové v sériovém zapojení

⇒ zde je možno svářet třemi způsoby:

- a) Při prvním způsobu má stroj protiběžné elektrody, z nichž většinou spodní je pevná a horní přitlačná (může se pohybovat). Svařuje se postupně vždy po jednom bodě.
- b) Podstatou druhého způsobu je dvojbodové svařování v paralelním zapojení - na jeden transformátor jsou paralelně připojeny dva páry protiběžných elektrod. Svářecí proud má dvě větve - dva obvody, a proto k bodovému svařování dochází na dvou místech současně. Paralelní připojení dvou párů elektrod vyžaduje výkonnější transformátor. Je žádoucí, aby oba páry elektrod byly stlačovány stejnou silou, což se často řeší samostatným přitlačováním každého páru. Rovněž se dbá na to, aby sekundární smyčky obou dvou svařovacích obvodů měly stejnou velikost, což z obrázku 4b) není příliš patrné.
- c) Třetí způsob - dvojbodové svařování v sériovém zapojení se používá pouze zřídka. Podstatou tohoto způsobu použití dvou samostatných transformátorů o stejném výkonu - sekundární obvod jednoho transformátoru je uzavřený přes svařované dílce a sekundární obvod druhého transformátoru (případně naopak). Při tomto způsobu je nutné dbát na správnou polaritu (jak je patrné z obr. 4). Při způsobech b) a c) nepřechází celý svařovací proud pouze přes svařované místo, nýbrž i přes okolní oblasti v materiálu, kde k tvorbě svarové čocky nedochází.

Obr. 5 Nepřímé bodové svařování (vždy v sériovém zapojení) [14] [17]

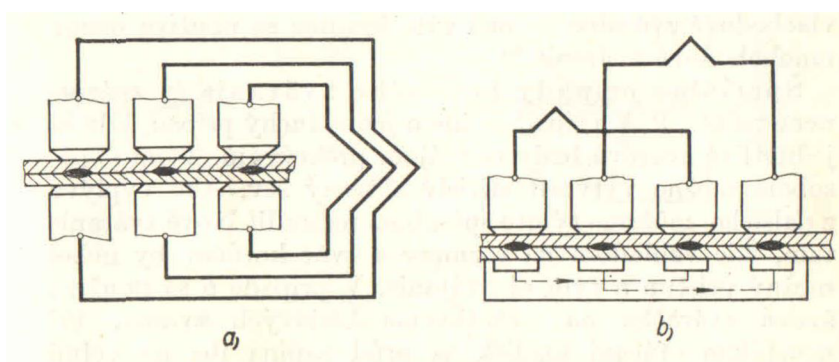
- a) dvojbodové - rovnoběžnými (souběžnými) elektrodami
- b) jednotlivými body (jednobodové) - rovnoběžnými elektrodami, přičemž jedna elektroda pouze přivádí proud
- c) dvojbodové - protiběžnými elektrodami a proudovým můstkem



- ✓ nepřímé - při nepřímém bodovém svařování svarový spoj nevzniká svarová čoučka přímo mezi elektrodami, neboť elektrody jsou většinou orientovány souběžně a proud při přechodu z jedné elektrody na druhou prochází navíc přes vodivou podložku, případně můstek. Přestože, takto orientované svařovací elektrody jsou schopny zhotovit naráz dva svarové spoje, je třeba zdůraznit, že při souběžné orientaci je zapotřebí každou elektrodu přitlačovat na svařovaný materiál samostatně - je to z toho důvodu, že se tím zabezpečuje stejná svářecí síla působící na místo svaru.

Tato metoda svařování se dle obr. 4 používá vždy v sériovém zapojení. Při způsobu a) přechází proud z transformátoru nejprve oběma svařovanými dílci (zde vytváří bodový svar), poté přechází přes měděnou podložku a vrací se opět přes svařované dílce (zde opět vytváří bodový svar) do transformátoru. Způsob b) je založen na stejném principu jako způsob a), vytváří se však pouze jeden svarový spoj. Při zapojení dle obr. 5c) měděnou podložku nahrazuje měděný můstek. Ačkoli jsou elektrody orientovány protiběžně, v podstatě se jedná o stejný případ jako při způsobu a).

Jelikož je často zapotřebí vyhotovit desítky bodových svarů (např. v automobilovém průmyslu), používají se pro tento účel mnohabodové svařovací stroje. Jedná se v podstatě jen o skládání svařovacích elementů vyhotovených podle předchozích způsobů (viz obr. 6). Jelikož bychom se rozbořením tohoto tématu již příliš odchylovali od zadání práce, nebudeme se jím více zabývat.



Obr. 6 Vícebodové svařování [14], [17]  
a) přímé                      b) nepřímé

### 1.2.2 Vývin tepla ve svařovaném materiálu [1], [7], [12], [24]

Okamžitá hodnota proudu protékajícího mezi elektrodami, jež je dána Ohmovým zákonem, závisí na napětí na elektrodách  $U$ , které je přibližně konstantní, a na okamžitém celkovém odporu\* materiálu mezi elektrodami  $\Sigma R$ , který není konstantní a v průběhu svařování se mění. Celkové množství tepla vyvinutého průchodem elektrického proudu se podle Jouleova zákona stanoví takto:

$$Q = \int_0^t (\Sigma R) I^2 dt \quad [J] \quad (1)$$

kde  $I$  – okamžitá hodnota proudu protékajícího mezi elektrodami (pro stejnosměrný proud; v případě střídavého proudu se jedná o efektivní hodnotu)

$dt$  – diferenciál času

$\Sigma R$  – celkový odpor materiálu - je roven součtu těchto dílčích odporů:

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad [\Omega] \quad (2)$$

$R_1, R_5$  - přechodový odpor na styku elektrod a materiálu

$R_2, R_4$  - vlastní odpor svařovaného materiálu

$R_3$  - přechodový odpor svařovaných materiálů

\* Pozn.: Nebude-li řečeno jinak, pak pod pojmem odpor budeme uvažovat elektrický odpor materiálu.

Slovy je možné vyjádřit rovnici takto: Množství tepla dodané do svaru bude tím větší, čím bude menší přitlačná síla (tedy vyšší přechodové odpory), větší proud a delší čas.

Pro správné porozumění této problematice je důležité, aby zde byly jednotlivé složky celkového odporu  $\Sigma R$  podrobněji popsány (dle vzorce 2).

#### ➤ Přechodový odpor na styku elektrod a materiálu - $R_1, R_5$

Hodnota tohoto odporu je závislá na velikosti styčné plochy - tedy průměru, resp. tvaru elektrody, dále na drsnosti a čistotě styčných ploch a na měrném tlaku mezi elektrodou a povrchem plechu. Při vyšším měrném tlaku je přechodový odpor nižší a rozmezí běžně používaných tlaků přibližně platí:

$$R_1 = R_1' \cdot \frac{100}{p} [\mu\Omega] \quad (3)$$

kde  $p$  - měrný tlak [kPa]

$R_1'$  - konstanta [ $\mu\Omega$ ] - vyjadřující přechodový odpor za měrného tlaku 100 kPa.

Z hlediska odporového svařování jsou tyto přechodové odpory  $R_1$  a  $R_5$  nežádoucí a je snaha tyto odpory eliminovat.

#### ➤ Vlastní odpor svařovaného materiálu $R_2, R_4$

Hodnota tohoto odporu závisí na:

- ✓ dané tloušťce materiálu
- ✓ na efektivním průřezu, kterým protéká proud
  - tento efektivní průřez závisí především na velikosti styčných ploch elektrod a na měrném odporu materiálu, který se s rostoucí teplotou zvyšuje.
  - z obrázku 3a) je zřejmé, že efektivní průřez a současně i proudová hustota se mění, neboť vlastností proudu je, že volí cestu nejmenšího odporu, nikoli cestu nejkratší. Tento efekt se projevuje výrazněji s rostoucí tloušťkou materiálu vzhledem k průměru styčné plochy elektrody a tedy rostoucím odporem pomyslného sloupce mezi elektrodami

➤ Přechodový odpor svařovaných materiálů  $R_3$

závisí:

- ✓ zejména na tloušťce a specifickém odporu vrstvy oxidů a možných nečistot na povrchu plechů
- ✓ na nerovnostech povrchu
- ✓ na efektivní ploše styku
- ✓ na přitlačné síle elektrod - vliv tlaku je obdobný jako u odporů  $R_1$  a  $R_5$
- ✓ na teplotě (viz obrázek 3a)) - s rostoucí teplotou odpor  $R_3$  klesá až do okamžiku, kdy na styku plechů vznikne tekutá fáze a odpor  $R_3$  náhle vzroste - zde již hovoříme o odporu čochy tekutého kovu.

Velikost přechodového odporu  $R_3$  na styku dvou plechů je možno určit z rovnice (4)

$$R_3 = r_p \cdot F^{-\alpha} [\Omega] \quad (4)$$

kde

-  $r_p$  [ $\Omega$ ] je přechodový odpor ve styku dvou materiálů při stlačování silou o velikosti 9,81 N

-  $F$  [N]- přitlačná svařovací síla

-  $\alpha$  [-] - součinitel charakterizující kvalitu povrchu v místě dotyku.

Tab. 1 Hodnoty součinitele  $\alpha$  v závislosti na druhu materiálu [17]

Hodnoty součinitele $\alpha$ [-] v závislosti na druhu materiálu	
Druh materiálu	Hodnoty součinitele $\alpha$ [-]
Ocel s čistým povrchem	0,65 - 0,75
Ocel se zoxidovaným povrchem	0,95 - 1,0
Plech s ochrannou vrstvou	0,85 - 0,95
Hliníkové slitiny	0,73 - 0,85

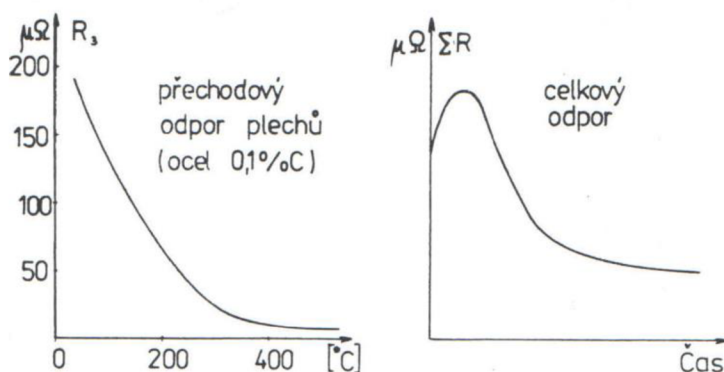
Hodnota veličiny  $r_p$  závisí na druhu svařovaných materiálu a na stavu jejich povrchu - například pro nelegované oceli s čistým povrchem  $r_p=0,005$  až  $0,006$  [ $\Omega$ ], pro hliníkové slitiny s čistým povrchem  $r_p=0,001$  až  $0,002$  [ $\Omega$ ].

V jednotlivých oblastech je pak množství vyvinutého tepla úměrné příslušnému odporu  $R_i$ :

$$Q_i = \int_0^t (\sum R_i) I^2 dt \quad [J] \quad (5)$$

Integrace je nutná z toho důvodu, že jak odpor tak proud jsou veličiny časově závislé - tedy mění se s časem, a současně ani proudová hustota není po průřezu rovnoměrně rozložena. Vlivem toho se celkový odpor  $\Sigma R$  v průběhu svařování značně mění (- tento časový průběh je schematicky zobrazen na obr. 7b) a materiál se mezi elektrodami ohřívá nerovnoměrně.

V příloze č.2 jsou znázorněny časové průběhy dynamických odporů (tj. celkových odporů v závislosti na svařovacích parametrech.)



Obr. 7 Změna odporu v závislosti: a) na teplotě b) na čase svařování [24]

### 1.2.3 Odvod tepla při bodovém odporovém svařování [1], [12], [24]

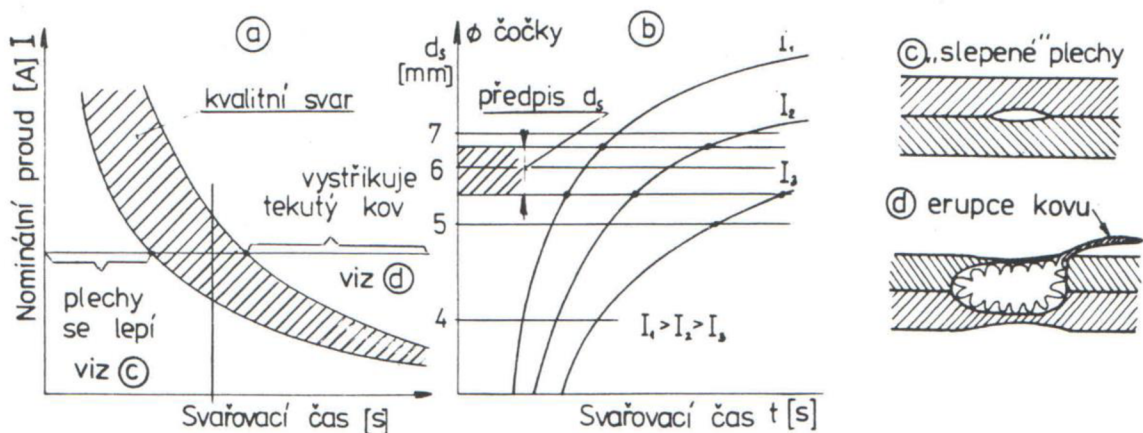
Skutečnost, že se hodnoty odporů  $R_1$  až  $R_5$  dosti odlišují, je příčinou toho, že se materiál sevřený mezi elektrodami ohřívá přednostně ve místě styku obou plechů a na styčné ploše mezi elektrodou a plechem - z těchto míst je teplo odváděno do okolního chladnějšího materiálu. Množství odvedeného tepla závisí na rozměru styčné plochy, součinitele tepelné vodivosti, měrného tepla, měrné hmotnosti, teplotního gradientu a času. Pokud bychom měli dospět k výpočtu teplotního pole za těchto nestacionárních podmínek, byli bychom nuceni jej realizovat aplikací výpočetní techniky. Principálně však ve svaru probíhají tyto pochody:

- V první fázi se nejvíce tepla vyvine v místě styku plechů, kde odpor nabývá relativně nejvyšších hodnot, a to v ose svaru, kde je nejvyšší proudová hustota; tato přechodová oblast je tedy ve své podstatě plošný zdroj, z něhož se teplo odvádí kolmo na stykovou plochu do základního materiálu.
- V následující fázi dochází vlivem ohřevu k poklesu přechodového odporu na styku svařovaných plechů - viz obr. 7a), kdežto odpor ohřátého základního roste a tím se zvětšuje tloušťka vrstvy, v níž dochází k vybavování tepla. Za předpokladu, že je proudová hustota dostatečně velká, množství odváděného tepla je zlomkem tepla vybavovaného a dochází k natavení materiálu a tím ke vzniku svarové čochky.

Z výše uvedeného odstavce plyne, že mohou nastat dva nežádoucí stavy

- V prvním případě je proudová hustota nedostatečná a v daném čase je okolní materiál schopen odvádět teplo tak rychle, že nedojde ke vzniku svarové čochky a plechy se tak nesvaří, nýbrž pouze slepí (vznikne pouze tzv. difúzní spoj) (obr. 8c))
- V druhém případě je proudová hustota nadměrná, tekutý kov se průchodem proudu ohřeje na teplotu varu a přetlakem par a za současného tlaku svařovacích elektrod dojde k vystříknutí tekutého kovu. K erupci tekutého kovu dochází též často při vyšších odporech mezi elektrodami a plechy a při nedostatečném chlazení svařovacích elektrod, neboť dojde snadno k protrhnutí příliš tenké a přehřáté povrchové vrstvy. (obr. 8d))

Má-li mít svar požadovanou jakost, musí mít svarová čochka předepsanou velikost a toho lze docílit jedině optimalizací proudu a času (viz obr. 8a)).



Obr. 8 Optimalizace svařovacího času a proudu: [24]

- šrafovaná plocha znázorňuje oblast kvalitních bodových svarů
- závislost průměru svarové čochky na nominálním proudu  $I$  [A] a svařovacím čase  $t_s$  [s]
- při nedostatečném přívodu tepla je svarová čochka malá a plechy jsou slepené
- při nadměrném přívodu tepla dojde k erupci tekutého kovu



Diagramů znázorněných na obr. 8 se běžně používá tam, kde se kladou vysoké požadavky na kvalitu svarů a kde nejsou svařovací stroje vybaveny automatickým řízením času. (Nicméně jich lze použít i při automatické regulaci času - nastaví se podle nich optimální hodnoty proudu a času, mikroprocesor pak pouze koriguje odchylky způsobené např. změnami přechodového odporu, náhodným kolísáním proudu apod.)

Tyto diagramy se sestavují experimentálně pro každou kombinaci tloušťky plechu a pro každý materiál zvlášť. Sledujeme-li přísně hodnoty přechodového odporu a dbáme o řádnou údržbu hrotů elektrod, můžeme standardně dosáhnout dobrých výsledků co se týče průběhu svařování i jakosti zhotovených svarů.

### 1.3 Výhody a nevýhody tvrdého a měkkého režimu svařování

[1], [7], [10], [14], [16], [17], [19], [21], [24]

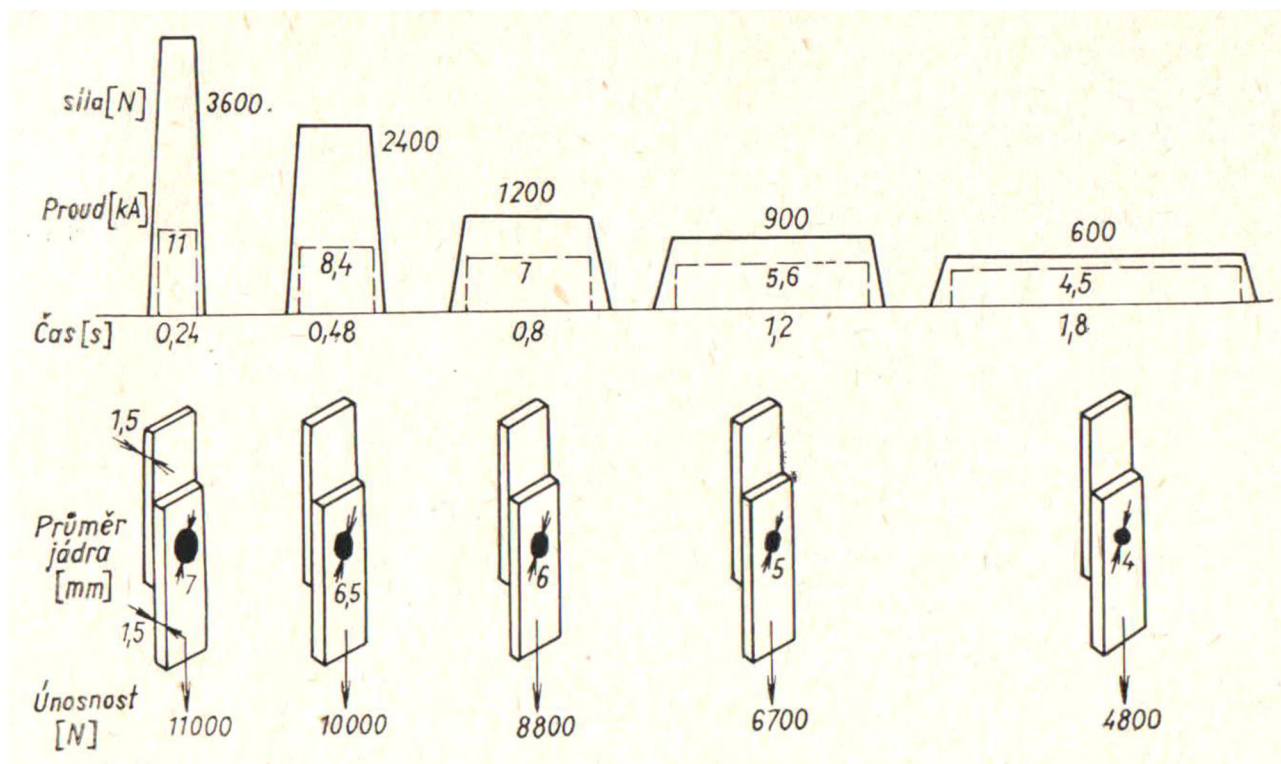
V předešlé kapitole jsem uvedl základní parametry, jež mají zásadní vliv na výslednou kvalitu svaru při bodovém odporovém svařování - jsou to:

- svařovací proud
- svařovací čas a tlak, který má vliv na velikosti přechodových odporů  $R_1$ ,  $R_5$  a  $R_3$

Z uvedeného Jouleova vztahu je patrné, že potřebné množství tepla lze získat použitím

- svařovacího proudu velké intenzity a velmi krátkého svařovacího času - mluvíme o tzv. tvrdém režimu, který zároveň vyžaduje vyšší přítlačnou sílu.
- svařovacího proudu malé intenzity a dlouhého svařovacího času - hovoříme o tzv. měkkém svařovacím režimu - zde se pracuje s nižší přítlačnou silou.

Srovnání únosnosti bodových svarů při různých svařovacích parametrech nabízí obr. 9.



Obr. 9 Rozměry a únosnosti bodových svarů při různých svařovacích parametrech u plechů z nízkouhlíkové oceli ( $C = 0,2\%$ ) [14], [17]

### 1.3.1 Měkký svařovací režim [1], [14], [17]

Pro měkký svařovací režim je charakteristický svařovací proud malé intenzity a dlouhý svařovací čas - pracujeme zde s nižší přítlačnou silou.

Svarová čočka zhotovená měkkým svařovacím režimem je relativně velmi vysoká - někdy zabírá celou hloubku svařovaných profilů a má hrubší dendritickou strukturu nevalných mechanických vlastností, která v případě, že svařujeme válcované plechy narušuje v značné míře jejich texturu. Svarová čočka má relativně malý průměr, což pouze zhoršuje únosnost spoje. Vzhledem k nízkým tlakům dochází vlivem velkých přechodových odporů k velkému vývinu tepla a hrozí výstřik roztaveného jádra svaru. Delší styk s vyšší teplotou pod povrchem kovu způsobuje značnou tepelnou námahu elektrod a v tom důsledku jejich kratší životnost. V případě, že se materiál ohřeje až po povrch, zanechávají elektrody v materiálu velká otačení. Malé tlakové síly nestačí zejména při svařování tuhých profilů, jako jsou například úhelníky. Z důvodu malé účinnosti a tepelných ztrát narůstá spotřeba energie, resp. množství energie, které musíme dodat.

Výhodou svařování měkkým režimem je možnost použití stroje nižšího výkonu a možnost používat elektrické vodiče menších průřezů, avšak za cenu horší jakosti svarového spoje. Je zde menší nebezpečí zakalení ocelí, naproti tomu se rozšiřuje tepelně ovlivněná oblast. Měkký režim se používá se pro svařování plechů se znečištěným povrchem, které nesnesou proudové přetížení - ovšem i zde na úkor kvality - dochází k větší deformaci, načež je mnohdy nutné tyto svařence následně rovnat, což pouze zvyšuje náklady na výrobu. Měkkým režimem dosáhneme nižší produktivity práce

### 1.3.2 Tvrdý svařovací režim [1], [10], [14], [17]

Při svařování tvrdým svařovacím režimem využíváme svařovacího proudu velké intenzity a velmi krátkého svařovacího času za současného působení vyšší přítlačné síly.

Z hlediska struktury materiálu vede krátkodobé působení svařovací teploty a s tím související rychlé chladnutí svaru k jemnozrnné struktuře svarového kovu, navíc docílíme minimálních napětí a deformací.

V moderní výrobě se klade důraz na vysokou jakost spojů a hospodárný svářecí provoz - z tohoto důvodu se v drtivé většině uplatňuje tvrdý režim. U bodových svářeček s kadencí několik stovek svarů za minutu jsou svařovací parametry obzvlášť tvrdé - vyžadují se vyšší výkony, vyšší přítlačné síly, silnější elektrické přípojky a přesně odměřované časy - řádově v periodách, což starší bodové svářečky nesplňují a jsou tedy pro svařování tvrdým režimem nevhodné.

## 1.4 Parametry bodového odporového svařování

### 1.4.1 Svařovací přitlačná síla [14], [17], [19]

Svařovací přitlačná síla je rovna součinu základního měrného tlaku a kontaktní plochy elektrody. Hodnoty měrného tlaku v různých případech bodového svařování jsou uvedeny v následující tabulce, resp. v tabulce 3.

Tab. 2 Hodnoty parametrů pro bodové svařování [10], [13], [17]

Tloušťka svařovaného plechu $s$ (mm)		do 1,5	1,5 až 5	
Průměr dosedací plochy svařovací elektrody $d$ (mm)		2s + 4		
Hustota svařovacího proudu ( $A \cdot mm^{-2}$ )	měkký režim	70 až 120		
	tvrdý režim	110 až 350		
Svařovací tlak ( $N \cdot mm^{-2}$ )	měkký režim	nízkouhlíkové oceli	---	15 až 40
		tvrdý režim	nízkouhlíkové oceli	15 až 50
		nerozavějí oceli	80 až 150	
		hliník a jeho slitiny	70 až 150	
		mosaz, bronz	90 až 100	
Svařovací čas (perioda) (s)	tvrdý režim	nízkouhlíkové oceli	8	
		nerozavějí oceli	6	
		hliník	5	

Svařovací tlak je volen s ohledem na rovinnost a čistotu svařovaných plechů tak, aby při menších nerovnostech bylo zajištěno jejich dosednutí a dokonalý průchod svařovacího proudu v místě svaru. Někdy je doporučováno určit svařovací sílu úměrně k tloušťce plechu  $s$ (mm) podle vztahu

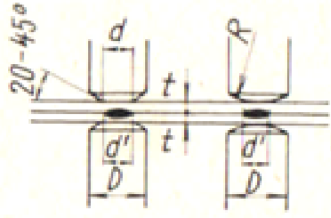
$$F_s = (1000 \text{ až } 2500)s \text{ [N]} \quad (6)$$

Svařujeme-li tuhé a zdeformované dílce, je třeba počítat s určitým zvýšením svařovací síly, přičemž však nesmí být překročena mez kluzu použitého elektrodového materiálu.

Správně nastavená přitlačná síla zabraňuje výstřiku roztaveného jádra svaru a při ochlazení působí jako kovací síla za tepla, což má vliv na zjemnění krystalizace. Z tohoto důvodu je přitlačná síla ke konci svařovacího procesu v rámci programově řízeného tlaku zvyšována a má působit tak dlouho, dokud teplota jádra svaru neklesne pod 400°C. Je-li to z hlediska produktivity práce možné, je výhodné ponechat svařované plechy i poté nějakou dobu stlačené - chlazené elektrody pomáhají odvést teplo z místa spoje a je tak docíleno nižších deformací. V takovém případě ovšem může nastat u ocelí s vyšším obsahem uhlíku k zakalení svaru, u nízkouhlíkových ocelí rychlejší ochlazení neškodí.

K dosažení nejkvalitnějších spojů jsou potřebné velké přitlačné síly, jejichž velikost lze v moderních strojích měnit i během svářecího cyklu.

Tab. 3 Parametry bodového svařování na jednofázových strojích pro tvrdý a měkký režim [14], [17]

Parametry bodového svařování na jednofázových strojích pro tvrdý (I) a měkký (II) režim													
					Tloušťka plechu	Svařovací síla		Svařovací proud		Svařovací čas			
						I	II	I	II	I	II		
Materiál plechu	D <sub>min</sub>	d	R	d'	s	F <sub>s</sub>		I <sub>s</sub>		t <sub>s</sub>			
	[mm]				[mm]	[N]		[kA]		[Per]			
nízkouhlíková ocel do 0,3% C	10	4	50	3,5	0,5	1 500	600	6,5	4	3	10		
	12	6	75	4,5	1,0	2 500	1 000	9	5	6	20		
	12	6	75	5,0	1,25	3 000	1 200	10	5,5	8	30		
	16	6	75	5,5	1,5	3 500	1 500	11	6	10	40		
	16	7	75	6,5	2,0	5 000	2 000	14	7	15	50		
	19	8	75	7,5	2,5	7 000	2 500	16	8	25	75		
	19	9	100	8,5	3,0	8 000	3 000	18	9	30	100		
	25	11	100	10,5	4,0	12 500	3 800	22	10	45	160		
	25	13	150	12,5	5,0	17 000	4 500	25	12	70	225		
	30	15	150	14,0	6,0	22 500	5 500	29	14	100	325		
nerezavějící ocel	16	4,0	50	3,5	0,5	1 750		3,8		4			
	16	4,5	75	4,0	0,75	3 000		6,0		5			
	16	5,0	75	4,5	1,0	4 000		7,6		7			
	19	6,0	75	5,5	1,5	6 500		11,0		10			
	19	7,0	100	6,5	2,0	9 000		14,0		13			
	19	7,5	100	7,0	2,5	12 000		16,0		16			
	19	8,5	100	8,0	3,0	15 000		18,0		19			
lehké kovy - průmyslová jakost svaru	16		50	3,5	3,0	0,5	1 800	1 400	18	16	5	6	
	16		50	4,0	3,5	0,75	2 300	1 600	24	18	6	7	
	16		50	4,5	4,0	1,0	2 500	1 800	30	21	7	8	
	19		100	50	5,5	5,0	1,5	3 200	2 400	35	25	9	10
	19		100	50	6,5	6,0	2,0	4 000	2 800	40	29	10	12
	19		100	50	7,5	7,0	2,5	5 200	3 400	49	33	11	13
	25		100	50	8,5	8,0	3,0	6 000	3 700	58	36	12	14

#### 1.4.2 Svařovací (sekundární) proud [14], [17], [19]

Z hlediska vzniku elektrického odporového tepla zaujímá proud (resp. intenzita proudu) v odporovém svařování prvořadý význam. V Joulově vztahu (1) vystupuje proud v druhé mocnině, zatímco ostatní členy jsou lineární.

Svařovací proud je nejčastěji regulován prostřednictvím přepínání odboček připojovače na primární straně transformátoru. Je-li na primární straně zařazeno méně závitů ( $z_1$ ), zvýší se sekundární napětí ( $U_2$ ) a při nezměněných odporech v sekundárním obvodu i proud.

Napětí na sekundární straně se tedy mění podle počtu zapojených závitů na straně primární -platí vztah:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{z_1}{z_2} \quad (7)$$

kde  $U_1$  - napětí na primární straně (zpravidla 380 V)  
 $U_2$  - napětí na sekundární straně  
 $z_1$  - počet závitů na primární straně  
 $z_2$  - počet závitů na sekundární straně (obvykle pouze jeden závit)

Z toho plyne, že pokud vložíme do sekundárního obvodu rozměrnější kus materiálu, změní se (v souladu s Ohmovým zákonem) hodnota svařovacího proudu.

Silnější materiály obecně způsobují vyšší odpory a vyžadují vyšší napětí. Následující tabulka znázorňuje hodnoty svařovacího času, proudu, a napětí mezi elektrodami (toto napětí neodpovídá sekundárnímu napětí  $U_2$ , které je obecně vyšší, neboť musí navíc překonat odpor vodičů a elektrod) při svařování plechů z nízkouhlíkových ocelí.

Tab. 4 Hodnoty svařovacího času, proudu a napětí mezi elektrodami při svařování plechů z nízkouhlíkových ocelí [7]

Tloušťka plechu [mm]	Čas průchodu svářecího proudu [s]	Svařovací proud [A]	Napětí mezi elektrodami [V]
1	0,1 až 0,5	10 500 až 6 800	1,30 až 0,85
2	0,4 až 1,0	12 100 až 9 900	1,33 až 1,09
3	0,6 až 1,4	15 700 až 12 900	1,34 až 1,10
4	0,8 až 2,0	19 200 až 15 600	1,35 až 1,10
5	1,0 až 2,2	21 900 až 18 000	1,38 až 1,13
6	1,2 až 2,5	24 700 až 19 500	1,43 až 1,13
7	1,4 až 2,8	27 600 až 23 000	1,49 až 1,24
8	1,6 až 3,0	30 600 až 26 500	1,53 až 1,32
9	1,7 až 3,5	33 800 až 28 400	1,59 až 1,34
10	2,0 až 4,0	36 400 až 30 600	1,60 až 1,35

Při určování jeho hodnoty vycházíme ze základní proudové hustoty a z kontaktní plochy elektrody. Pro orientační výpočet lze použít empirického vztahu, jenž určuje svařovací proud v poměru k tloušťce jednoho svařovacího plechu  $s$  [mm].

$$I_s = 6500 \cdot s \quad [\text{A}] \quad (8)$$

Svařujeme-li ušlechtilé oceli, lehké a barevné kovy, je třeba, aby svařovací síla a proud procházely během svařovacího cyklu různými změnami, nutnými z technologických důvodů.

### 1.4.3 Svařovací čas [14], [17], [19]

Svářecím časem označujeme čas průchodu svařovacího proudu svařovaným materiálem. Jeho délka závisí zejména na velikosti svářecího proudu - viz obr. 8a). Je-li to možné, používáme s ohledem na minimalizaci tepelných ztrát krátké svářecí časy (tedy tvrdý režim). V případě, že svařujeme dílce s deformovaným a znečištěným povrchem, je lépe pracovat s časy delšími, neboť by při krátkých časech a vysoké proudové hustotě mohlo dojít k přetavení spoje a vystříknutí tekutého kovu. (Viz obr. 8d.)

### 1.4.4 Časový průběh svařovacích parametrů (svařovací program) [7], [14], [17]

K tomu, abychom provedli jakostní bodový svar, je zapotřebí, aby na sebe svařované plechy řádně dosedaly - nejprve je tedy nutné dosáhnout požadovaného tlaku a poté s alespoň nepatrným zpožděním necháme materiálem procházet proud. Po skončení průchodu svařovacího proudu bychom měli plechy ponechat stlačené až do té doby, dokud se teplota jádra svarové čocky nesníží pod 400°C - tímto dosáhneme lepší kvality svarového spoje a zabráníme případnému porušení spoje pružností okolního stlačeného materiálu.

Do svařovacího programu můžeme též zařadit kovací tlak, který po ukončení procesu zjemní krystalizaci tuhnoucího kovu a zlepší jeho mechanické vlastnosti.

Další proces, který můžeme po ukončení samotného svařování provést je žihání. Toho dosáhneme snížením svářecího proudu na hodnotu proudu žihacího, který necháme po dobu žihání materiálem procházet. Účelem žihání je zpomalení chladnutí, což je důležité zejména u ocelí vyšších tříd, kde by se mohla při rychlém ochlazení vyskytnout martenzitická struktura vyznačující se vysokou tvrdostí a křehkostí.

V případě, že materiál necháme ztuhnout a to tak, že jeho teplota poklesne až pod teplotu překrystalizace, můžeme opětovným zvýšením teploty popustit zakalenou strukturu a nebo normalizačně žihat svar a okolní oblast, čímž zjemníme zrno.

### 1.4.5 Materiál elektrod [7], [19], [21]

Tuto podkapitolu rozvedeme pouze krátce, neboť volbu elektrod provádíme pouze s ohledem na svařovaný materiál.

Materiál elektrod:

- musí být dobře vodivý
- musí i za zvýšené teploty držet svůj tvar - tj. nedeformovat se
- nesmí vytvářet se svařovaným materiálem slitiny - jinak může nastat proces difúze, kdy se elektrody "lepí" a tím se poškozují

Jako vhodný materiál pro zhotovení elektrod se z hlediska elektrické vodivosti jeví čistá měď, ta má však nízkou teplotu změknutí a malou tvarovou pevnost - proto se používají slitiny na bázi mědi - pro nízkouhlíkové oceli např. slitina CuCr, pro legované materiály (koroziivzdorné oceli) např. slitina CuBrCo.

## 2 STRUKTURNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI BODOVÉHO SVARU

### 2.1 Makrostruktura bodového svaru [11], [18]

Chceme-li vyhovět zadání práce, je nyní zapotřebí se zaměřit na makrostrukturu bodového svaru. K tomu nám nejlépe poslouží obr. 10, kde jsou vyznačena jednotlivá pásma materiálu tepelně ovlivněného právě technologií bodového odporového svařování.

Vlastní svar, kde dochází k natavení materiálu, tvoří:

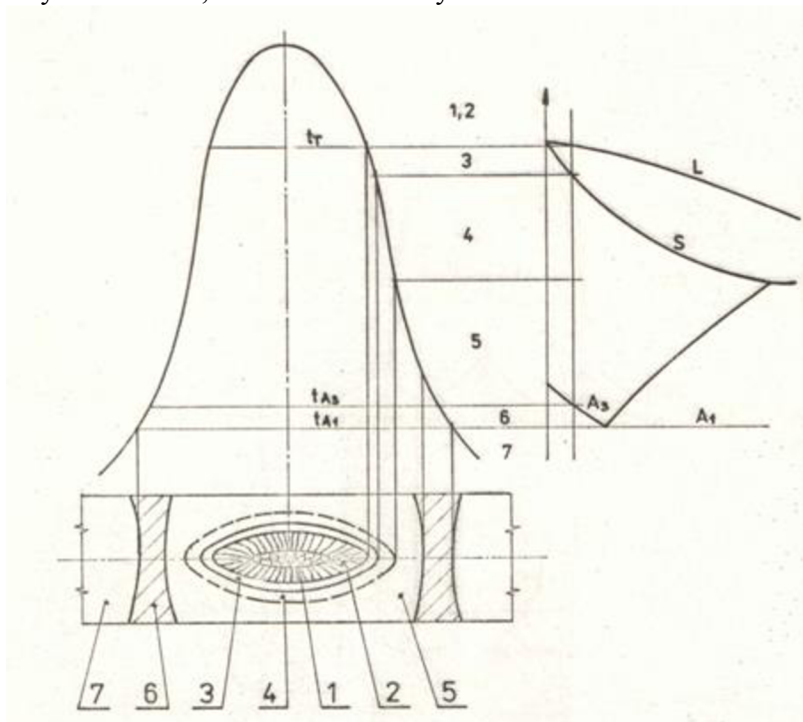
- pásmo 1 = vnitřní část, pro níž je typická struktura rovnoosých krystalů.
- pásmo 2 = oblast s orientovanou dendritickou strukturou vzniklou krystalizací.

Oblast natavení je obklopena:

- úzkou oblastí 3, kde došlo k chemickým reakcím v polotekutém a tuhém stavu - jedná se o oblast částečného natavení a dochází zde k migraci uhlíku případně k segregacím jednotlivých prvků.
- pásmem přehřátí 4 - jeho existence závisí na parametrech svařování - svařujeme-li tvrdým svařovacím režimem, je toto pásmo velmi úzké nebo dokonce metalograficky nezjistitelné.

Teplotám těsně nad  $A_3$  odpovídá oblast 5, jejíž struktura se zjemňuje normalizačním žiháním. V pásmu 6, jež je vymezeno teplotami  $A_1$  a  $A_3$ , se struktura stává zrnitou - vznikající perlit má tendenci se přeskupovat a shlukovat. Oblast 7 tvoří neovlivněný základní materiál. (Zdařilejší ilustraci najdete v příloze č.3)

Zjednodušeně můžeme říci, že oblast kde došlo k natavení materiálu je obklopena tepelně ovlivněnou oblastí, která se díky své hrubozrnnosti vyznačuje nevalnými mechanickými vlastnostmi. Je-li bodový svar přílišně namáhán, pak dojde k jeho porušení nejčastěji právě v této tepelně ovlivněné oblasti (dojde k vytržení svarové čočky) a to jak v materiálu svařovaném měkkým režimem, tak režimem tvrdým.



Obr. 10 Vliv teplotního působení procesu bodového svařování na strukturu svarové čočky [11] [L - likvidus (tavenina); S - solidus (tuhá fáze);  $t_T$  - teplota tavení základního svařovaného materiálu]

## 2.2 Mechanické zkoušky bodových svarů [3], [6], [7], [9], [14], [15] [19]

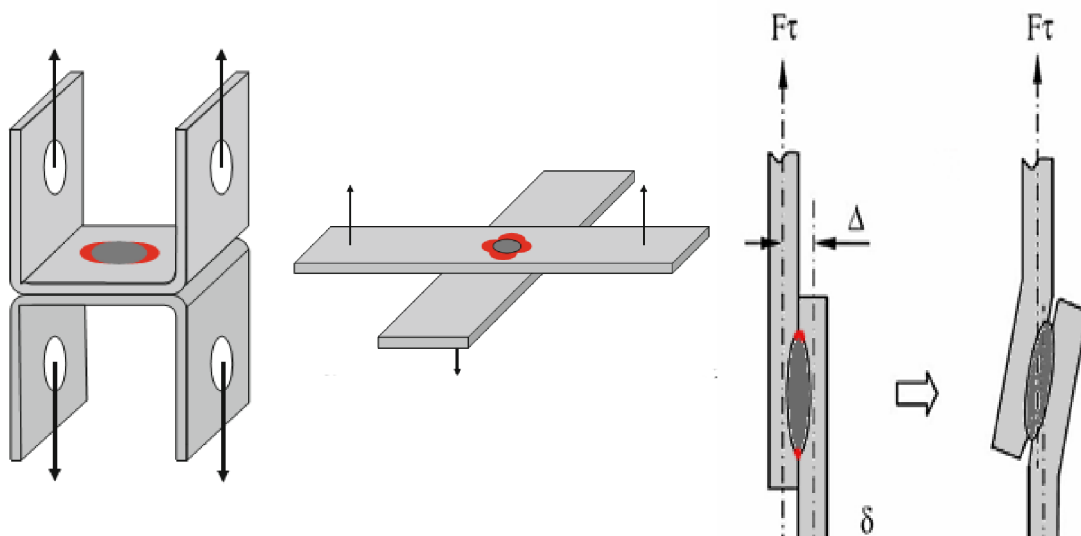
V celé této podkapitole budeme hovořit o zkouškách statických - tedy svary budou zatěžovány silami, jejichž velikost se bude postupně, velmi pomalu zvětšovat a to až do okamžiku přetržení zkušebního vzorku.

Mechanické zkoušky odporových svarů provádíme tak, aby:

- vystihovaly způsob namáhání svarů, který se bude v provozu nejčastěji vyskytovat
- nám poskytovaly určité kvantitativní srovnání (tedy aby výstupem byly číselné hodnoty, které můžeme dále porovnávat)
- byly kdykoli reprodukovatelné (tzn. abychom je mohli kdykoli za stejných podmínek opakovat)
- nebyly z hlediska samotného výkonu příliš náročné
- jejich provedení odpovídalo příslušné normě (všechny mechanické zkoušky, o kterých bude dále řeč, jsou normalizované)

Jednotlivé zkoušky bodových svarů můžeme rozlišit z hlediska způsobu zatěžování a tvaru zkušebního tělesa takto:

- Tahová U-zkouška - zkušebním tělesem je svařenec dvou U-profilů svařených k sobě čelem dle obr. 11a) jedním bodovým svarem. Při namáháním tahem vzniká okolo bodového svaru stříhové namáhání v rovině kolmé na povrch plechu po obvodě roztavené oblasti.
- Křížová zkouška tahem - zkušebním tělesem je kříž zhotovený ze dvou pásů plechů, jež jsou k sobě ve středu překrytí spojeny jedním bodovým svarem. (viz obr. 11b))
- Zkouška tahem na smyk - zkušebním tělesem jsou dva stejně orientované pásy plechu spojené jedním bodovým svarem uprostřed přeplátování (viz obr. 11c)). Zkouška se provádí na trhacím stroji - jedná se tedy o zkoušku tahem, ovšem samotný svar, resp. okolí svaru je namáháno převážně na smyk. Na obr. 12 je znázorněno, jakým způsobem se může dojít k přetržení zkušebního tělesa. V případě, že dojde porušení ve svaru nebo jeho blízkosti, je potřeba přeměřit rozměr svarové čočky (rozměry svarových čoček - je-li jich více) přeměřit a z těchto naměřených hodnot a z hodnot získaných tahovou zkouškou posoudit mechanické vlastnosti svaru (popřípadě i vhodnost rozmístění bodových svarů, je-li jich více).



Obr. 11 a) Tahová U-zkouška; b) Křížová zkouška tahem; c) Zkouška tahem na smyk [9], [15]



Provádíme-li smykovou zkoušku vícebodového svaru, je nutné pamatovat na skutečnost, že kvalitu jednotlivých svarů mohly ovlivnit ztrátové proudy protékající již přes hotové body. Z důvodu minimalizace těchto vlivů má zhotovování jednotlivých bodů své předepsané pořadí.

Smyková pevnost je závislá na těchto parametrech:

- průměr a provaření svaru
- tloušťka svařovaného materiálu
- pevnost svařovaného materiálu
- stav svařovacích elektrod, jimiž bylo svařování prováděno
- přítomnost trhlin a dalších vad ve svaru a jeho okolí

Pro výpočet smykové pevnosti svaru můžeme použít dle normy ČSN EN ISO 14373 následující vztah:

$$\tau = 6,2 \cdot s \cdot d' \cdot R_m \quad (9)$$

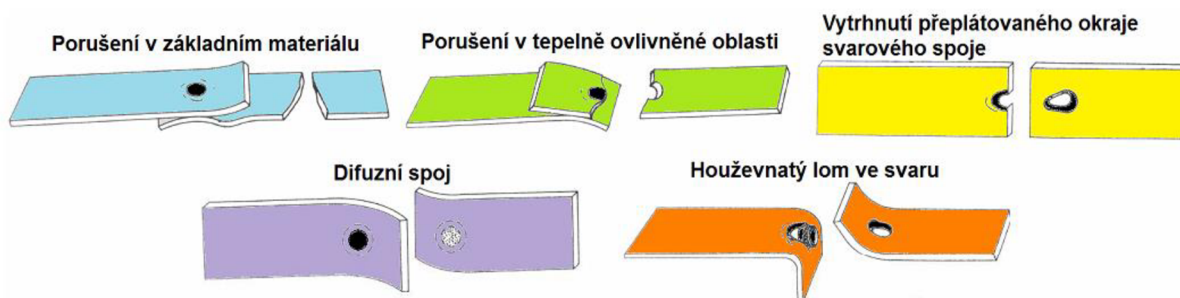
kde  $\tau$  - smyková pevnost [N]

s - tloušťka plechu [mm]

d' - průměr svaru [mm]

R<sub>m</sub> - mez pevnosti v tahu svařovaného materiálu [MPa]

K porušení celistvosti svařence vlivem smykové zkoušky může dojít způsobů znázorněnými na obr. 12. (Pozn.: Namísto pojmu „houževnatý lom“ je z hlediska vizuálního posuzování jeho povrchu vhodnější používat termínu „tvárný lom“. Houževnatost je vlastnost daného materiálu - je to míra odolnosti vůči iniciaci trhliny/defektu a jeho šíření.)



Obr. 12 Způsoby porušení celistvosti svařence vlivem smykové zkoušky [19]

Mimoto bodové svary můžeme zkoušet ještě na krut - z hlediska krutu ovšem bodové svary nevykazují příliš vysokou pevnost. Další možností je zkouška tvrdosti - tato zkouška je výhodná z hlediska snadné a nedestruktivní realizovatelnosti. Všechny tyto zkoušky jsou kvantitativní - jejich výstupem jsou numericky popsané závislosti. Mimo tyto existují i zkoušky neposkytující číselné údaje, jako např. zkouška odlupováním, sekáčová apod. Těmito se však v této práci nebudeme zabývat.

Při zhotovování jakýchkoli zkušebních těles se přirozeně neopomenou všechny potřebná technologická opatření, jež jsou důležitá z hlediska zabezpečení dokonalého svaru (- jedná se např. o očištění povrchů plechů, technický stav svařovacích elektrod apod.) a volí se osvědčené svařovací parametry, které navíc podléhají přísné kontrole. Z toho plyne, že budeme-li zkoušet mechanické vlastnosti svarů ať již v závislosti na průměru svarové čočky, tak v závislosti na počtu a rozmístění bodových svarů, nebudeme zohledňovat kvalitu zhotovených bodových svarů.

### 3 EXPERIMENT

Součástí této bakalářské práce je experiment - jedná se o zkoušku tahem na smyk (princip zkoušky - viz kap. 2.2).

Zkušebními vzorky budou plechy z nízkouhlíkové oceli svařené jedním, dvěma resp. třemi bodovými svary (viz obr. 13) za těchto podmínek:

- ✓ Svařovací zařízení: Tecna typ 4603N
- ✓ Výkon: 48kVA
- ✓ Svařovací proud : 11 kA
- ✓ Celkový svařovací čas: 40 period (jedna perioda = 20 ms)

(Podrobnější popis svářecího stroje - viz přílohu č.5)



Obr. 13 Zkušební vzorky pro zkoušku tahem na smyk

Svary byly zhotovovány jak paralelně (tedy vedle sebe), tak sériově (tedy za sebou). Naším cílem je tedy stanovit pevnost v závislosti na počtu svarů a jejich vzájemné poloze.

Pozn.: Vzorky byly označeny takto: číslo vzorku/počet svarů - s=sériově resp. p=paralelně.

#### 3.1 Realizace experimentu

Experiment byl realizován na hydraulickém zkušebním stroji ZD40, který umožňuje provádění tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálu do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Přístroj je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60. (Přesnější specifikace zkušebního stroje a řídicí jednotky najdete v příloze č.1)

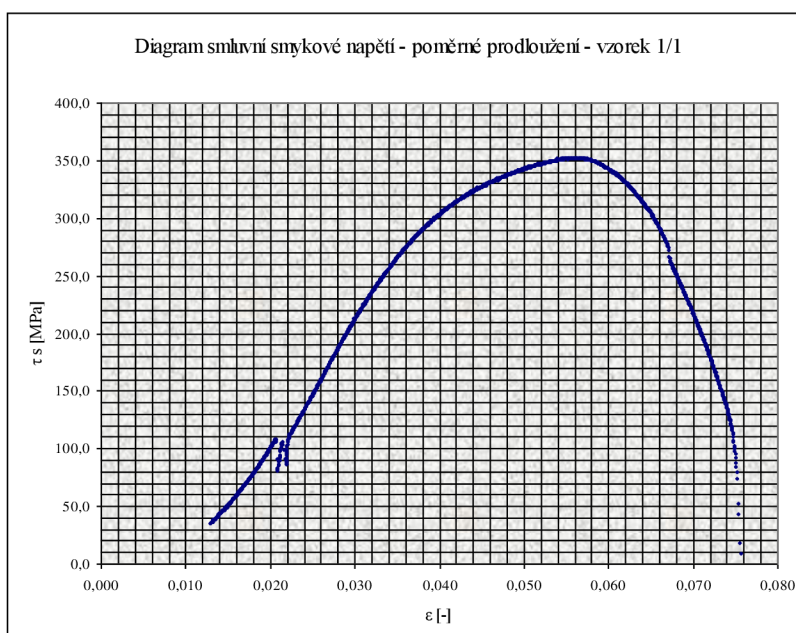


Obr. 14 Průběh tahové zkoušky

Vzorky tedy byly uchyceny do zkušebního stroje (viz obr. 14) a postupně zatěžovány - průběh byl snímán a zaznamenáván. Z těchto dat byly následně vykresleny závislosti tahového/smykového smluvního napětí (tj. napětí vztahovanému na původní průřez - ať už se jednalo o průřez vzorku nebo o průřez svaru) na poměrném prodloužení.

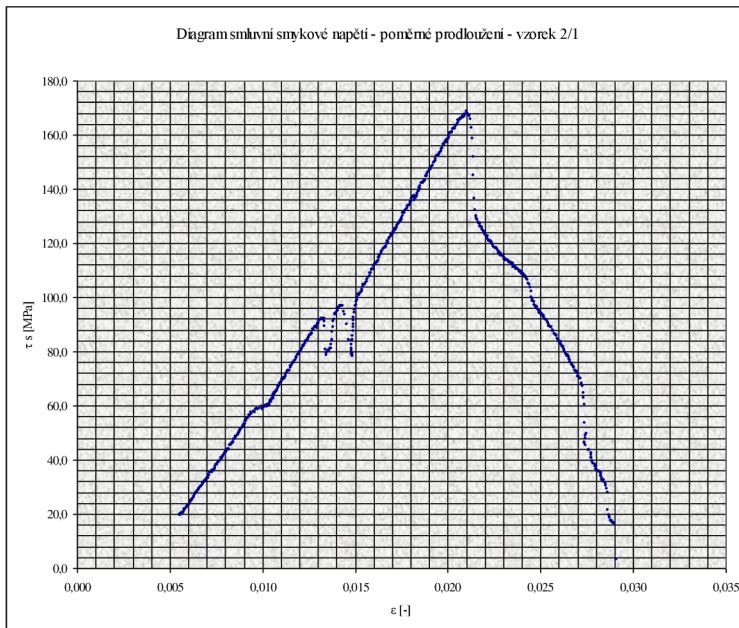
Nutno podotknout, že zejména v případě jednobodových svarů, případně svarů dvoubodových paralelních se nejednalo o čistě smykové namáhání, neboť se jedná o namáhání kombinované (svařenec se deformoval dle obr. 11c)) - my jsme však pro jednoduchost předpokládali, že se jedná zatěžování smykem a tudíž byly z naměřených dat vykresleny závislosti smykového napětí na poměrném prodloužení.

Vstupní parametry: rozměry svařence - počáteční délka  $L_0 = 80 \text{ mm}$ ,  
šířka a tloušťka plechu  $a = 25 \text{ mm}; s = 2 \text{ mm}$   
průměr svarových čoček  $d' = 6 \text{ mm}$



Obr. 15 Vzorek 1/1  
(jednobodový svar)

- ✓ porušení tvárným lomem ve svaru
- ✓ mez pevnosti ve smyku:  $\tau_m = 352 \text{ MPa}$

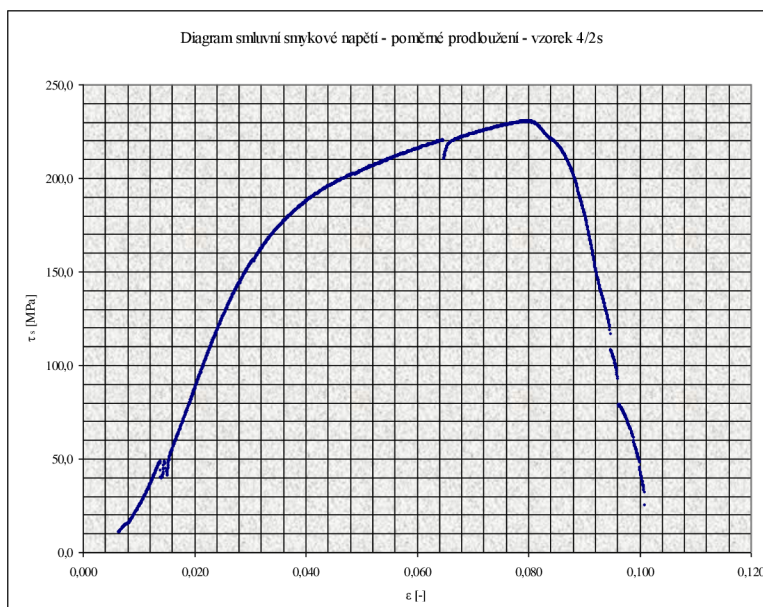
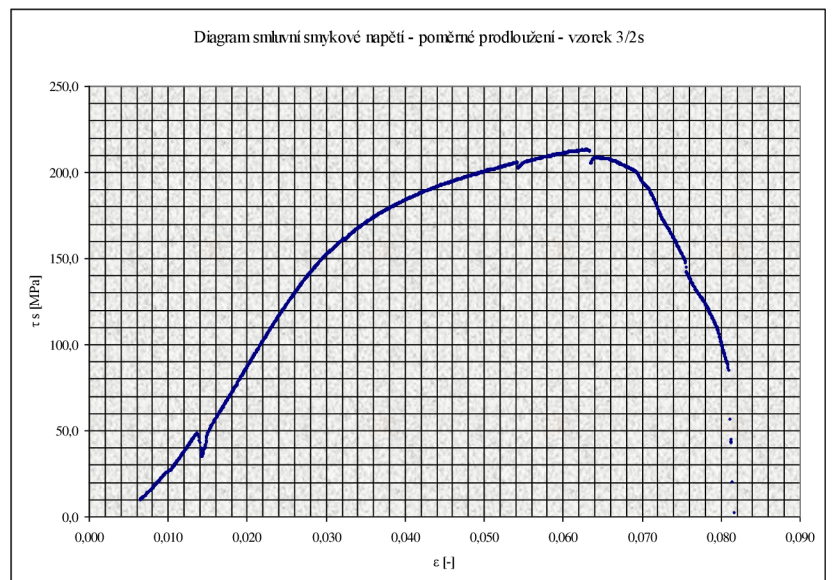


Obr. 16 Vzorek 2/1  
(jednobodový svar)

- ✓ porušení tvárným lomem ve svaru
- ✓ mez pevnosti ve smyku:  $\tau_m = 169 \text{ MPa}$

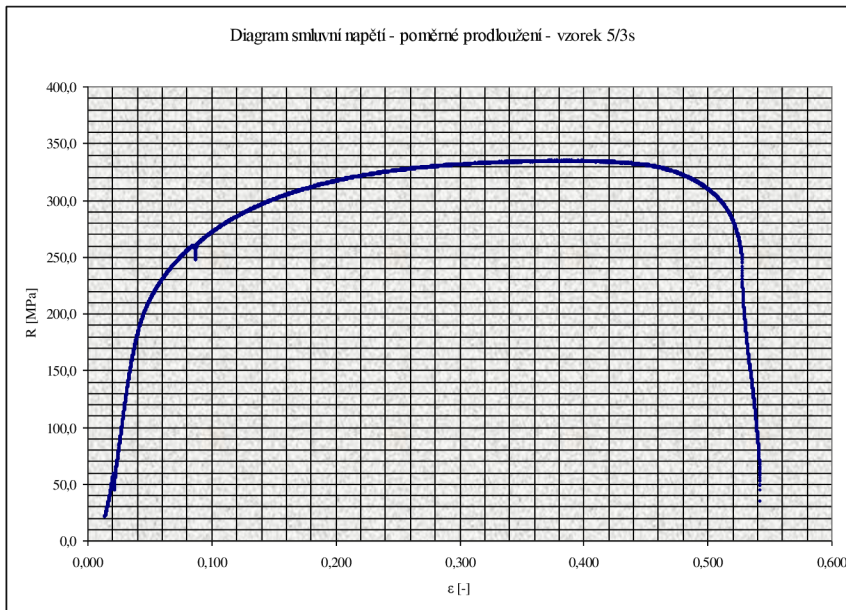
Obr. 17 Vzorek 3/2s  
(dvoubodový svar - sériový)

- ✓ porušení tvárným lomem ve svaru
- ✓ mez pevnosti ve smyku:  $\tau_m = 213 \text{ MPa}$



Obr. 18 Vzorek 4/2s  
(dvoubodový svar - sériový)

- ✓ porušení tvárným lomem ve svaru
- ✓ mez pevnosti ve smyku:  $\tau_m = 230 \text{ MPa}$

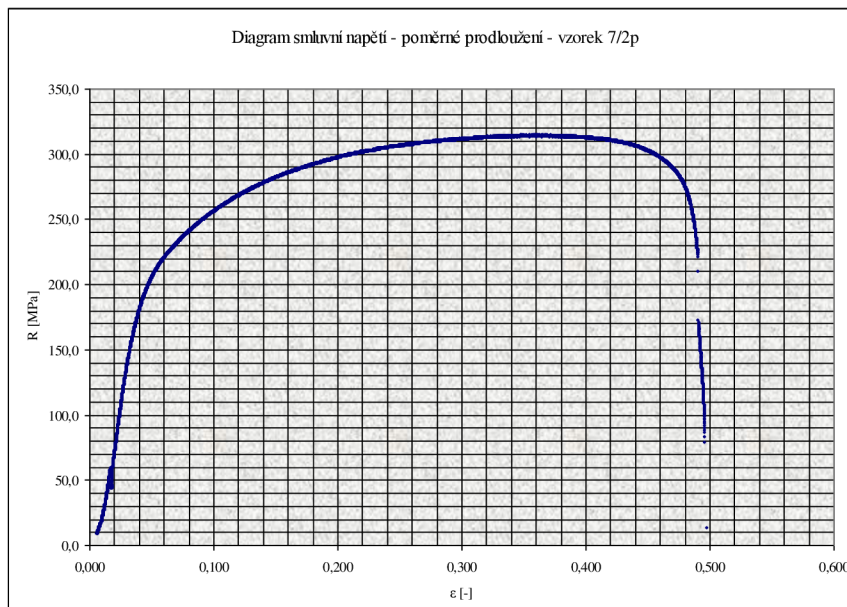
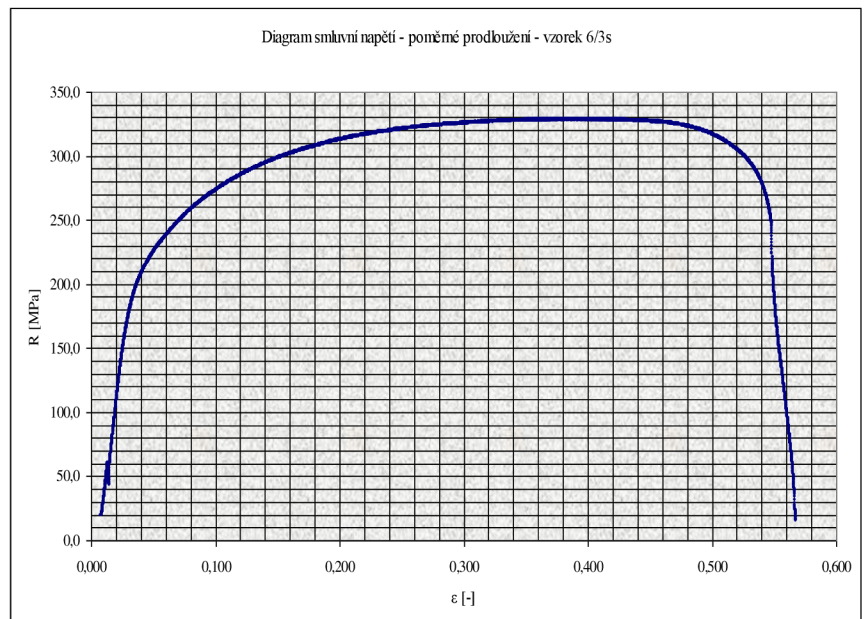


Obr. 19 Vzorek 5/3s  
(tříbodový svar - sériový)

- ✓ porušení tvárným lomem v základním materiálu
- ✓ mez pevnosti v tahu:  $R_m = 335 \text{ MPa}$

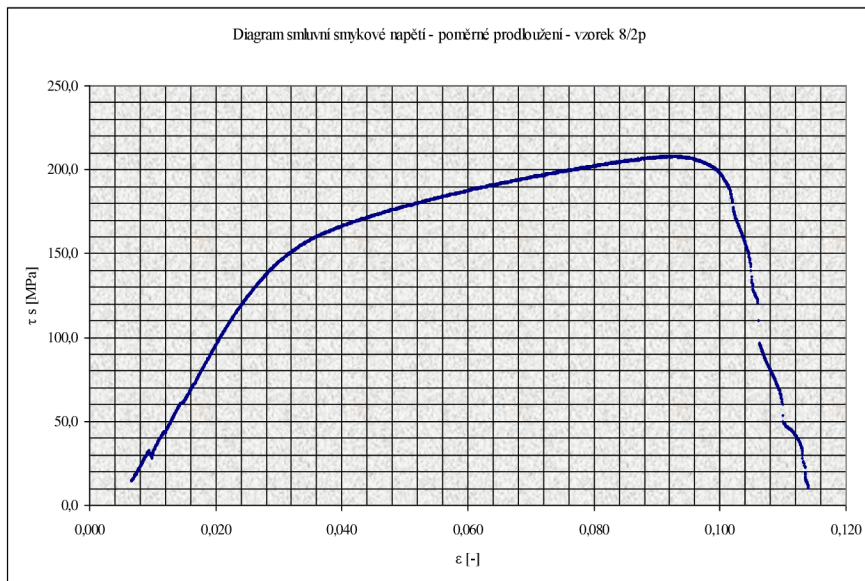
Obr. 20 Vzorek 6/3s  
(tříbodový svar - sériový)

- ✓ porušení tvárným lomem v základním materiálu
- ✓ mez pevnosti v tahu:  $R_m = 329 \text{ MPa}$



Obr. 21 Vzorek 7/2p  
(dvoubodový svar - paralelní)

- ✓ porušení tvárným lomem v základním materiálu
- ✓ mez pevnosti v tahu:  $R_m = 314 \text{ MPa}$

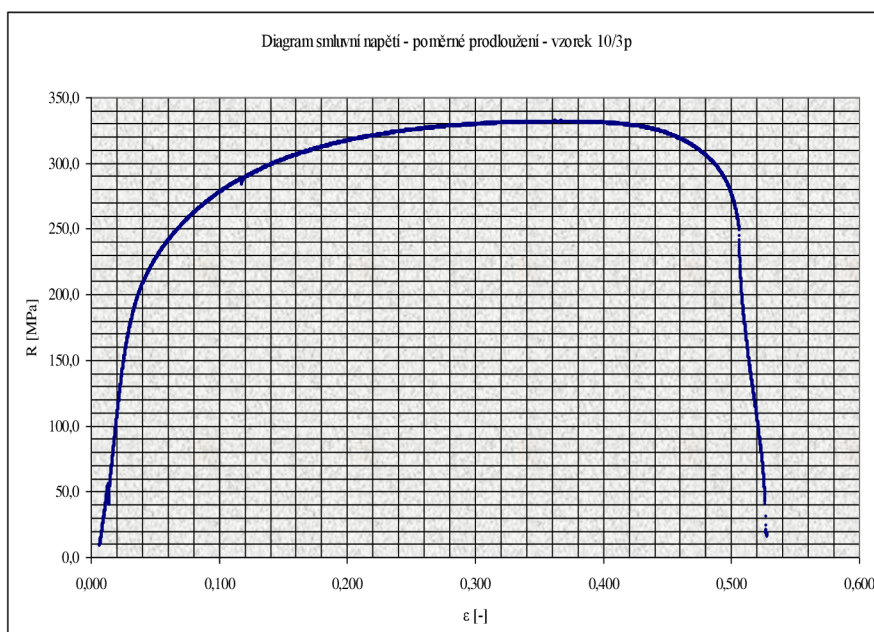
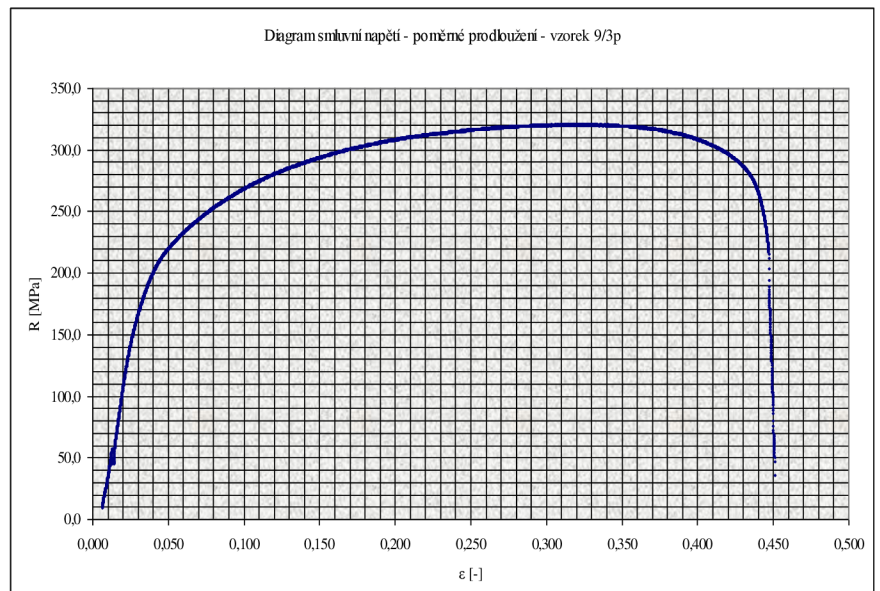


Obr. 22 Vzorek 8/2p  
(dvoubodový svar  
- paralelní)

- ✓ porušení tvárným lomem ve svaru
- ✓ mez pevnosti ve smyku:  
 $\tau_m = 208 \text{ MPa}$

Obr. 23 Vzorek 9/3p  
(třibodový svar  
- paralelní)

- ✓ porušení tvárným lomem v základním materiálu
- ✓ mez pevnosti v tahu:  
 $R_m = 320 \text{ MPa}$



Obr. 24 Vzorek 10/3p  
(třibodový svar  
- paralelní)

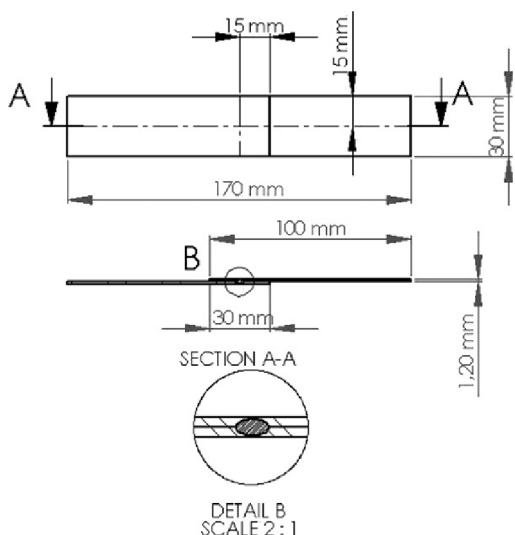
- ✓ porušení tvárným lomem v základním materiálu
- ✓ mez pevnosti v tahu:  
 $R_m = 332 \text{ MPa}$

### 3.2 Vyhodnocení experimentu [2], [19]

Celkové grafické srovnání všech trhacích zkoušek najdete v příloze č.5. Provedená měření potvrdila kvalitu svarů zhotovených tvrdým svařovacím režimem - ve všech případech, kdy došlo k porušení svaru, se jednalo o tvárný lom, nikoli o vylomení svaru z tepelně ovlivněné oblasti.

V případě dvoubodových svarů hovoří mechanické vlastnosti spíše ve prospěch paralelního uspořádání, nicméně výsledky zkoušky osmého vzorku nejsou příliš přesvědčivé. U třibodových svarů nemůžeme takto rozhodnout, neboť se dříve porušil základní materiál. Nejdůležitějším poznatkem však je, že zhotovení dvou (tří) svarů neznamená dvojnásobné (trojnásobné) zvýšení pevnosti oproti jednobodovému svaru.

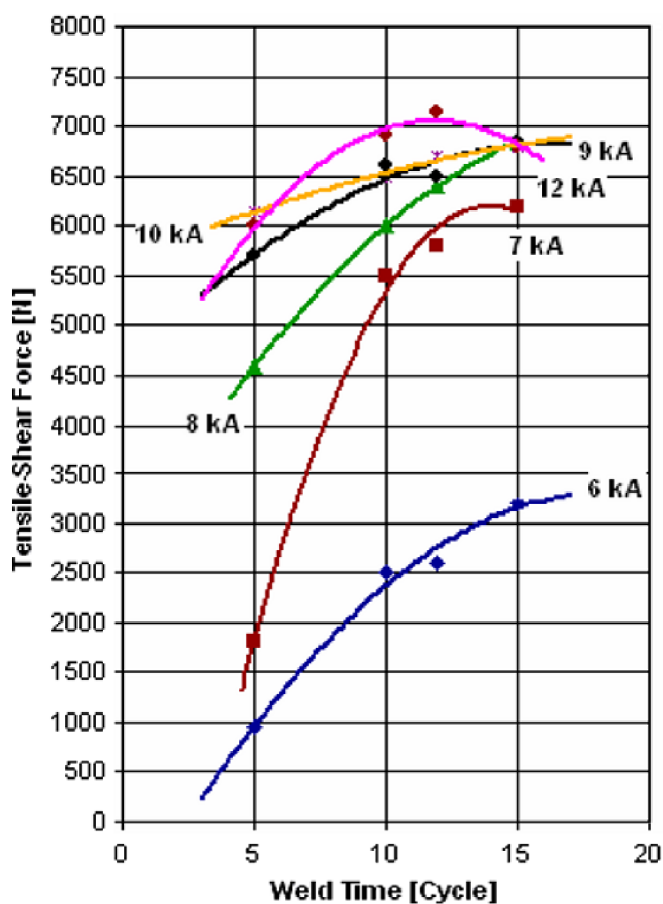
Výsledky našeho pokusu můžeme doplnit daty získanými obdobným pokusem. Zkušební svařence použité pro tento experiment byly zhotoveny z pozinkovaného chromem mikrolegovaného ocelového plechu (viz obr. 25 a 26), přičemž k jejich (jednobodovému) svaření bylo použito různých svařovacích proudů. Následně byla provedena zkouška tahem na smyk a vyhodnocena velikost zátěžné smykové síly v závislosti na svařovacím čase pro různé hodnoty svařovacího proudu (viz obr. 27). Výsledky opět hovoří ve prospěch tvrdého režimu svařování.



Obr. 25 Rozměry použitých vzorků [2]



Obr. 26 Zkušební vzorek z pozinkovaného plechu [2]



Obr. 27 Graf znázorňující velikosti smykové síly v závislosti na svařovacím čase pro různé hodnoty svařovacího proudu [2]

## 4 ZÁVĚRY

O bodovém odporovém svařování hovoříme tehdy, když svařovaným materiálem vloženým mezi dobře vodivé elektrody připojené na svařovací transformátor, necháme procházet elektrický proud, přičemž vývin tepla a s tím spojený ohřev svařovaných součástí na svařovací teplotu přednostně v místě jejich styku, je způsoben elektrickým odporem.

Základním vztahem popisujícím množství takto vyvinutého tepla je Jouleův zákon který říká, že množství tepla dodaného do svaru bude tím větší, čím bude větší svařovací proud, delší svařovací čas a menší přitlačná síla svařovacích elektrod (tedy větší přechodové odpory na styčné ploše svařovaných materiálů a na styčné ploše mezi materiálem a elektrodami), přičemž je nutno mít na paměti, že celkový odpor je časově závislá veličina a v průběhu svařování se mění.

Z hlediska velikosti svařovacího proudu, času a přitlačné síly rozlišujeme tyto dva režimy svařování:

- ✓ Měkký režim - vyznačuje se menšími svařovacími proudy, nižší přitlačnou silou a delším svařovacím časem. Použitím tohoto režimu docílíme svaru s hrubší dendritickou strukturou, která zejména u válcovaných plechů může narušit strukturu původní. Na tuto hrubou strukturu svaru přiléhá hrubozrnná tepelně ovlivněná oblast s nevalnými mechanickými vlastnostmi, přičemž tato oblast není u tohoto režimu svařování zrovna zanedbatelná.
- ✓ Tvrdý režim - zde pracujeme s vyššími proudy, vyšší přitlačnou silou a kratším svařovacím časem. Tímto režimem dosáhneme jemnozrnné struktury svarového kovu, minimalizace velikosti tepelně ovlivněné oblasti a minimalizace napětí a deformací.

Jakost svarové čocky závisí rovněž na časovém průběhu svařovacích parametrů, jejímž správným nastavením můžeme docílit mechanicky kvalitnější struktury bodového svaru.

V námi provedeném experimentu byla zkoumána pevnost bodových svarů v závislosti na jejich počtu a vzájemné poloze. Dospěli jsme k závěru, že zhotovení n-svarů, tedy n-zvýšení průřezu svaru, neznamena n-zvýšení pevnosti. Provedená měření pouze potvrdila naše tvrzení o kvalitě svarů zhotovených tvrdým svařovacím režimem, neboť ve všech případech, kdy došlo k porušení svaru, se jednalo o tvárný lom ve svaru, nikoli o vylomení svaru z tepelně ovlivněné oblasti, ke kterému dochází jak v případě měkkého režimu tak v případě režimu tvrdého nejčastěji.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001, 394 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
2. ASLANLAR, S., A. OGUR, U. OZSARAC, E. ILHAN a Z. DEMIR. Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding. *Materials* [online]. 2007, **28**(1), 2-7 [cit. 2016-05-24]. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.06.022. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306905001810>
3. BARTOŠEK, Petr. *Využití bodového svařování ve strojírenském průmyslu*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Mendelova universita v Brně. Vedoucí práce Ing. Jirí Votava, Ph.D.
4. ČAPEK, Karel. *Hovory s T.G.M.* V nakl. Fragment 1. vyd. Praha: Fragment, 2009. ISBN 978-80-253-0752-6.
5. DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
6. GREGOR, Vladimír a Oskár IŽDINSKÝ. *Skúšky zvaraných spojov*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1961. Knižnica Výskumného ústavu zvaračského v Bratislave.
7. HOLÁSEK, Ján. *Odporové zvaranie*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1968, 381 s.
8. HONZÍK, Emilián. *Odporové svařování: sborník výtahů z referátů výzkumníků a praktiků*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.
9. KRAJCARZ, Florent, Anne-Françoise GOURGUES-LORENZON, Emmanuel LUCAS a André PINEAU. Fracture toughness of the molten zone of resistance spot welds. *International Journal of Fracture* [online]. 2013, **181**(2), 209-226 [cit. 2016-05-24]. DOI: 10.1007/s10704-013-9836-1. ISSN 0376-9429. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10704-013-9836-1>
10. KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. Praha: Scientia, c1998, 246 s. ISBN 80-718-3054-2.
11. KUNCIPÁL, Josef. *Speciální technologie*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1988, 254 s.
12. KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 265 s.
13. KUNCIPÁL, Josef. *Teorie a technologie svařování, svařovací stroje a zařízení*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1980, 263 s.
14. LIPA, Milan. *Bodové a švové zvaranie*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1966, 341 s. Knižnica Výskumného ústavu zvaračského v Bratislave.
15. LUO, Yi, Wan RUI, Xiaojian XIE a Yang ZHU. Study on the nugget growth in single-phase AC resistance spot welding based on the calculation of dynamic resistance. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2016, **229**, 492-500 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.006. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013615301606>

16. MESSLER, R. W. *Principles of welding*. New York, USA, 1999, 662 s. ISBN 0-471-25376-6.
17. PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975, 265, [1] s. Řada strojírenské literatury.
18. SAHA, Dulal Chandra, InSung CHANG a Yeong-Do PARK. Heat-affected zone liquation crack on resistance spot welded TWIP steels. *Materials Characterization* [online]. 2014, **93**, 40-51 [cit. 2016-05-24]. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.03.016. ISSN 10445803. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044580314000941>
19. STEINER, Jaromír. *Pevnost bodového spoje v měkkém a tvrdém režimu svařování*. Brno, 2015, 66 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.
20. *Nejvýznamnější vlastnosti průmyslových robotů R-2000* [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/stránka-filtru-robotů/řada-r-2000>
21. *ASM Handbook: Welding, Brazing and Soldering*. Vol. 6. USA: ASM, 2003, 1298 s. ISBN ISBN 0-87170-382-3.
22. *CITACE PRO: Generátor citací* [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
23. *SPOT WELDING / ASSEMBLY – DETAIL* [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [http://www.deltec-inc.com/?page\\_id=222](http://www.deltec-inc.com/?page_id=222)
24. ŽÁK, Jan a Miroslav NOVÁK. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Brno: Vysoké učení technické, 1988, 142 s.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
$A_1$	Teplota eutektoidní přeměny	[°C]
$A_3$	Teplota přeměny feritu na austenit	[°C]
$a$	Šířka plechu	[mm]
$D_{\min}$	Minimální průměr svařovací elektrody	[mm]
$d$	Průměr dosedací plochy svařovací elektrody	[mm]
$d'$	Průměr svarové čočky	[mm]
$dt$	Diferenciál času	[s]
$F$	Přítlačná svařovací síla	[N]
$F_s$	Svařovací síla	[N]
$I$	(Nominální) Elektrický proud	[A]
$I_s$	Svařovací proud	[A]
$L_o$	Počáteční délka	[mm]
$p$	Měrný tlak	[MPa]
$Q$	Jouleovo teplo	[J]
$Q_i$	Jouleovo teplo v dané oblasti	[J]
$R$	Poloměr zaoblení svařovací elektrody	[mm]
$R_1, R_5$	Přechodový odpor na styku elektrod a materiálu	[Ω]
$R_2, R_4$	Vlastní odpor svařovaného materiálu	[Ω]
$R_3$	Přechodový odpor svařovaných materiálů	[Ω]
$R_i$	Odpor příslušné oblasti	[Ω]
$R'_1$	Konstanta vyjadřující přechodový odpor za měrného tlaku 100 kPa	[Ω]
$\Sigma R$	Celkový odpor materiálu	[Ω]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$s$	Tloušťka svařovaného materiálu	[mm]
$t_s$	Svařovací čas	[s]
$t_T$	Teplota tavení základního svařovaného materiálu	[°C]
$U_1$	Napětí na primární straně transformátoru	[V]
$U_2$	Napětí na sekundární straně transformátoru	[V]
$z_1$	počet závitů na primární straně transformátoru	[-]
$z_2$	počet závitů na sekundární straně transformátoru	[-]
$\alpha$	součinitel charakterizující kvalitu povrchu v místě dotyku	[-]
$\varepsilon$	poměrné prodloužení	[-]
$\tau$	skutečná pevnost	[N]
$\tau_m$	mez pevnosti ve smyku	[MPa]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Aplikace bodového odporového svařování v praxi [19], [22].....	9
Obr. 2 Metody tlakového odporového svařování [5].....	10
Obr. 3 Bodové odporové svařování [24] .....	11
Obr. 4 Přímé bodové svařování [14], [17].....	12
Obr. 5 Nepřímé bodové svařování (vždy v sériovém zapojení) [14] [17].....	13
Obr. 6 Vícebodové svařování [14], [17] .....	13
Obr. 7 Změna odporu v závislosti: a) na teplotě b) na čase svařování [24].....	15
Obr. 8 Optimalizace svařovacího času a proudu [24].....	16
Obr. 9 Rozměry a únosnosti bodových svarů při různých svařovacích parametrech u plechů z nízkouhlíkové oceli (C = 0,2%) [14], [17] .....	17
Obr. 10 Vliv teplotního působení procesu bodového svařování na strukturu svarové čočky [11] .....	23
Obr. 11 a) Tahová U-zkouška; b) Křížová zkouška tahem; c) Zkouška tahem na smyk [9], [15].....	24
Obr. 12 Způsoby porušení celistvosti svařence vlivem smykové zkoušky [19].....	25
Obr. 13 Zkušební vzorky pro zkoušku tahem na smyk .....	26
Obr. 14 Průběh tahové zkoušky .....	27
Obr. 15 Vzorek 1/1 (jednobodový svar) .....	27
Obr. 16 Vzorek 2/1 (jednobodový svar) .....	28
Obr. 17 Vzorek 3/2s (dvoubodový svar - sériový) .....	28
Obr. 18 Vzorek 4/2s (dvoubodový svar - sériový) .....	28
Obr. 19 Vzorek 5/3s (tříbodový svar - sériový).....	29
Obr. 20 Vzorek 6/3s (tříbodový svar - sériový).....	29
Obr. 21 Vzorek 7/2p (dvoubodový svar - paralelní).....	29
Obr. 22 Vzorek 8/2p (dvoubodový svar - paralelní).....	30
Obr. 23 Vzorek 9/3p (tříbodový svar - paralelní).....	30
Obr. 24 Vzorek 10/3p (tříbodový svar - paralelní) .....	30
Obr. 25 Rozměry použitých vzorků [2] .....	31
Obr. 26 Zkušební vzorek z pozinkovaného plechu [2].....	31
Obr. 27 Graf znázorňující velikosti smykové síly v závislosti na svařovacím čase pro různé hodnoty svařovacího proudu [2] .....	31

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hodnoty součinitele $\alpha$ v závislosti na druhu materiálu [17].....	15
Tab. 2 Hodnoty parametrů pro bodové svařování [10], [13], [17] .....	19
Tab. 3 Parametry bodového svařování na jednofázových strojích pro tvrdý a měkký režim [14], [17] .....	20
Tab. 4 Hodnoty svařovacího času, proudu a napětí mezi elektrodami při svařování plechů z nízkouhlíkových ocelí [7] .....	21

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/
- Příloha 2 Průběhy dynamických odporů v čase [15]
- Příloha 3 Makrostruktura bodového svaru [18]
- Příloha 4 Odporový svařovací stroj a jeho parametry
- Příloha 5 Orientační srovnání všech tahových zkoušek