

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

fakulta strojní



Habilitační práce

1998

Ing. Heinz Neumann, CSc

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ
Katedra strojírenské metalurgie



BODOVÉ ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ OCELOVÝCH PLECHŮ S POVLAKY

h a b i l i t a č n í p r á c e

obor strojírenská technologie
23 - 07 - 8

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146071349

Ing. Heinz Neumann, CSc

Liberec 1998

OBSAH

SEZNAM HLAVNÍCH POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	2
1. ÚVOD.....	4
2. FYZIKÁLNÍ PODSTATA A CHARAKTERISTIKA SVAŘOVACÍHO PROCESU.....	7
2.1 Odporový ohřev a souvislosti hlavních fyzikálních dějů během svařovacího procesu	7
2.2 Teplotní a elektrické pole u bodového svařování.....	11
2.3 Deformační procesy u bodového svařování.....	16
2.4 Modelování procesu bodového svařování.....	17
2.5 Elektrické veličiny svařovacího procesu a jejich souvislosti	23
3. ODPOROVÁ SVAŘITELNOST OCELOVÝCH PLECHŮ S POVLAKY	29
3.1 Bodová odporová svařitelnost - základní pojmy.....	29
3.2 Kvalita bodových odporových svarů	32
3.2.1 Metodické postupy hodnocení kvality odporových bodových svarů.....	35
3.2.2 Hodnocení kvality odporových bodových svarů plechů s povlaky - postupy aplikované autorem práce.....	42
3.3 Elektrodotové materiály a charakteristika jejich základních vlastností	55
3.4 Životnost elektrod - základní pojmy a faktory ovlivňující životnost	59
3.4.1 Metodické postupy stanovení životnosti elektrod.....	69
3.4.2 Metodické postupy hodnocení životnosti elektrod při svařování plechů s povlaky aplikované autorem práce.....	79
4. BODOVÉ ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ OCELOVÝCH PLECHŮ S POVLAKY.....	83
4.1 Přehled vybraných výsledků zkoušek životnosti elektrod.....	83
4.2 Praktická doporučení pro bodové odporové svařování různých typů plechů.....	106
4.3 Současný stav a předpokládané tendence použití metod spojování ocelových plechů s povlaky.....	111
5. ZÁVĚR	119
6. LITERATURA.....	121

SEZNAM HLAVNÍCH POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Q	- celkové množství tepla vyvinuté při průchodu elektrického proudu	(J)
$i(t)$	- okamžitá hodnota svařovacího proudu	(A)
$R(t)$	- okamžitá hodnota ohmického odporu	(Ω)
t	- čas	(s)
t_s	- svařovací čas	(s, perioda)
q_v	- intenzita objemového zdroje tepla	($J.m^3.s^{-1}$)
J	- hustota svařovacího proudu	($A.m^{-2}$)
ρ	- měrný elektrický odpor	($\Omega.m$)
σ	- měrná elektrická vodivost	($S.m^{-1}$)
c	- měrné teplo	($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
γ	- hustota	($kg.m^{-3}$)
λ	- měrná tepelná vodivost	($W.m^{-1}.K^{-1}$)
a	- měrná teplotní vodivost	($m^2.s^{-1}$)
∇^2	- Laplaceův operátor	
T	- teplota	(K)
W	- celková tepelná energie na jednotku objemu na zvýšení teploty a tavení materiálu	($J.m^{-3}$)
ℓ	- skupenské teplo tání	($J.kg^{-1}$)
$\eta(T)$	- poměrná část taveniny v jednotce objemu	(1)
E	- intenzita elektrického pole	($V.m^{-1}$)
φ	- elektrický potenciál	(V)
p	- matice sil	
K	- matice tuhosti	
u	- matice posunutí	
R	- ohmický odpor	(Ω)
L	- vlastní indukčnost	(H)
$u_R(t)$	- okamžitá hodnota napětí na odporu R	(V)
$u_L(t)$	- okamžitá hodnota napětí na vlastní indukčnosti L	(V)
$i(t)$	- okamžitá hodnota proudu	(A)
$u(t)$	- okamžitá hodnota napětí	(V)
$I, I_{ef}, (I_s)$	- efektivní hodnota proudu, efektivní hodnota svařovacího proudu	(A)
$\hat{I}$	- maximální hodnota proudu	(A)
$\hat{\bar{I}}$	- komplexní maximální hodnota proudu	(A)
U	- efektivní hodnota napětí	(V)
$\hat{U}$	- maximální hodnota napětí	(V)
$\hat{\bar{U}}$	- komplexní maximální hodnota napětí	(V)
$ \hat{i}_v(t_k) $	- maximální hodnota proudu v k -té půlvlně při v -té úrovni proudu	(A)
$ \hat{u}_v(t_k) $	- maximální hodnota napětí v k -té půlvlně při v -té úrovni proudu	(V)

j	- imaginární jednotka	
ω	- kruhová frekvence	(s^{-1})
$f_k()$	- symbol pro funkci závislou na parametru k	
$C_{Uv}(k)$	- součinitel výkyvu napětí vztažený na k -tou půlvlnu při v -té úrovni svařovacího proudu	(1)
$C_{Iv}(k)$	- součinitel výkyvu proudu vztažený na k -tou půlvlnu při v -té úrovni svařovacího proudu	(1)
$R'_{\sqrt{}}(t_k)$	- odpor svaru vztažený k extrémním hodnotám napětí a proudu v k -té půlvlně při v -té úrovni svařovacího proudu	(Ω)
$R''_{\sqrt{}}(k)$	- odpor svaru vztažený k efektivním hodnotám napětí a proudu v k -té půlvlně při v -té úrovni svařovacího proudu	(Ω)
$p'_{\sqrt{}}(t_k)$	- výkon vztažený k extrémním hodnotám napětí a proudu v k -té půlvlně při v -té úrovni svařovacího proudu	(W)
$p''_{\sqrt{}}(k)$	- výkon vztažený k efektivním hodnotám napětí a proudu v k -té půlvlně při v -té úrovni svařovacího proudu	(W)
s	- tloušťka plechu	(mm)
F	- síla	(N, kN)
F_s	- svařovací síla	(N, kN)
t_d	- doba dotlaku	(s, perioda)
t_k	- doba kování	(s, perioda)
d_n	- rozměr svarové čocky měřený v rovině rozhraní svařovaných dílů	(mm)
F_{max}	- maximální únosnost svaru	(N, kN)
d_{sv}	- rozměr svaru	(mm)
n	- počet zhotovených svarů	(1)

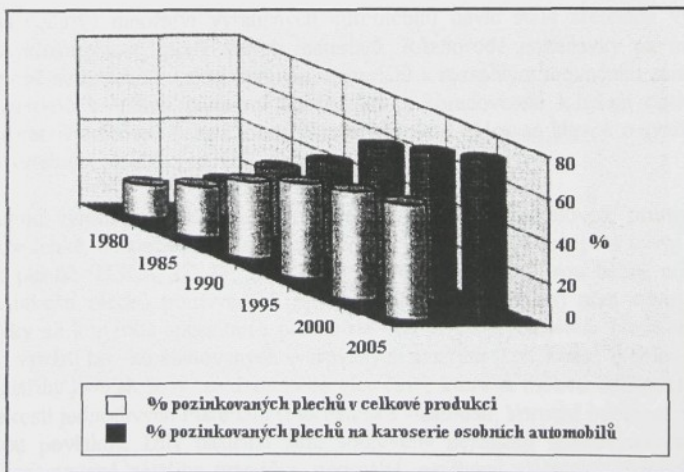
1. ÚVOD

Velmi tvrdé konkurenční prostředí, rostoucí nároky spotřebitelů a ekologické aktivity vedou výrobce spotřebních předmětů k racionálnímu hospodaření se všemi materiály a energiemi při snaze minimalizovat výrobní náklady, při dodržování náročných kritérií kvality a optimální životnosti výrobků. V těchto souvislostech je stále aktuálnější aplikace vhodné povrchové ochrany kovových materiálů, která zajišťuje zvýšení korozní odolnosti konstrukčních dílů a výrobků, nebo zvláštní funkční vlastnosti povrchu. Příkladem může být zdánlivě tak běžný materiál, jakým je plech. Jeho význam se však umocní např. ve vztahu k automobilovému průmyslu, a konkrétně k jeho využití na stavbu karoseriei.

Typickým způsobem ochrany tenkých ocelových karosářských plechů jsou různé typy povlaků, především pak na bázi kovů a jejich slitin. Ve světové produkci tenkých ocelových plechů s kovovými povlaky převládají plechy s povlaky na bázi Zn a slitin Zn. Používají se však také plechy s povlaky na bázi jiných kovů a slitin, např. Al, Al-Si, Al-Zn, Sn, Pb a další. Značná část spotřeby plechů s povlaky připadá právě na automobilový průmysl, kde je dnes již běžná výroba karoseriei se 100 % aplikací plechů s povlaky a navíc ještě s dalšími úpravami proti korozi.

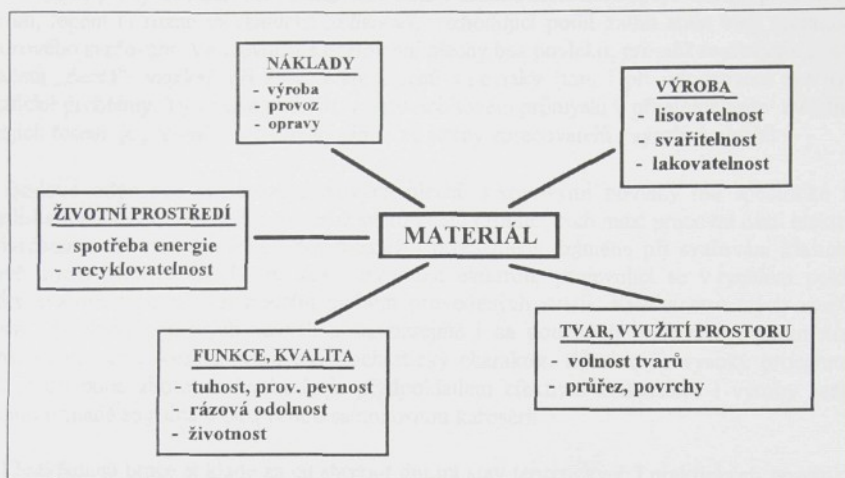
Aplikace karosářských plechů s kovovými povlaky představuje nový trend ve výrobě automobilů, které mají dlouhodobou záruku proti kosmetické i perforační korozi v náročných provozních podmínkách (celoroční provoz, exhalace, chemické posypové materiály, provoz v přímořských oblastech a pod.) a zvýšenou průměrnou životnost bez ztráty estetických a funkčních vlastností. Japonské a americké automobilky se orientují při výrobě karoseriei zejména na aplikaci ocelových plechů s povlaky na bázi slitin zinku Zn-Ni, Zn-Fe, Zn-Al a dalších složitějších slitin. Evropské automobilky upřednostňují plechy s povlaky Zn (žárově pozinkované a elektrolyticky pozinkované) [1].

Nárůst spotřeby pozinkovaných plechů v automobilovém průmyslu v zemích Evropské unie dokumentuje obr. 1.1 [2].



Obr. 1.1 Spotřeba pozinkovaných plechů v automobilovém průmyslu v zemích EU [2]

Ocelové plechy používané pro výrobu karosérií musejí splňovat celou řadu různorodých požadavků, které jsou schématicky zachyceny na obr. 1.2 [3].



Obr. 1.2 Požadavky na karosářské plechy [3]

Trend snižování spotřeby surovin a energií při výrobě i provozu automobilů vede k požadavkům na snížení jejich celkové hmotnosti. Automobily přitom musejí odpovídat stále náročnějším kritériím z hlediska bezpečnosti provozu (pevnost, tuhost, odolnost vůči rázům apod.) i hospodárnosti provozu.

S ohledem na celkové množství vyráběných automobilů navíc stále zřetelněji vystupují požadavky na recyklovatelnost používaných materiálů. Různorodé požadavky na materiály aplikované při výrobě automobilů vedou výrobce materiálů k rozsáhlým inovačním záměrům a vývoji nových materiálů s vyššími užitnými vlastnostmi a zpracovatele k řešení optimálních podmínek jejich zpracovatelnosti. Pokud jde o výrobu karosérií jedná se hlavně o tvářitelnost, svařitelnost a lakovatelnost plechových dílů.

V popředí zájmu výrobců i zpracovatelů tenkých plechů v automobilovém průmyslu tak dnes stojí produkce lehké, bezpečné a odolné karosérie. K ní vede cesta jak přes vývoj nových jakostí ocelových plechů (HSLA, IZ, IF, DP, TRIP, BH plechy, apod. jsou běžně používaná označení nových jakostí plechů používaných v automobilovém průmyslu) přes vývoj plechů s kovovými povlaky až k výrobě speciálních plechů na bázi hliníkových slitin. Nové možnosti dnes představuje i využití tzv. kombinovaných svařovaných nástřihů (tzv. Tailor Welded Blanks, tj. TWB). Tyto nástřihy jsou složeny ze dvou nebo více částí, které se mohou odlišovat obecně tloušťkou nebo jakostí jednotlivých materiálů (mechanické vlastnosti, korozní odolnost zajištěná typem a tloušťkou povlaku). Díly nástřihů jsou spojovány nejčastěji laserovými metodami svařování [3]. Kombinované nástřihy umožňují optimální využívání vlastností různých druhů plechů při výrobě výlisků a to jak z hlediska technologie výroby, tak i z hlediska vlastností a aplikace výlisků. Při stavbě karosérií se předpokládá použití kombinovaných nástřihů pro výrobu vnitřních dílů dveří, podběhů, bočnic, podlahy, nárazníků, kapot, sloupků apod. Vzhledem k různorodosti používaných materiálů, použité technologii spojování částí nástřihu je

pro lisovatelnost TWB nástřihů důležitá i znalost změny jejich tváritelnosti vyvolaná svařovacím procesem [4, 5, 6].

I když se při výrobě karoserií setkáváme také s dalšími metodami spojování (např. svařování laserem, lepení či různé mechanické způsoby), rozhodující podíl zatím stále mají technologie odporového svařování. Ve srovnání s ocelovými plechy bez povlaku, pro něž se obvykle používá označení „černé“, vznikají při zpracování plechů s povlaky (tzn. i při odporovém svařování) specifické problémy. Ty se sice podařilo v automobilovém průmyslu v přijatelné míře zvládnout, ale jejich řešení je předmětem trvalého zájmu ze strany zpracovatelů i výrobců plechů.

Bodové odporové svařování ocelových plechů s kovovými povlaky má specifické rysy z hlediska metalurgických dějů při tvorbě svarů i dějů probíhajících mezi pracovní částí elektrody a povrchem svařovaných plechů. Nepříjemným problémem, zejména při svařování klasických žárově pozinkovaných plechů je nízká životnost elektrod, projevující se v rychlém poklesu kvality svarových spojů s rostoucím počtem provedených svarů. Kvalita svarových spojů je závislá i na dalších rušivých vlivech a samozřejmě i na použitých svařovacích parametrech. Svařovací proces a kvalita svaru má stochastický charakter. Záruka, že vysoký procentuelní podíl svarů bude zhotoven kvalitně, je předpokladem efektivní konstrukce i výroby svarků. V tomto případě se jedná o bezpečnou samonosnou karosérii.

Předkládaná práce si klade za cíl shrnout dnešní stav teoretických i praktických poznatků o problematice bodového odporového svařování tenkých ocelových plechů s kovovými povlaky a seznámit potenciální zájemce s možnostmi řešení specifických problémů svařovacího procesu. V rámci analýzy a širšího posouzení možností a uplatnění technologie bodového odporového svařování tenkých ocelových plechů s povlaky, je práce zaměřena na následující oblasti:

- ♦ rozbor fyzikálních podmínek tvorby svarového spoje u bodového odporového svařování a nástin současného stavu a možností modelování svařovacího procesu využitím numerických simulací
- ♦ souvislosti mezi časovými průběhy elektrických veličin svařovacího procesu a základním kritériem kvality svaru, tj. rozměrem svarové čochy
- ♦ bodová odporová svařitelnost a metodické postupy pro její objektivní stanovení se zaměřením na plechy s povlaky
- ♦ kritéria kvality svarového spoje a metodické postupy hodnocení kvality svarů
- ♦ elektrodové materiály, životnost elektrod a základní faktory ovlivňující životnost elektrod
- ♦ metodické postupy pro stanovení životnosti elektrod se zaměřením na plechy s povlaky
- ♦ praktické výsledky zkoušek životnosti elektrod a praktická doporučení pro odporové bodové svařování různých typů plechů
- ♦ perspektivy alternativních metod spojování ocelových plechů s povlaky především v souvislosti se stavbou karoserií
- ♦ nástin možného uplatnění poznatků a výsledků výzkumu uvedených v předkládané práci.

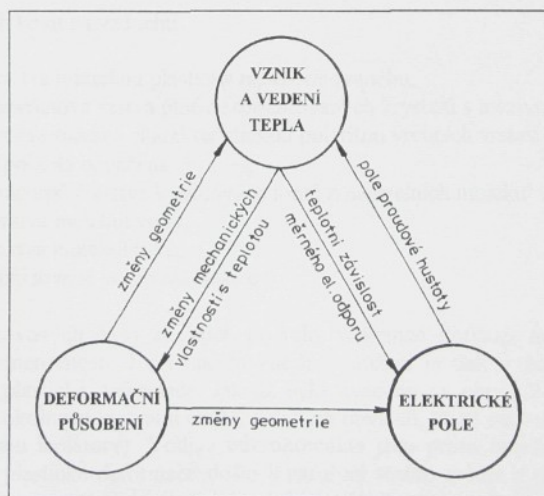
2. FYZIKÁLNÍ PODSTATA A CHARAKTERISTIKA SVAŘOVACÍHO PROCESU

2.1 Odporový ohřev a souvislosti hlavních fyzikálních dějů během svařovacího procesu

Obdobně jako jiné svařovací procesy je i bodové odporové svařování souhrnem nerovnovážných dějů, během kterých vzniká svarový spoj kombinovaným působením více mechanismů. Jejich hnací silou jsou teplotní, deformační a koncentrační gradienty. Dominantní je působení teplotních gradientů a spojení svařovaných dílů vzniká krystalizací natavené oblasti tzv. svarové čocky. Svarový kov spoje tvoří přetavený základní materiál. Metalurgická jakost svaru závisí na metalurgické jakosti základních materiálů a na stavu povrchu svařovaných dílů v místě tvorby svaru. Vliv okolní atmosféry na kvalitu svaru je prakticky vyloučen v důsledku přítlačné síly, která působí během celého svařovacího procesu. Ta zajišťuje přiblížení povrchu svařovaných částí, zabezpečuje průchod svařovacího proudu, udržuje natavený objem svarové čocky v místě spoje, působí plastické deformace chladnoucího spoje (prokování svaru) a zabezpečuje obvod tepla ze spoje do elektrod.

V oblasti vytváření svaru probíhají během svařovacího procesu difúzní děje, které mají vliv na výslednou kvalitu svaru i životnost elektrod. Zvláště výrazné je působení koncentračních gradientů při svařování materiálů s rozdílným chemickým složením povrchu a jádra. Při svařování ocelových plechů s povlaky na bázi kovů s nižší teplotou tání (např. Sn, Zn, Pb, Al a pod.) se difúzní děje uplatňují především na styku elektroda - plech, kde v průběhu svařování maximální teploty přesahují teploty tání povlaků.

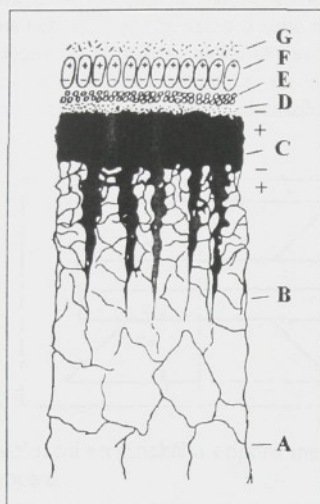
Hlavní fyzikální děje a jejich vzájemné vazby a souvislosti u bodového svařování jsou zřejmé z obr. 2.1 [7].



Obr. 2.1 Hlavní fyzikální děje a jejich vzájemné vazby u bodového odporového svařování

Schématický obrázek samozřejmě nemůže postihnout dynamiku vztahů fyzikálních dějů v plné míře. Při studiu charakteru styku dvou kovových součástí je nutno uvážit vliv fyzikálních a mechanických účinků, které působily na jejich povrch. Z geometrického hlediska jsou povrchy charakterizovány svým profilem. Přitom se rozlišuje zvlnění (makrogeometrie) a drsnost (mikrogeometrie). Nejvěrnější zobrazení reálného povrchu podává vrstevnicová mapa.

Fyzikální stav povrchu je charakterizován přítomností a složením povrchových povlaků a strukturou povrchových vrstev. Obvyklý stav povrchu kovových těles vystavených působení vzduchu je na obr. 2.2 [8]. V závislosti na konkrétních podmínkách a složení vnějšího prostředí může být tloušťka a pořadí vrstev různé. První vrstva je však obvykle tvořena oxidy.



Obr. 2.2 Povrch kovu na vzduchu

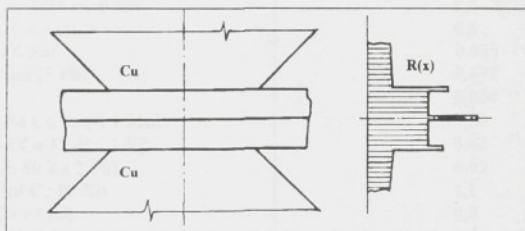
- A - vrstva materiálu plasticky nedeformovaného,
- B - povrchová vrstva plně dezorientovaných krystalů s mezivrstvami oxidů,
- C - vrstva oxidů s charakteristickou polaritou vrchních vrstev kovu (polarita označena + a -),
- D - adsorpční vrstva kyslíkových iontů a neutrálních molekul vzduchu,
- E - vrstva molekul vody,
- F - vrstva molekul tuků,
- G - ionizované prachové částice

Při styku dvou kovových částí se jejich povrchy vzájemně dotýkají nejprve v místech vrcholků povrchových nerovností. I při malém vnějším zatížení je tlak v těchto místech tak vysoký, že způsobuje plastické deformace. Jak již bylo uvedeno na obr. 2.2 je většina kovů pokrytá za normálních okolností vrstvami oxidů, a dalších povlaků, které mají vysoký elektrický odpor (prakticky to jsou izolátory). Vodivé mikrokontakty jsou proto omezené pouze na ta místa, kde působením plastické deformace došlo k narušení těchto vrstev a povlaků. Kovové kontakty se vytvoří pouze na části dotýkajících se ploch. Součet ploch všech mikrokontaktů je mnohonásobně menší, než zdánlivá plocha styku určená z geometrických rozměrů dotýkajících

se částí. Plocha skutečného styku závisí na vnějším zatížení, na mechanických vlastnostech materiálu a na charakteru povrchu dotýkajících se částí.

Elektrický proud začne kontaktem procházet teprve tehdy, když je na něm dosaženo určité prahové napětí. Po jeho dosažení dojde k náhlému nárůstu proudu a poklesu odporu kontaktu. Průchodem proudu se kontakt zahřívá, dojde k poklesu deformačního odporu materiálu a účinkem přitlačné síly pokračují plastické deformace. Dosáhnutím teploty tání v příslušné oblasti přechodový odpor prakticky zanikne. Pokračující plastické deformace vedou k vytváření dalších stykových míst a skutečný vodivý průřez dotýkajících částí roste. Přechodový odpor na styku částí zaniká, pokud se do kontaktu dostane celý průřez.

Pro vznik odporového bodového svaru je velmi důležité lokální zvýšení elektrického odporu v místě styku svařovaných plechů, neboť téměř homogenní rozložení elektrického odporu v objemu svařovaných materiálů by samo o sobě nemohlo zajistit ostře ohraničený lokální ohřev. Počáteční nespojitosti v rozložení elektrického odporu mezi elektrodami tvoří přechodové odpory ve styku svařovaných plechů a ve styku elektrod s plechy. Charakter rozložení elektrického odporu mezi elektrodami v okamžiku startu svařovacího procesu je na obr. 2.3 [7].



Obr. 2.3 Rozložení elektrického odporu mezi elektrodami v okamžiku startu svařovacího procesu

Přechodové odpory v místech dosedu elektrod jsou v zásadě nežádoucí a snažíme se je vhodnou volbou elektrodového materiálu snížit.

Během svařovacího cyklu se celkový elektrický odpor mezi elektrodami mění. To samozřejmě vede i k časové závislosti všech základních elektrických veličin v sekundárním okruhu svařovacího stroje. Celkové množství tepla vyvinuté průchodem svařovacího proudu svařovanými díly vyjadřuje rovnice (2.1).

$$Q = \int_0^{t_s} R(t) i^2(t) dt \quad (2.1)$$

Množství tepla vyvinuté v jednotce materiálu za sekundu, při průchodu svařovacího proudu o hustotě J , se určí ze vztahu (2.2) a označuje se jako intenzita objemového zdroje tepla.

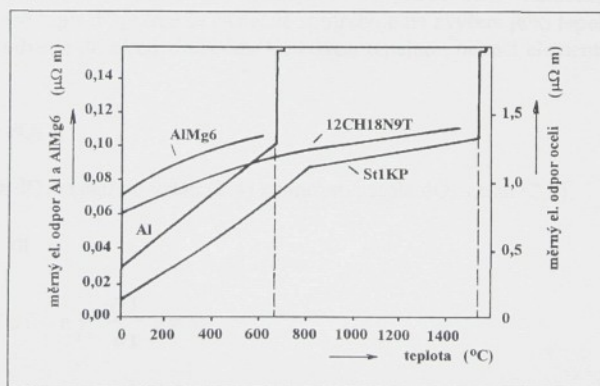
$$q_v = \rho J^2 = \frac{J^2}{\sigma} \quad (2.2)$$

Měrný elektrický odpor je nejdůležitější fyzikální charakteristika a ukazatel vhodnosti materiálu pro odporové svařování. Závisí především na chemickém složení a v menší míře také na stavu materiálu. V tabulce 2.1 je přehled měrného elektrického odporu různých kovů a slitin při teplotě 20 °C [9].

Tabulka 2.1 Měrný odpor různých kovů a slitin při teplotě 20 °C

Materiál	ρ ($\mu\Omega$ m)
Cín	0,11
Hliník	0,0278
Měď	0,0175
Nikl	0,07
Olovo	0,21
Platina	0,108
Stříbro	0,016
Tantal	0,12
Wolfram	0,05
Zinek	0,059
Zlato	0,022
Čisté železo	0,1
Měkká (nizkoughlikatá) ocel	0,12 - 0,2
Rychlořezná ocel	0,48
Nerezavějící ocel (18 Cr 9 Ni)	0,7 - 0,75
Transformátorový plech	0,5
Bronz (94 Cu 6 Sn)	0,055
Fosforový bronz (5 Pb)	0,097
Duralumin	0,034
Konstantan (54 Cu 45 Ni 1 Mn)	0,50
Manganin (85 Cu 12 Mn 3 Ni)	0,42
Mosaz (58 Cu 40 Zn 2 Sb)	0,09
Chrómníkl (20 Cr 80 Ni)	1,1
Nikelin (55 Cu 45 Ni)	0,5
Kanthal (Fe-Al-Cr)	1,4

Výrazně závisí měrný elektrický odpor na teplotě. Na obr. 2.4 jsou teplotní závislosti měrného elektrického odporu pro čistý hliník, slitinu AlMg6, nizkoughlikovou nelegovanou ocel a pro vysokolegovanou chromniklovou ocel typu 18/9.



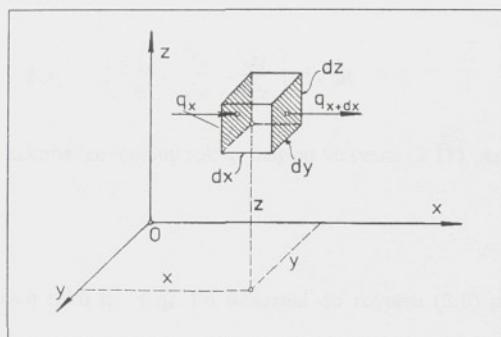
Obr. 2.4 Teplotní závislost měrného elektrického odporu [7]

V počáteční fázi svařovacího procesu dominuje intenzivní vývoj tepla ve styku svařovaných plechů a zdroj tepla má prakticky plošný charakter. Vedením tepla se bezprostředně přilehlé

objemy materiálů ohřívají a s rostoucí teplotou se postupně zvyšuje jejich měrný elektrický odpor. Původně plošný zdroj tepla se mění na objemový. Počáteční fáze svařovacího procesu má rozhodující význam pro vytvoření výchozí nehomogenity teplotního pole a tím i pole objemových zdrojů tepla. V objemovém zdroji tepla pokračuje vývin tepla i po zániku přechodových odporů, neboť ve druhé fázi svařovacího cyklu má rozhodující vliv teplotní závislost měrného elektrického odporu materiálu. Obdobný mechanismus má i nežádoucí vývin tepla v důsledku přechodových odporů v místech dosedu elektrod. Teplo vznikající na rozhraní elektroda - plech je účelné odvádět intenzivním chlazením elektrod.

2.2 Teplotní a elektrické pole u bodového svařování

Rovnici vyjadřující teplotní pole lze získat řešením tepelné bilance elementárního objemu svařovaného materiálu. Řešený případ znázorněn na obr. 2.5 [10].



Obr. 2.5 Bilance tepelných toků elementárním tělesem svařovaného materiálu.

V elementárním objemu tělesa $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ se průchodem elektrického proudu vyvine celkové množství tepla dQ_1 , které se částečně spotřebuje na zvýšení jeho tepelného obsahu o dQ_2 a část dQ_3 se odvede do okolí elementu. Celkovou tepelnou bilanci elementu vyjadřuje rovnice (2.3).

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3 \quad (2.3)$$

Množství tepla dQ_1 vyjadřuje vztah (2.4) a množství tepla dQ_2 vztah (2.5).

$$dQ_1 = q_v dV dt \quad (2.4)$$

$$dQ_2 = c \gamma dV dT = c \gamma \frac{\partial T}{\partial t} dV dt \quad (2.5)$$

Odvození členu dQ_3 vychází z bilance tepelných toků elementárním tělesem ve směru souřadnic x , y , a z . Bilanci tepelných toků ve směru osy x popisuje rovnice (2.6), přičemž člen dq_x lze vyjádřit vztahem (2.7).

$$q_{x+dx} = q_x + dq_x \quad (2.6)$$

$$dq_x = \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (2.7)$$

Ve směru osy x prochází plochou $dy \cdot dz$ část tepla dQ_{3x} , kterou je možné vyjádřit rovnicí (2.8)

$$dQ_{3x} = (q_x - q_{x+dx}) dy dz dt = dq_x dy dz dt \quad (2.8)$$

Tento vztah lze s využitím rovnice (2.7) upravit na konečný vztah (2.9).

$$dQ_{3x} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz dt = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dV dt \quad (2.9)$$

Obdobným způsobem se provede výpočet částí tepla dQ_{3y} a dQ_{3z} procházející ve směru os y a z plochami $dx \cdot dz$ a $dx \cdot dy$. Celkově bude množství tepla dQ_3 dáno součtem tepelných toků ve směru všech tří os - vztah (2.10).

$$dQ_3 = dQ_{3x} + dQ_{3y} + dQ_{3z} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dV dt \quad (2.10)$$

Podle Fourierova zákona lze tepelný tok q_x napsat ve tvaru (2.11). Analogicky se určí i vztahy

$$q_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.11)$$

pro výpočet tepelných toků q_y a q_z . Po dosazení do rovnice (2.9) potom dostaneme rovnici (2.12).

$$dQ_3 = -\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(-\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(-\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)\right] dV dt \quad (2.12)$$

V operátorovém tvaru bude rovnice (2.12) vyjádřena vztahem (2.13)

$$dQ_3 = -\text{div}(-\lambda \text{ grad } T) dV dt \quad (2.13)$$

Po dosazení do rovnice (2.3) z rovnic (2.4), (2.5) a (2.13) dostaneme po úpravě rovnici (2.14), která je základním vyjádřením teplotního pole pro případ s objemovým zdrojem tepla.

$$q_v = c \lambda \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(-\lambda \text{ grad } T) \quad (2.14)$$

Pokud předpokládáme, že svařovaný materiál je izotropní, tj. $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$ a zanedbáme méně významnou teplotní závislost součinitele teplotní vodivosti, přejde rovnice (2.14) na tvar (2.15) a po úpravě na tvar (2.16).

$$q_v = c \lambda \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \nabla^2 T \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \gamma} \nabla^2 T + \frac{q_v}{c \gamma} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{c \gamma} \quad (2.16)$$

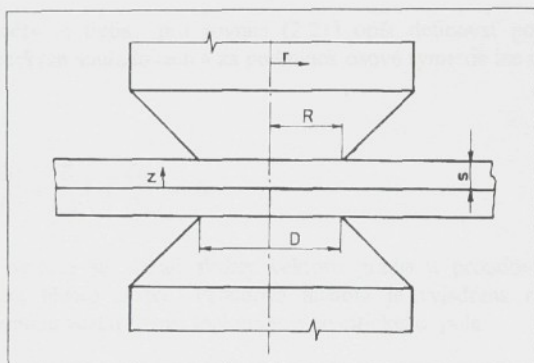
K výpočtu teplotního pole je nutno definovat a zadat i počáteční a okrajové podmínky, především počáteční rozdělení teploty ve svařovaných dílech a podmínky sdílení tepla na hranicích sledované oblasti.

Řešení teplotního pole u bodového svařování se navíc komplikuje, chceme-li při výpočtu postihnout existenci kapalné a tuhé fáze a proměnné hranice mezi nimi v období tvorby svaru. Při řešení se vychází z rovnice (2.14.) pro intenzitu objemového zdroje tepla, která se upraví pro oblasti s fázovým rozhraním na tvar (2.17.). W představuje celkovou tepelnou energii na zvýšení teploty a tavení materiálu jednotkového objemu a určí se z rovnice (2.18.)

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \text{div}(-\lambda \text{ grad } T) + q_v \quad (2.17)$$

$$W = \int_0^T c \gamma \, dT + \ell \gamma \eta(T) \quad (2.18)$$

Vzhledem k rotační symetrii běžného uspořádání bodového svařování je výhodné při řešení teplotního pole použít cylindrický systém souřadnic. Význam dále použitých geometrických symbolů a celkové uspořádání vysvětluje obr. 2.6.



Obr. 2.6 Geometrické uspořádání bodového svařování a označení hlavních rozměrů.

Rovnice teplotního pole pro bodové svařování s geometrií podle obr. 2.6 bude za zjednodušujících předpokladů uvedených pro rovnici (2.16) mít tvar (2.19).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c \gamma} \quad (2.19)$$

Po dosazení za objemový zdroj tepla q_v z rovnice (2.2) do rovnice (2.19) dostaneme konečný tvar rovnice teplotního pole (2.20).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{J^2}{\sigma c \gamma} \quad (2.20)$$

Vzhledem k tomu, že termofyzikální vlastnosti materiálu jsou funkcemi teploty, (tzn. i souřadnic a času), je funkcí teploty, souřadnic a času také proudová hustota. Rozložení proudové hustoty se získá řešením rovnice elektrického pole. Rozložení potenciálu φ v bezdrojové oblasti popisuje rovnice (2.21), ze které lze řešením získat rovnici (2.22) pro elektrické pole

$$\text{div} (\sigma \text{ grad } \varphi) = 0 \quad (2.21)$$

$$\mathbf{E} = - \text{grad } \varphi \quad (2.22)$$

Proudová hustota je v libovolném místě tuhého vodivého tělesa úměrná velikosti elektrického pole a měrné elektrické vodivosti. Tuto závislost lze formulovat vztahem (2.23) a pole objemových zdrojů tepla bude vyjadřovat rovnice (2.24).

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.23)$$

$$q_v = \sigma E^2 = \frac{E^2}{\rho} \quad (2.24)$$

Pro praktické výpočty je třeba pro rovnici (2.21) opět definovat počáteční podmínky a geometrii. V cylindrických souřadnicích a za podmínek osové symetrie lze rovnici (2.21) napsat ve tvaru (2.25).

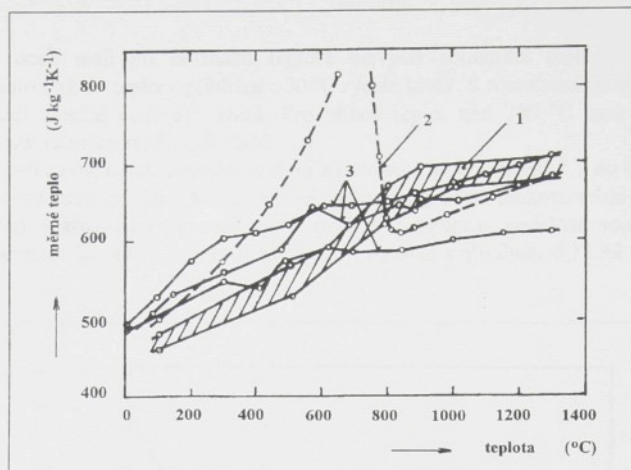
$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\sigma}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.25)$$

Řešením této rovnice se získají složky vektoru $\text{grad } \varphi$ a proudová hustota je potom vektorovým součtem těchto složek. Proudová hustota je vyjádřena rovnicí (2.26), která charakterizuje vzájemnou vazbu rovnic teplotního a elektrického pole.

$$J^2 = \sigma^2 \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (2.26)$$

Vzhledem k tomu, že termofyzikální vlastnosti materiálu jsou funkcemi teploty, musí se teplotní a elektrické pole řešit simultánně. Předpokladem k praktickému využití a řešení uvedených rovnic je znalost teplotních závislostí termofyzikálních vlastností materiálu, t.j. ρ , c , γ a λ .

Na obr. 2.7 jsou teplotní závislosti měrného tepla c pro uhlíkové oceli, nízkoalokované oceli a vysokolegované oceli [11].

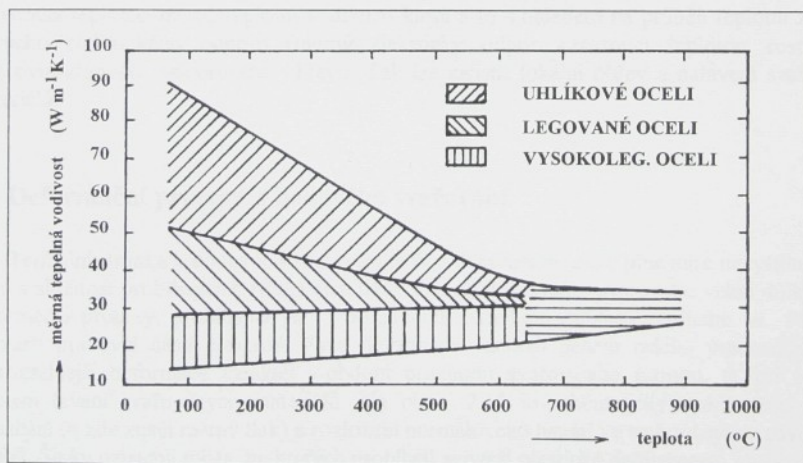


Obr. 2.7 Teplotní závislosti měrného tepla pro různé druhy oceli

- 1 - uhlíkové oceli,
- 2 - nízkolegované oceli
- 3 - vysokolegované oceli

Z obrázku je zřejmé, že chemické složení oceli nemá výrazný vliv na celkový průběh teplotní závislosti měrného tepla a hodnoty měrného tepla se přibližují hodnotám naměřeným pro nelegovanou nízkouhlíkovou ocel. Výjimku tvoří pouze nízkolegované oceli v okolí teploty 700 °C, u kterých se projevuje nejprve prudký nárůst a potom zase pokles měrného tepla s rostoucí teplotou.

Na obr. 2.8 jsou shrnuté výsledky měření teplotní závislosti měrné tepelné vodivosti λ pro oceli různého chemického složení.

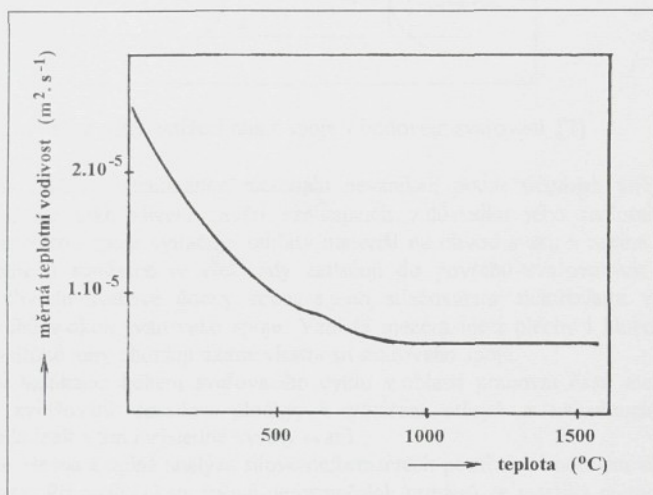


Obr. 2.8 Teplotní závislost měrné tepelné vodivosti pro oceli

Uhlíkové oceli mají při normální teplotě nejvyšší součinitel tepelné vodivosti, který s rostoucí teplotou až do teploty přibližně 600 °C rychle klesá. S rostoucím množstvím legujících přísad součinitel tepelné vodivosti klesá. Pro oblast teplot nad 700 °C jsou rozdíly v měrné tepelné vodivosti různých typů ocelí malé.

Hustota oceli závisí na chemickém složení a pohybuje se v rozmezí 7,7 do 8,3 kg.dm⁻³ [12]. Obvykle se u oceli hustota blíží 7,85 kg.dm⁻³. S rostoucí teplotou hustota velmi mírně klesá.

Pro průběh svařovacího procesu je významná i teplotní závislost součinitele teplotní vodivosti materiálu. Na obr. 2.9 je tato závislost pro ocel s obsahem 0,11 % C a 0,36 % Mn [7].

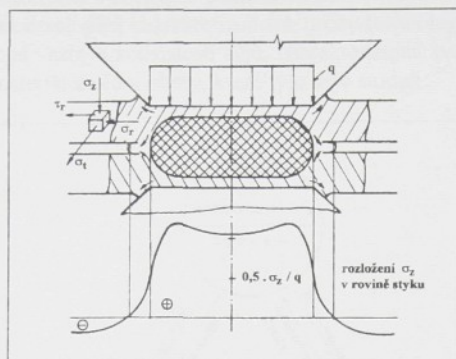


Obr. 2.9 Teplotní závislost měrné teplotní vodivosti pro ocel s 0,11 % C a 0,36 % Mn

S rostoucí teplotou měrná teplotní vodivost klesá a to s ohledem na průběh teplotní závislosti měrného elektrického odporu (měrný elektrický odpor s rostoucí teplotou roste) vede k nerovnováznosti odporového ohřevu. Tak lze zajistit lokální ohřev a natavení svařovaných materiálů.

2.3 Deformační procesy u bodového svařování

Termální stránka u bodového svařování je sice dominantní, ale v plné míře nevystihuje celou šířku a složitost probíhajících fyzikálních dějů. Pro vznik a kvalitu svaru jsou velmi důležité také deformační procesy, probíhající jak v základním materiálu v oblasti tvořícího se svaru, tak v oblasti pracovní části elektrod. Tyto deformace vznikají během celého pracovního cyklu. Nejrozsáhlejší deformace vznikají v období průchodu svařovacího proudu, tj. při ohřevu a místním tavení svařovaných materiálů. Na obr. 2.10 je schématicky znázorněno působící namáhání (q zde značí měrný tlak) a rozložení normálového napětí ve směru osy z v rovině styku plechů. Šipky označují místa, ve kterých probíhají největší plastické deformace.



Obr. 2.10 Charakter zatížení místa spoje v bodovém svařování [7]

Deformační procesy v základním materiálu nevznikají pouze účinkem vnějšího zatížení svařovací silou, ale také vlivem napětí vznikajících v důsledku jeho teplotní roztažnosti. Natavený svarový kov spoje vytlačuje zahřátý materiál na obvod svaru v rovině styku plechů směrem ze spoje a současně se elektrody zatlačují do povrchu svařovaných plechů. Tok materiálu na obvodu svarové čocky spolu s jeho stlačováním elektrodami vede nakonec k odtlačení plechů v okolí svarového spoje. Vzniklá mezera mezi plechy i hluboké vtisky po elektrodách do určité míry zhoršují užité vlastnosti svarového spoje.

Deformace vznikající během svařovacího cyklu v oblasti pracovní části elektrod, vedou k postupnému zvětšování dosedací plochy, k vytváření otřepů a nežádoucímu ovlivnění svařovacích podmínek a tím i výsledné kvality svarů.

Dostatečně přesná a úplná analýza silově-deformačních poměrů v bodovém svařování ještě nebyla provedena. Při analytickém řešení deformačních procesů se využívá metoda konečných prvků (dále jen MKP). Řešení vychází z rovnice (2.27), přičemž se respektují tři základní požadavky na:

- rovnováhu tělesa jako celku i jakékoliv z něho vyjmuté části
- vzájemnou kompatibilitu jednotlivých částí tělesa
- splnění předpokládaných fyzikálních vztahů mezi tenzory napětí a deformace

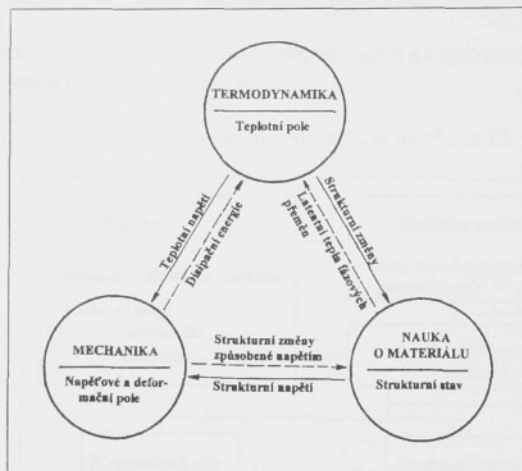
$$\mathbf{p} = \mathbf{K} \mathbf{u} \quad (2.27)$$

Aproximačními funkcemi obvykle nelze splnit současně požadavky rovnováhy a kompatibility, ale jen jeden z nich. Jedná se potom buď o model kompatibilní nebo rovnovážný. Kompatibilní model se používá v deformační variantě MKP a rovnovážný model především v silové variantě MKP [13].

2.4 Modelování procesu bodového svařování

Řešení teplotních polí, vnitřních napětí, deformačních procesů, strukturních změn a dalších dějů získává v průmyslových, výzkumných a vývojových projektech stále větší význam. Děje, které lze formulovat a popsat diferenciálními rovnicemi je možno v současné době řešit metodou

konečných prvků na dostatečně výkonných počítačích. Matematická analýza postihuje vzájemné vazby a souvislosti fyzikálních dějů charakterizujících určitý technologický proces. Na obr. 2.11 jsou vyznačené vzájemné vazby a souvislosti dějů, charakterizující svařovací procesy z hlediska působení na základní materiál a vědní obory, které tyto děje studují.



Obr. 2.11 Základní fyzikální děje charakterizující svařovací procesy z hlediska vlivu na základní materiál [14]

Formulace základních modelových rovnic pro výpočet teplotního pole u bodového svařování je provedena v části 2.2. Modelové rovnice se řeší numericky diferenční metodou. Simulace svařovacího procesu výpočtovými metodami se používá především k částečné náhradě a doplnění experimentálních programů, např. pro hodnocení vlivu programového průběhu svařovacího proudu na tvorbu svaru, při návrhu kontrolních a řídicích systémů, při hodnocení vlivu geometrie elektrod a podmínek jejich chlazení. Výpočet teplotních polí je také nezbytným předpokladem pro výpočet svarových napětí a deformací. Při numerickém řešení teplotních polí je dnes zcela běžné uvažování teplotní závislosti tepelně-fyzikálních veličin základního materiálu. Jak již bylo uvedeno v části 2.2, předpokládá to simultánní řešení teplotního a elektrického pole. Tento postup poprvé použili YAMAMOTO a OKUDA v práci [15] pro bodové svařování tlustých plechů. První použitelné řešení dvojrozměrného rotačně symetrického uspořádání modelu bodového svařování podal GRENWOOD v práci [16].

Řada prací se zabývá matematickým řešením bodového svařování při návrhu a ověření systémů řízení svařovacího procesu. Jednoduchý model teplotního pole pro bodové svařování v této souvislosti popisují ZAJAC a JANOTA v práci [17].

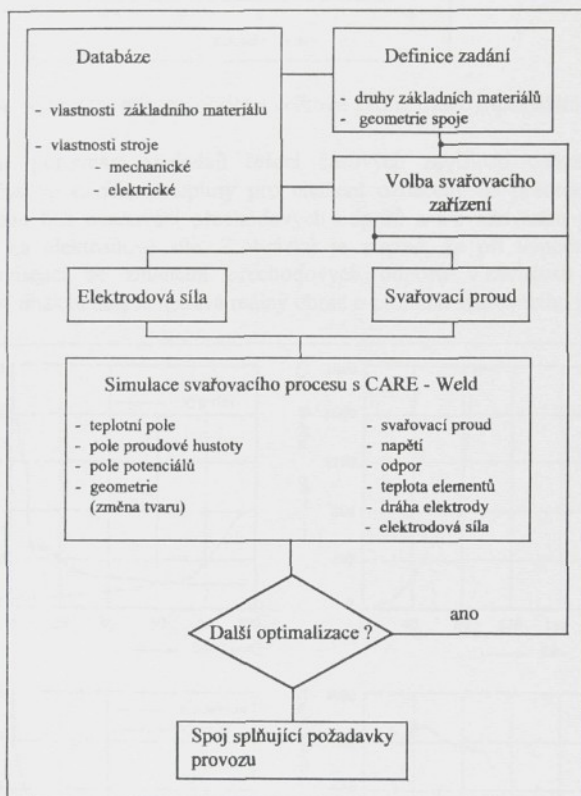
SCHWAB se v práci [18] zabývá numerickým řešením teplotního pole u odporového svařování se zaměřením na studium vývoje tepla v souvislosti s elektrickými charakteristikami stroje, rozdělením proudové hustoty v elektrodách i spojovaných dílech a s termoelektrickými jevy. Obdobné zaměření má i jeho práce [19], kde se řeší teplotní pole v elektrodách z hůře elektricky vodivých materiálů (např. na bázi wolframu) při spojování lakem izolovaných měděných drátů vinutí motoru s měděnými lamelami kolektoru.

GREITMANN a KESSLER popisují v práci [20] použití numerické simulace svařovacího procesu v souvislosti se zajištěním kvality svarových spojů plechů ze slitiny AlMg0,4Si1,2. K simulaci použili programové vybavení GARE-Weld, které obsahuje moduly pro zadávání dat,

pro výpočet a pro grafické znázornění výsledků řešení. Výpočtový modul pracující s MKP zahrnuje ve vzájemné vazbě 5 dílčích modelů:

- modelování mechanických vlastností svařovacího zařízení
- model tečení pro popis deformačních procesů v oblasti místa spoje
- modelování elektrických vlastností zadáváním charakteristik transformátoru, nebo časové závislosti proudu
- model pro přechodové odpory na přechodu elektroda plech a mezi oběma plechy
- model pro řešení nestacionárního vedení tepla

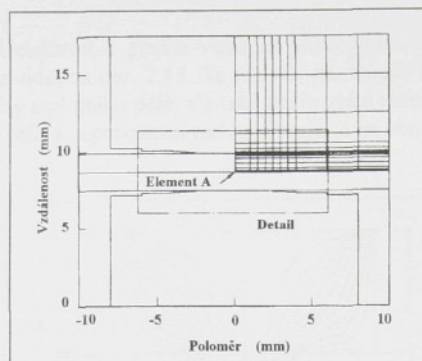
Schématické znázornění práce celého simulačního systému je na obr. 2.12.



Obr. 2.12 Klasifikace bodových svarových spojů numerickou simulací programovým vybavením GARE-Weld [20]

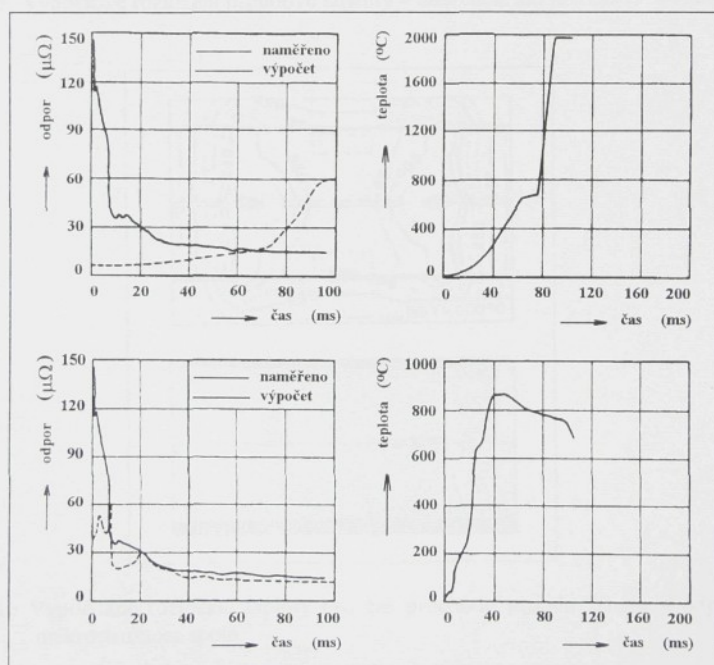
Výsledky získané simulací svařovacího procesu jsou konfrontovány s výsledky doplňujících experimentů tak, aby mohlo dojít ke korekci přijatých předpokladů řešení.

Na obr. 2.13 je použitý způsob vytvoření diferenční sítě v plechu a elektrodě (válcové elektrody s poloměrem zaoblčení pracovní části 75 nebo 100 mm).



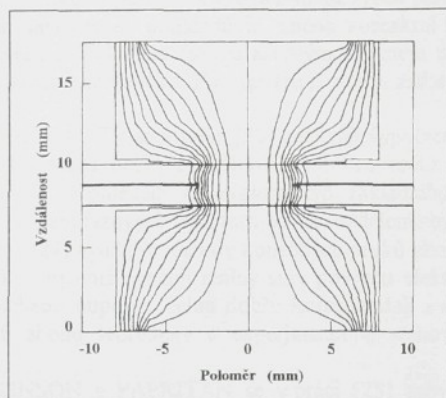
Obr. 2.13 Způsob vytvoření diferenční sítě a celkové geometrické uspořádání.

Na obr. 2.14 je porovnání výsledků řešení časových závislostí celkového odporu svařovaných dílů a časové závislosti teploty pro element označený na předchozím obrázku písmenem A pro případ bez uvažování přechodových odporů a s uvažováním přechodových odporů v závislosti na elektrodové síle. Z obrázků je zřejmé, že při výpočtech je nutno modelovat děje související se změnami přechodových odporů v závislosti na působící elektrodové síle, neboť jinak simulace nedává reálný obraz o průběhu svařovacího procesu.

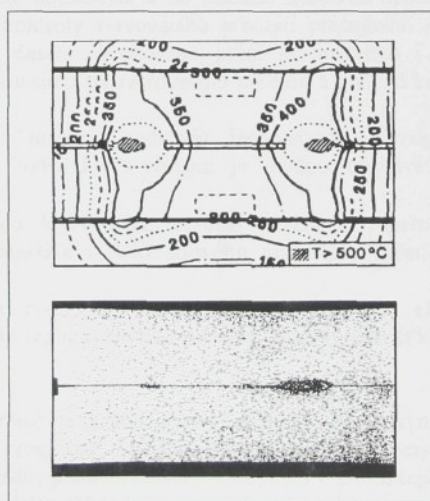


Obr. 2.14 Časová závislost celkového odporu a časová závislost teploty elementu A
 - nahore bez uvažování přechodových odporů
 - dole s modelováním přechodových odporů

Geometrické uspořádání elektrod a plechů vede ke koncentraci hustoty proudu na vnějších oblastech elektrod, jak je vidět na obr. 2.15. To má vliv na způsob tvorby svarové čočky, což dokumentují nejen výpočty teplotního pole, ale také pozorování makrovýbrusů svarů. Porovnání výsledků matematického řešení a porovnání makrovýbrusu je na obr. 2.16.



Obr. 2.15. Výpočtové rozložení proudové hustoty v diferenční síti pro čas $t = 60$ ms



Obr. 2.16 Vypočítané rozložení teploty pro čas průchodu proudu 20 ms a odpovídající makrostruktura spoje

Při modelování podmínek tvorby svaru za různých hodnot svařovacího proudu byl analytickým řešením stanovený tvar a rozměr svarové čočky v dobré shodě s výsledky experimentálního ověření.

Počítačovou simulaci bodového odporového svařování hliníkových slitin se zabývají také BROWNE, CHANDLER, EVANS a WEN v práci [21]. Při výpočtech analyzují vliv velikosti svařovacího proudu, elektrodové síly, chlazení elektrod a odbočování proudu na tvorbu svaru. Modelování deformačních procesů ovlivňujících kontaktní plochu elektroda - plech bylo provedeno s využitím Misesovy podmínky plasticity pro izotropní materiál.

Práce [22] je zaměřena na posouzení vlivu svařování stejnosměrným nebo střídavým proudem na vývoj tepla a teplotní pole při svařování hliníkových plechů, resp. slitin hliníku. Na základě experimentálně stanovených podkladů je změna kontaktní plochy elektroda - plech během svařovacího procesu modelována časově závislým posunem diferenční sítě. Generování sítě i její zjemnění se provádí automaticky. Při výpočtu je nutno zadat pouze geometrii elektrod a plechů (obrysy).

SHRÖDER a MACHERAUCH se v práci [23] zabývají výpočtem tepelných a zbytkových napětí v oblasti bodového svaru ocelí X4CrNiMo1913. Pro tento případ uvažují elasticko-plastické chování materiálu. S ohledem na zvolený typ základního materiálu nebylo nutné zabývat se ve výpočtech vlivem fázových transformací na rozdělení zbytkových napětí.

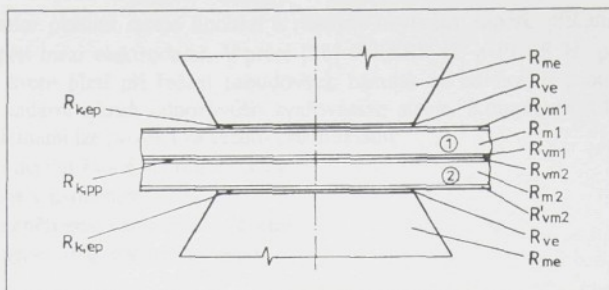
NA a PARK v práci [24] využitím metody konečných prvků zkoumají vliv přitlačné síly na formování svarové čočky, přičemž uvažují reálný stav povrchu elektrody. Teoreticky určené časové průběhy dynamického odporu velmi dobře korespondují s experimentálně ověřenými hodnotami a dokazují shodu teoreticky a experimentálně stanovených průběhů isoterem v oblasti tvorby svaru.

TSAI, DAI, DICKINSON a PAPRITAN se v práci [25] zabývají analýzou a vývojem metodologie kontrolního systému pro bodové odporové svařování pracujícího v reálném čase. Metodu konečných prvků použili při analýze svařovacího procesu a určení smyček svařitelnosti materiálu. Výpočtem určené rozměry svarů v závislosti na svařovacích parametrech porovnávali s experimentálně určenými hodnotami a na základě sledování tepelné expanze svarů navrhli systém monitorování a kontroly svařovacího procesu pracujícího se dvěma veličinami a to svařovacím proudem a časem. V citované práci je proveden i stručný přehled aplikací matematického modelování simulaci svařovacího procesu a přehled kontrolních řídicích systémů pro bodové svařování.

Výsledky citovaných literárních podkladů jednoznačně potvrzují, že věrohodné výsledky simulačních procesů u bodového svařování je možno očekávat pouze za následujících předpokladů:

- pro výpočet jsou k dispozici teplotní závislosti tepelně fyzikálních vlastností svařovaných materiálů i elektrodového materiálu (především ve vysokoteplotní oblasti)
- ve výpočtech se respektují změny kontaktní plochy elektroda - plech během svařovacího cyklu (zahrnutí vlivu proudu, teploty, tloušťky plechu, tvaru elektrod, elektrodové síly).

Z dostupných literárních podkladů a při konzultaci s některými firmami, které zajišťují distribuci simulačních programů schopných modelovat procesy bodového odporového svařování, nebyl získán žádný podklad zaměřený na popis výpočtu teplotního a elektrického pole při svařování plechů s povlaky. Důvody je nutno zřejmě hledat v komplikacích, které by přineslo uvažování reálného charakteru přechodových odporů a dějů probíhajících během svařovacího cyklu v místech styku elektrod s plechem a v oblasti styku obou plechů. Na obr. 2.17 jsou vyznačeny dílčí odpory, které by při výpočtu bylo nutno uvažovat. Stejně tak by se muselo uvažovat i távení povlaků a vytlačení roztaveného kovu z povlaků v místech dosedu elektrod i ve styku obou plechů. Při svařování žárově pokovených plechů je navíc nutno uvážit, že dílčí odpor povlaku je složen z odporu vlastního povlaku a difúzní mezivrstvy vytvořené v průběhu pokovování.



Obr. 2.17 Složky elektrického odporu při svařování pokovených ocelových plechů

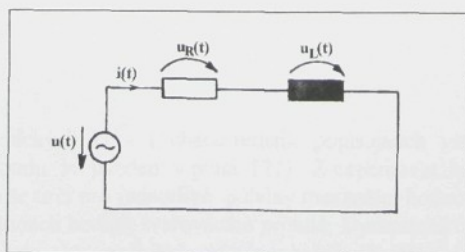
R_{me} - odpor materiálu elektrody, R_{ve} - odpor vrstev vytvořených na elektrodách, R_{vm} - odpor vrstev nanesených na ocelovém plechu, R_m - odpor ocelového plechu, $R_{k,ep}$ - kontaktní odpor mezi elektrodou a plechem, $R_{k,pp}$ - kontaktní odpor mezi svařovanými plechy

Na základě dosud publikovaných prací o simulaci bodového odporového svařování lze předpokládat, že i tyto složité podmínky mohou simulační programy postihnout, pokud budou k dispozici údaje o tepelně fyzikálních vlastnostech a jejich teplotní závislosti pro povlaky i pro vrstvy tvořící se na elektrodách. Na základě experimentálních prací zaměřených na hodnocení životnosti elektrod se zdá být rozhodujícím faktorem úspěšné aplikace simulačních programů pro odporové bodové svařování plechů s povlaky, poznání mechanismu poškozování pracovní části elektrod a tím i úspěšného modelování rychlých změn geometrie pracovních částí elektrod.

2.5 Elektrické veličiny svařovacího procesu a jejich souvislosti

Většina systémů řízení svařovacího procesu bodového odporového svařování je založena na měření a vyhodnocování elektrických veličin. Pod pojmem elektrické veličiny se u bodového svařování rozumí svařovací proud, tzv. dynamický odpor svaru, výkon, různé kombinace uvedených veličin a jejich časové integrály. Vzhledem k tomu roste snaha o analytické řešení vztahů a souvislosti elektrických veličin v sekundárním okruhu svařovacích zařízení a posouzení aplikovatelnosti klasických elektrotechnických metod pro střídavý proud i na podmínky odporového svařování.

Pro komplexní řešení souvislosti elektrických veličin se vychází z náhradního elektrického zapojení sekundárního okruhu podle obr. 2.18, sestávajícího z ohmického odporu a indukčnosti.



Obr. 2.18 Náhradní elektrické schéma sekundárního okruhu

V sekundárním okruhu stroje dochází k různým úbytkům napětí, přičemž bezprostředně měřitelné je napětí mezi elektrodami. V práci [26] WEBER G. a PREß H. posuzují možnost použití vztahů, které platí při řešení proudových okruhů se střídavým proudem sinusového průběhu na sekundární okruh odporového svařovacího stroje. Komplexní řešení vztahů mezi elektrickými veličinami lze provést za těchto předpokladů:

- v okruhu nejsou žádné nelineární členy
- soustava je v ustáleném stavu
- proud a napětí jsou harmonické veličiny
- proud a napětí mají stálou frekvenci

Za těchto předpokladů lze okamžitou hodnotu proudu získat řešením rovnice (2.28), přičemž

$$i(t) R + L \frac{di(t)}{dt} = u(t), \quad i(0) = i_0 \quad (2.28)$$

okamžitá celková hodnota napětí v sekundárním okruhu $u(t)$ může vykazovat libovolný průběh. Pro sinusový průběh napětí přejde rovnice (2.28) na tvar (2.29).

$$\hat{U} e^{j\omega t} = R \hat{I} e^{j\omega t} + j \omega L \hat{I} e^{j\omega t} \quad (2.29)$$

Výsledky práce [26] potvrzují, že ani jeden z výše uvedených předpokladů není v sekundárním okruhu svařovacího stroje při svařování splněn a k popisu závislosti mezi elektrickými veličinami je nutno volit jiný postup. K popisu elektrických veličin je vhodná časová a frekvenční analýza. Při analýze časových průběhů elektrických veličin se sledují maximální a efektivní hodnoty v jednotlivých půlvlnách a celkové efektivní hodnoty v průběhu svařovacího procesu. U jednotlivých signálů se provádí analýza jejich závislosti na frekvenci (to lze provést rychlou Fourierovou transformací).

Vztah mezi napětím a proudem WEBER a PREß [27] popisují dynamickými $U - I$ charakteristikami. Rovnice (2.30) vyjadřuje obecný vztah mezi okamžitými hodnotami napětí a proudu, rovnice (2.31) vztah mezi maximálními hodnotami napětí a proudu (zvláštní případ předchozího vztahu a rovnice (2.32) vyjadřuje vztah mezi efektivními hodnotami napětí a proudu.

$$i(t) = f(u(t)) \quad (2.30)$$

$$\hat{I} = f(\hat{U}) \quad (2.31)$$

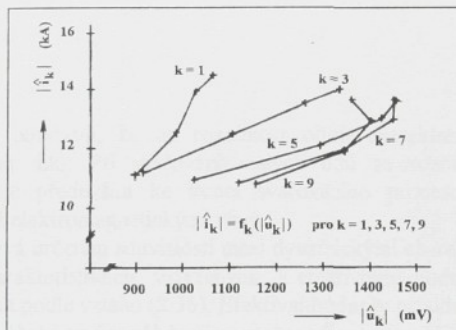
$$I = f(U) \quad (2.32)$$

Postup stanovení dynamických $U - I$ charakteristik popisujících vztah mezi maximálními hodnotami napětí a proudu je uveden v práci [27]. Z experimentálně zjištěných časových průběhů napětí a proudu se určí pro jednotlivé půlvlny maximální hodnoty napětí a proudu a to pro několik úrovní efektivních hodnot svařovacího proudu. Dynamická charakteristika je potom určena vztahem (2.33), kde k značí číslo půlvlny, u úroveň efektivní hodnoty svařovacího proudu a t_k je časový okamžik, kdy v k -té půlvlně proud dosahuje maxima.

$$|\hat{i}_v(t_k)| = f_k(|\hat{u}_v(t_k)|) \quad (2.33)$$

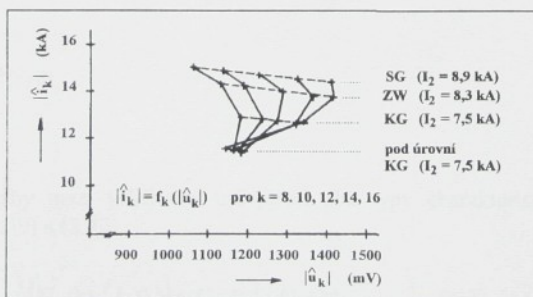
Vlivem podmínek transformátoru nejsou kladné a záporné půlvlny symetrické. Je proto účelné dynamické charakteristiky kreslit zvláště pro sudá a lichá čísla půlvln. V důsledku podmínek experimentů nebyl zjištěn fázový posun mezi napětím a proudem, časové okamžiky dosažení maxím napětí a proudu se proto shodují.

Práce [27] se zabývá stanovením dynamických charakteristik pro svařovací kleště při svařovací síle $F_s = 3 \text{ kN}$ a svařovací čas 8 period. Pro zkoumaný případ bylo zjištěno, že se proud až do 6 půlvln zvyšuje s napětím na elektrodách a až na vyjimku není tato závislost lineární. To je zřejmé z obrázku 2.19, kde jsou charakteristiky pro 1, 3, 5 a 7 půlvlnu.



Obr. 2.19 Dynamické U - I charakteristiky pro 1, 3, 5 a 7 půlvlnu

Od šesté půlvlny roste proud s napětím až k úrovni efektivní hodnoty svařovacího proudu na hranici tzv. „lepení“ a další zvyšování efektivní hodnoty svařovacího proudu až k hranici výstřiků vede ke snižování napětí na elektrodách. Tyto skutečnosti vyjadřuje obr. 2.20, na kterém jsou charakteristiky pro 8, 10, 12, 14 a 16 půlvlnu. Na obr. 2.20 jsou vyznačeny také 4 zkoumané úrovně efektivní hodnoty svařovacího proudu. Nad šestou půlvlnou jsou body odpovídající jednotlivým úrovním efektivní hodnoty proudu prakticky na přímce (vyznačeno na obr. 2.20).



Obr. 2.20 Dynamické charakteristiky pro 8, 10, 12, 14 a 16 půlvlnu
SG - hranice výstřiků, ZW - proud mezi hranicí výstřiků a hranicí tzv. „lepení“,
KG - hranice tzv. „lepení“

Časové okamžiky, kdy proud a napětí dosahují v jednotlivých půlvlnách své maximální hodnoty, nemusí obecně souhlasit. V práci [28] se proto rozlišují dynamické charakteristiky vztažené k extrémním (maximálním) hodnotám svařovacího proudu a napětí a charakteristiky vztažené k časovému okamžiku dosažení extrémní (maximální) hodnoty proudu.

Pro určení charakteristik vztažených k časovému okamžiku dosažení maxima svařovacího proudu platí vztah (2.34).

$$\left| \hat{i}_v(t_k) \right| = f_k \left(\left| u_v(t_k) \right| \right) \quad (2.34)$$

Charakteristiky vztažené k extrémním hodnotám napětí a proudu jsou matematicky formulované vztahem (2.35), ve kterém t'_k značí časový okamžik dosažení maxima napětí.

$$\left| \hat{i}_v(t_k) \right| = f'_k \left(\left| u_v(t'_k) \right| \right) \quad (2.35)$$

Výsledky práce [28] potvrzují, že na rozdílnost obou charakteristik má vliv především geometrie svařovaných dílů. Při svařování malých dílů se rozdílnost mezi oběma typy charakteristik projevuje především ke konci svařovacího procesu a je spíše způsobena termodynamickými než elektromagnetickými vlivy.

Práce [29] se zabývá určením souvislosti mezi dynamickými charakteristikami definovanými rovnicí (2.35) a charakteristikami vztaženými k efektivním hodnotám proudu a napětí v jednotlivých půlvlnách podle vztahu (2.36). Efektivní hodnoty proudu a napětí jsou definované vztahy (2.37) a (2.38). Doba trvání půlvolny je označena T_k , τ_k značí začátek k-té půlvolny a τ_{k+1} konec k-té půlvolny.

$$I_v(k) = f_k''(U_v(k)) \quad (2.36)$$

$$I_v(k) = \sqrt{\frac{1}{T_k} \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} i_v^2(t) dt} \quad (2.37)$$

$$U_v(k) = \sqrt{\frac{1}{T_k} \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} u_v^2(t) dt} \quad (2.38)$$

Vzájemné vazby mezi veličinami určujícími oba typy charakteristik jsou matematicky vyjádřeny vztahy (2.39) a (2.40).

$$\left(\left| \hat{u}_v(t'_k) \right| / \left| \hat{i}_v(t_k) \right| \right) / \left(U_v(k) / I_v(k) \right) = C_{Uv}(k) / C_{Iv}(k) \quad (2.39)$$

$$\left(\left| \hat{u}_v(t'_k) \right| \cdot \left| \hat{i}_v(t_k) \right| \right) / \left(U_v(k) \cdot I_v(k) \right) = C_{Uv}(k) \cdot C_{Iv}(k) \quad (2.40)$$

Veličiny $C_{Uv}(k)$ a $C_{Iv}(k)$ jsou definované vztahy (2.41) a (2.42) a označují se jako činitelé výkyvu napětí a proudu.

$$C_{Uv}(k) = \left| \hat{u}_v(t'_k) \right| / U_v(k) \quad (2.41)$$

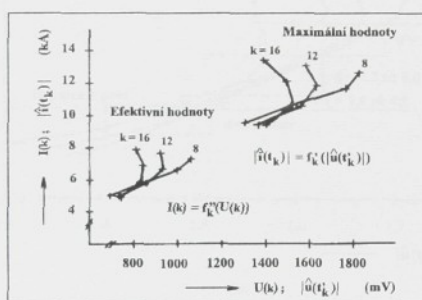
$$C_{Iv}(k) = \left| \hat{i}_v(t_k) \right| / I_v(k) \quad (2.42)$$

S využitím veličin odporu a výkonu definovaných k veličinám popisujícím oba typy dynamických charakteristik lze vztah (2.39) přepsat do tvaru (2.43) a vztah (2.40) do tvaru (2.44).

$$R'_v(t_k) / R''_v(k) = C_{Uv}(k) / C_{Iv}(k) \quad (2.43)$$

$$p'_v(t_k) \cdot p''_v(k) = C_{Uv}(k) \cdot C_{Iv}(k) \quad (2.44)$$

Jakým způsobem se projeví rozdíl mezi oběma typy dynamických charakteristik při grafickém zpracování je zřejmé z obr. 2.21.



Obr. 2.21 Dynamické charakteristiky vztahené k extrémním hodnotám a efektivním hodnotám napětí a proudu

S využitím činitelů výkyvu napětí a proudu je umožněno analytické řešení souvislostí mezi oběma typy dynamických charakteristik. To je důležité především pro svařování velkorozměrných dílů, kde se vlivem indukce projeví fázový posun proudu za napětím. Dynamické charakteristiky jsou určovány za podmínek variace úrovně efektivní hodnoty svařovacího proudu a konstantní hodnoty svařovací síly a času. Změna úrovně svařovacího proudu vede samozřejmě i ke změnám výsledné kvality svaru, tj. především ke změnám velikosti svarové čocky. V poli dynamických charakteristik lze vyznačit oblasti rozsahu proudu a napětí, kterými prochází určitá soustava charakteristik a kterým odpovídá určitá úroveň kvality svaru. Na obr. 2.22 jsou tyto oblasti různé kvality svaru vyznačené pro čistý ocelový plech (St14, tloušťka 0,8 mm) a elektrolyticky pozinkovaný plech (St14, tloušťka 0,71 mm). Z obrázku je vidět, jak se liší průběhy charakteristik i svařovací parametry (svařovací proud) pro získání kvalitních svarů u obou typů plechů. Nad hranici tzv. lepení se charakteristiky pro jednotlivé půlvlny od sebe vzdalují a zakřívují se. Při dosažení úrovně efektivní hodnoty svařovacího proudu, za které se tvoří dostatečně velké svarové čocky, projevuje se v oblasti půlvln s číslem $k \geq 8$ s nárůstem proudu pokles napětí.

Veličiny $C_{Uv}(k)$ a $C_{Iv}(k)$ jsou definované vztahy (2.41) a (2.42) a označují se jako činitelé výkyvu napětí a proudu.

$$C_{Uv}(k) = \left| \hat{u}_v(t'_k) \right| / U_v(k) \quad (2.41)$$

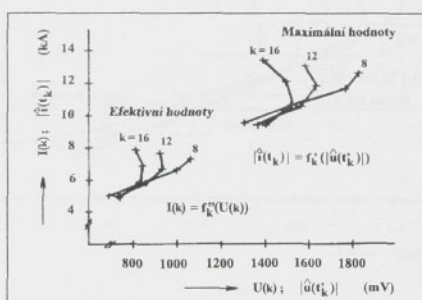
$$C_{Iv}(k) = \left| \hat{i}_v(t_k) \right| / I_v(k) \quad (2.42)$$

S využitím veličin odporu a výkonu definovaných k veličinám popisujícím oba typy dynamických charakteristik lze vztah (2.39) přepsat do tvaru (2.43) a vztah (2.40) do tvaru (2.44).

$$R'_v(t_k) / R''_v(k) = C_{Uv}(k) / C_{Iv}(k) \quad (2.43)$$

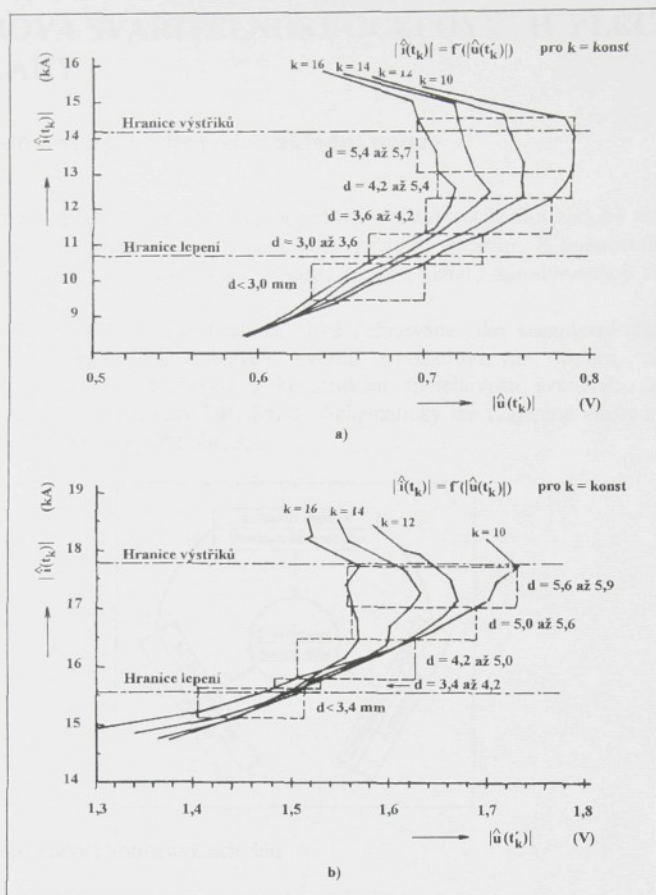
$$p'_v(t_k) \cdot p''_v(k) = C_{Uv}(k) \cdot C_{Iv}(k) \quad (2.44)$$

Jakým způsobem se projeví rozdíl mezi oběma typy dynamických charakteristik při grafickém zpracování je zřejmé z obr. 2.21.



Obr. 2.21 Dynamické charakteristiky vztahené k extrémním hodnotám a efektivním hodnotám napětí a proudu

S využitím činitelů výkyvu napětí a proudu je umožněno analytické řešení souvislostí mezi oběma typy dynamických charakteristik. To je důležité především pro svařování velkorozměrných dílů, kde se vlivem indukce projeví fázový posun proudu za napětím. Dynamické charakteristiky jsou určovány za podmínek variace úrovně efektivní hodnoty svařovacího proudu a konstantní hodnoty svařovací síly a času. Změna úrovně svařovacího proudu vede samozřejmě i ke změnám výsledné kvality svaru, tj. především ke změnám velikosti svarové čochy. V poli dynamických charakteristik lze vyznačit oblasti rozsahu proudu a napětí, kterými prochází určitá soustava charakteristik a kterým odpovídá určitá úroveň kvality svaru. Na obr. 2.22 jsou tyto oblasti různé kvality svaru vyznačené pro čistý ocelový plech (St14, tloušťka 0,8 mm) a elektrolyticky pozinkovaný plech (St14, tloušťka 0,71 mm). Z obrázku je vidět, jak se liší průběhy charakteristik i svařovací parametry (svařovací proud) pro získání kvalitních svarů u obou typů plechů. Nad hranici tzv. lepení se charakteristiky pro jednotlivé půlvlny od sebe vzdalují a zakřívují se. Při dosažení úrovně efektivní hodnoty svařovacího proudu, za které se tvoří dostatečně velké svarové čochy, projevuje se v oblasti půlvln s číslem $k \geq 8$ s nárůstem proudu pokles napětí.



Obr. 2.22 Oblasti s různou kvalitou svaru v poli dynamických charakteristik pro čistý ocelový plech a elektrolyticky pozinkovaný ocelový plech [30]

Tvorba svarové čochy a tím i kvalita svaru s tímto poklesem napětí na elektrodách při rostoucím proudu bezprostředně souvisí. Výsledky dosud publikovaných prací potvrzují, že dynamické charakteristiky jsou významným přínosem při studiu souvislosti elektrických veličin svařovacího procesu a jejich průběh má souvislost s tvorbou a kvalitou svaru. Problémem však zůstává, že tyto charakteristiky je nutno zjišťovat pro konkrétní podmínky svařovacího procesu tj. pro:

- určitý typ materiálu a geometrii svařovaných dílů
- určité svařovací parametry (tzn. svařovací sílu, svařovací čas)
- určitý typ stroje

Na průběh dynamických charakteristik budou mít samozřejmě vliv také další faktory podmiňující stochastický charakter svařovacího procesu. Nepochybně bude významný i vliv rostoucího opotřebení elektrod.

3. ODPOROVÁ SVAŘITELNOST OCELOVÝCH PLECHŮ S POVLAKY

3.1 Bodová odporová svařitelnost - základní pojmy

Jednoznačné definování pojmu bodová odporová svařitelnost je dlouhodobě diskutovaným problémem a dosud v této otázce neexistuje jednotný přístup. K hodnocení odporové svařitelnosti se používají různé metodické postupy, které s různou mírou vystihují složitost celé problematiky.

Podle ČSN 05 1310 [31] je svařitelnost kovů definována jako komplexní charakteristika vyjadřující vhodnost kovů na zhotovení svaru s požadovaným účelem, při určitých technologických možnostech svařování a konstrukční spolehlivosti svarového spoje. Tato definice v podstatě vychází z normy DIN 8528. Schematicky lze vzájemné vazby a souvislosti dílčích vlivů na svařitelnost vyjádřit obr. 3.1.



Obr. 3.1 Svařitelnost konstrukčních dílů

Aplikuje-li se uvedený obecný přístup k hodnocení svařitelnosti kovů na podmínky bodové odporové svařitelnosti ocelových plechů s povlaky je zřejmé, že se musí řešit více dílčích problémů.

Vhodnost základního materiálu k bodovému odporovému svařování je podmíněna především těmito hlavními faktory.

- chemickým složením a metalurgickými podmínkami výroby základního ocelového plechu a jeho stavem
- charakterem povlaku tj. chemickým složením, způsobem výroby, tloušťkou povlaku, stavem povrchu.

Chemické složení a metalurgické podmínky výroby plechu určují hlavní materiálové vlastnosti, které ovlivňují vlastní svařovací proces (elektrická a tepelná vodivost, hustota, měrné teplo, součinitel lineární teplotní roztažnosti, mechanické vlastnosti apod.) a charakter i rozsah změn v ovlivněném pásmu svaru (kinetika dezoxidace, záruka odolnosti proti stárnutí, způsob válcování včetně dokončujících operací).

Povlak ovlivňuje svařovací proces změnou podmínek pro průchod svařovacího proudu (elektrická a tepelná vodivost, teplota tání) a tím i podmínek pro tvorbu svaru. Druh a tloušťka povlaku rozhodují o metalurgickém a tepelném namáhání pracovní části elektrod, o

metalurgickém ovlivnění kovu svarové čochy a o charakteru a vlastnostech okolní zóny svarové čochy na styku obou plechů (tzv. adhezni oblast svaru).

Technologická možnost bodového odporového svařování je vyjádřena vlivem použité technologie svařování na vlastnosti svarového spoje určité konstrukční spolehlivosti. Možnost svařování charakterizuje proces výroby svarků a závisí především na:

- ⇒ druhu a vlastnostech svařovacího stroje a jeho ovládacích prvků
- ⇒ svařovacích parametrech a jejich časové závislosti (svařovací programy, svařovací režim)
- ⇒ použitím elektrodového materiálu - druh elektrody, tvar, rozměry, způsob a intenzita chlazení
- ⇒ vybavení pracoviště monitorovacími či korekčními systémy.

Technologická možnost svařování v podstatě spočívá v možnosti stanovit a udržet vhodné podmínky pro průběh svařovacího procesu tak, aby byla zajištěna výroba svarů předpokládané kvality za přijatelných ekonomických podmínek v daných výrobních podmínkách.

Konstrukční spolehlivost svarového spoje je vyjádřena vlivem konstrukčního řešení svarového spoje pro dané provozní podmínky a vztahuje se na určitý základní materiál a stanovené technologické možnosti jeho svařování. Konstrukční spolehlivost svaru svařovaného dílu je zajištěna tehdy, jestliže s použitým materiálem a určitým konstrukčním řešením je díl funkční za předpokládaných provozních podmínek. Konstrukční spolehlivost je závislá na:

- ⇒ tvarovém řešení spoje (např. přístupnost, vliv odbočování proudu, vzdálenost svaru od okraje plechu)
- ⇒ rozložení svarů z hlediska rozložení, druhu a velikosti napětí v konstrukci
- ⇒ vhodné volbě základního materiálu z hlediska provozních podmínek tj. mechanické namáhání, korozní prostředí, teplota
- ⇒ tuhosti spoje a postupu vytváření jednotlivých svarů na konstrukci.

Z výše uvedeného přehledu je zřejmé, že určování bodové odporové svařitelnosti ocelových plechů s povlaky (ale i bez povlaků) je obtížné, neboť se jedná o komplexní charakteristiku zahrnující mnoho faktorů. Za hlavní lze v této souvislosti pokládat řešení následujících dílčích otázek:

- ⇒ na základě rozboru provozních podmínek navrhované konstrukce se musí stanovit požadavky na svarové spoje a podle druhu a určení konstrukce stanovit základní předpokládané technicko-ekonomické parametry výroby
- ⇒ určení kritérií hodnocení kvality svarů a metodik pro jejich stanovení
- ⇒ definování pojmu životnost elektrody a vypracování metodických postupů pro její hodnocení.

Ve vztahu k požadavkům průmyslu může být bodová odporová svařitelnost podle Doc. IIW-III-995-92 určena více způsoby [32]:

- použitelným rozsahem svařovacího proudu, s kterým lze získat svary stanoveného rozměru
- typem porušení svarového spoje při odlupovací zkoušce.

Z uvedených přístupů je zřejmé, že stěžejní význam při hodnocení svařitelnosti má vždy hodnocení kvality svarů.

Použitelný rozsah svařovacích parametrů, se kterými můžeme získat akceptovatelné svary, v grafickém vyjádření ohraničují tzv. smyčky svařitelnosti. Podle smyček svařitelnosti lze posuzovat vhodnost k odporovému svařování pro všechny kovové materiály a jsou často používané ke stanovení [33]:

- ⇒ vlivu materiálu elektrod, tvaru a rozměru elektrod na použitelný rozsah svařovacích parametrů pro určitý základní materiál a určitý svařovací stroj
- ⇒ vlivu druhu a tloušťky základního materiálu na použitelný rozsah svařovacích parametrů pro určitý základní materiál a určitý tvar elektrod
- ⇒ použitelného rozsahu svařovacích parametrů v určité výrobní situaci.

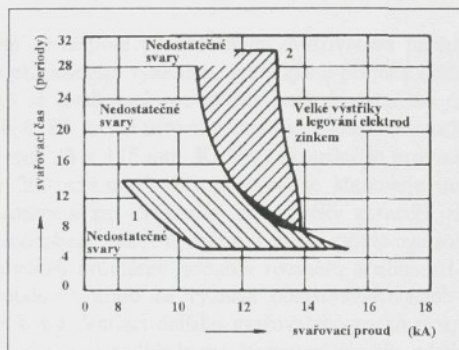
Oblast vhodných svařovacích parametrů je ve smyčce svařitelnosti vymezena hranicemi pro přijatelnou úroveň kvality svaru. Smyčka svařitelnosti může být určena jako oblast, kde se stanovují:

- svařovací proud a čas pro konstantní hodnotu svařovací síly
- svařovací proud a svařovací síla pro konstantní hodnotu svařovacího času.

Získané výsledky lze graficky zpracovat v souřadnicích $I_s - t_s$ (pro $F_s = \text{konst.}$), $I_s - F_s$ (pro $t_s = \text{konst.}$) nebo v prostorovém vyjádření v souřadnicích $I_s - t_s - F_s$. Podle Doc. IIW III -1006-93 [33] jsou určeny horní a spodní hranice vhodných svařovacích parametrů následujícím způsobem:

- spodní limit odpovídá podmínkám pro získání svaru s průměrem $3,5\sqrt{s}$, kde s je tloušťka plechu v mm (pokud se svařují nestejně tlusté plechy uvažuje se tloušťka tenčího plechu). (Tento limit je akceptovatelný na základě dohody smluvních stran za předpokladu, že odpovídající pevnost takových svarů vyhovuje z hlediska konstrukčních požadavků. Měření rozměru svaru se provádí podle doporučení normy ISO 10447)
- horní limit odpovídá podmínkám, kdy nastávají výstřiky tekutého kovu (alternativně mohou být stanovena i jiná, např. pevnostní kritéria).

Smyčky svařitelnosti pro čistý ocelový plech a plech s povlakem zinku jsou na obr. 3.2 [34].



Obr.3.2. Smyčky svařitelnosti pro nepozinkovaný (1) a pozinkovaný (2) ocelový plech

Smyčka svařitelnosti pro konstantní úroveň svařovací síly se stanovuje za variace svařovacího proudu a času. Při minimální hodnotě svařovacího času 5 period se svařovací proud postupně zvyšuje a postupně se určují podmínky pro vznik tzv. „nalepených“ spojů nebo svarů s rozměrem $3,5\sqrt{s}$, podmínky pro nominální velikost svaru $5\sqrt{s}$ a hranice výstřiků. Tento postup se dále opakuje za postupného zvyšování svařovacího času. Smyčka svařitelnosti pro konstantní úroveň svařovacího času se stanovuje za variace svařovací síly a proudu. Svařovací síly při tom odpovídají obecně doporučovaným hodnotám pro příslušnou tloušťku plechu. Při určitém nastavení svařovací síly se postupně zvyšuje svařovací proud a určují se podmínky pro vznik „nalepených“ spojů, podmínky pro nominální velikost svaru $5\sqrt{s}$ a hranice výstřiků. Tento postup se provádí opakovaně pro další úrovně svařovací síly [33].

Při určování smyček svařitelnosti se používají elektrody ze slitin mědi podle specifikace normy ISO 5182. Elektrody musí mít dostatečný průřez, aby se při průchodu svařovacího proudu nepřehřívaly a nadměrně se nedeformovaly působením svařovací síly. Dimenzování elektrod musí být v souladu s požadavky norem ISO 5184, 5821 a 5830 podle použití. Minimální množství chladicí vody činí $4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a při svařování ocelových plechů s povlaky je

množství chladicí vody přiměřeně vyšší. Teplota vody při vstupu do chladicího systému nesmí přesahovat 20 °C a na výstupu nesmí přesahovat 30 °C.

Při určování smyček svařitelnosti pro ocel bez povlaků i s povlaky a pro nerezavějící ocel se před vlastním postupem stanovení smyček svařitelnosti provádí tzv. záběh elektrod. Během záběhu se s elektrodami svaří 50 svarů se svařovacím časem odpovídajícím druhu a tloušťce základního materiálu a svařovací proud odpovídá hranici tzv. lepení plechů, nebo podmínkám vzniku svarů s rozměrem $3\sqrt{s}$. Při určování smyček svařitelnosti pro hliník a slitiny hliníku se předběžný záběh neprovádí.

Podle Doc. IIW III-991-92 [35] se smyčky svařitelnosti určují pro dvě tloušťky plechu (0,8 mm a 2 mm).

Spodní limit vymezující oblast použitelných svařovacích parametrů je stanoven minimálním přípustným rozměrem pro kruhový nebo nekruhový svar v závislosti na tloušťce plechu. Pro kruhový svar je přípustný minimální rozměr svaru ≥ 4 mm pro tloušťku plechu 0,8 mm a ≥ 6 mm pro tloušťku plechu 2 mm. Pro nekruhový svar musí být největší rozměr svaru > 4 mm pro tloušťku plechu 0,8 mm, > 6 mm pro tloušťku plechu 2 mm a nejmenší rozměr > 3 mm pro tloušťku plechu 0,8 mm a > 5 mm pro tloušťku plechu 2 mm.

Horní limit vymezující oblast vhodných svařovacích parametrů je získán po dosažení výstřiků tak, že se postupně snižuje hodnota svařovacího proudu po 100 A až do okamžiku, kdy výstřiky ustanou.

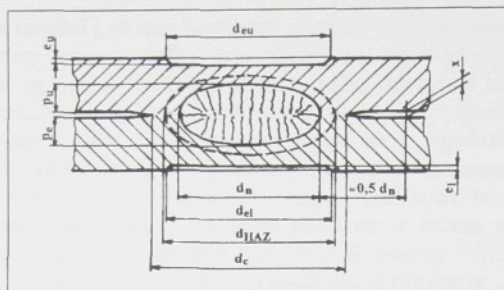
Před každým testem se nejprve předepsanými svařovacími parametry zhotoví 100 svarů jako záběh elektrod. Po předchozím výzkumu, který zjistil při jaké hodnotě svařovacího proudu se začínají tvořit svary, se svařovací proud při jinak konstantně nastavených parametrech postupně zvyšuje po 200 A. Při každé úrovni proudu se zhotoví 5 vzorků pro křížovou zkoušku z pásků plechu o rozměrech 38 x 135 mm. Křížová zkouška se provádí při maximální rychlosti pohybu upínacích částí 200 mm.min⁻¹. Při zkoušce se stanovuje maximální únosnost a po zkoušce se proměří rozměry svaru. Výsledky se graficky zpracují jako závislost $d_n = f(I_s)$, přičemž se rozdílným způsobem značení rozlišují svary podle způsobu porušení při křížové zkoušce. V tabulce se uvádějí průměrné hodnoty rozměrů a nosnosti svarů vždy pro každou úroveň svařovacího proudu. V grafu se vyznačí oblast svařovacích proudů, se kterými se získávají akceptovatelné svary. Variací dalšího svařovacího parametru, tj. svařovacího času, se při jinak stejném postupu získávají podklady pro stanovení smyčky svařitelnosti.

O dalších přístupech k hodnocení bodové odporové svařitelnosti v souladu s Doc. IIW III-991-92 se pojednává v části práce 3.4.1.

3.2 Kvalita bodových odporových svarů

Kvalita bodového odporového svaru je určena souborem dílčích uživatelských vlastností, které umožňuje jeho provozní využití. Je to jedna z výstupních veličin svařovacího procesu a s ohledem na různá kritéria hodnocení ji lze vyjádřit jako vicesložkový vektor $\mathbf{Z} = (d_e, d_n, h, F_{\max} \dots)$. Určování svařitelnosti vyžaduje nezbytně stanovení takových kritérií kvality svaru, která umožní jednoznačnou klasifikaci svarů na svary vyhovující a nevyhovující z hlediska dílčích požadavků praxe.

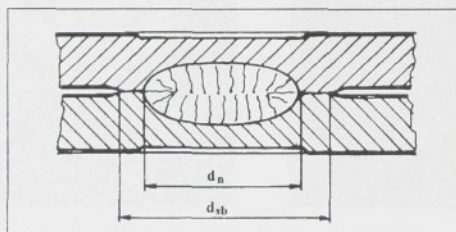
Při svařování ocelových plechů má bodový svar charakter podle obr. 3.3. Na tomto obrázku jsou zároveň vyznačeny i základní měřitelné parametry geometrie svaru v příčném řezu v souladu s [36]. Je zřejmé, že svar má dvě charakteristické oblasti. Vlastní svarovou čoučku a okolní zónu svaru.



Obr. 3.3 Bodový svar ocelového plechu a jeho geometrie

- d_n - rozměr svarové čocky měřený v rovině rozhraní obou svařovaných dílů
- d_c - rozměr svaru včetně oblastí, kde ve styčné rovině obou dílů dochází k jejich spojení v pevné fázi (tzv. corona bond)
- d_{eu} - rozměr vtisku horní elektrody
- d_{el} - rozměr vtisku dolní elektrody
- d_{HAZ} - rozměr vysokoteplotně ovlivněné zóny
- p_u - hloubka natavení horního plechu
- p_c - hloubka natavení dolního plechu
- x - odtlačení plechů (měří se podle [36] ve vzdálenosti $0,5 d_n$ od okraje svarové čocky).
- e_u - hloubka vtisku horní elektrody
- e_c - hloubka vtisku dolní elektrody

Bodové odporové svařování ocelových plechů s povlaky na bázi kovů a slitin s nižší teplotou tání než základní ocelový plech (např. Zn, Al, Pb, Cd, Al-Si, Al-Zn apod.) má určité metalurgické zvláštnosti, které je nutno respektovat při posuzování kvality svaru i při hodnocení životnosti elektrod. Bodový svar má dvě charakteristické oblasti, jak je vidět na obr. 3.4 [36].



Obr.3.4 Bodový svar ocelového plechu s povlaky

- d_n - rozměr svarové čocky
- d_{sb} - rozměr „pájené“ zóny

Svarová čocka je ve styčné rovině plechů obklopena oblastí (tzv. brazed zone), ve které dojde v podstatě k vytvoření spoje pájením. Pájku přitom tvoří roztavený kov povlaku a do této části se částečně vytlačuje roztavený kov povlaku z místa, kde se později tvoří svarová čocka. KRAUSE v práci [37] tuto oblast označuje „Haftzone“. Oblast spojení kolem vlastní svarové čocky se podílí na celkové únosnosti spoje a má vliv na korozní odolnost svaru. Z těchto hledisek jsou důležité její plastické vlastnosti, neboť vznik trhlin v této části svaru má vrubový

účinek a zároveň se umožní i přístup korozního prostředí k vlastní svarové čočce. Charakter a vlastnosti okolní zóny svarové čocky jsou závislé na svařovacích parametrech, na stavu opotřebení elektrod, na typu a tloušťce povlaku a budou odpovídat konkrétnímu chemickému složení a tenzotermickému účinku svařovacího procesu v daném místě. O některých konkrétních výsledcích hodnocení okolní zóny svaru bude pojednáno v části práce 3.2.2. V místech dosedu elektrod dochází v průběhu svařovacího procesu k natavení povlaku a vytlačování roztaveného kovu. S rostoucím počtem svařených bodů a tím i rostoucím opotřebením pracovní části elektrod se mění charakter a rozsah poškození povlaku. Při svařování novými elektrodami vzniká poměrně ostře ohraničený vtisk, z místa vtisku je kov z povlaku prakticky vytlačen a kolem vtisku vytváří val. S rostoucím opotřebením elektrod se postupně zvětšuje dosedací plocha, snižuje se měrný tlak i proudová hustota při svařování. Intenzita natavení a vytlačování kovu povlaku klesá, vtisk není tak hluboký a ostře ohraničený, neboť na elektrodách se tvoří ořepy. Porovnání vtisků neopotrebované a opotřebované elektrody je na obr. 3.5. Charakter a rozsah poškození povlaku v místech dosedu elektrod jsou určující z hlediska snížení ochranné funkce povlaku.



a)



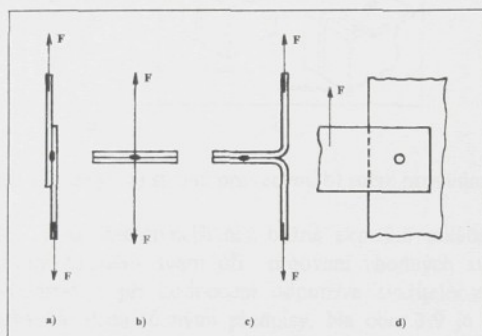
b)

Obr. 3.5 Snímky vtisků elektrod na žárově pohlínikovaném plechu typu fal 1, $s = 0,9 \text{ mm}$
a) vtisk neopotrebované elektrody (svar č. 9, $I_{ef} = 10 \text{ kA}$, $t_s = 0,12 \text{ s}$, $F_s = 3000 \text{ N}$)
b) vtisk opotřebované elektrody (svar č. 1203, $I_{ef} = 9,75 \text{ kA}$, $t_s = 0,12 \text{ s}$, $F_s = 3000 \text{ N}$)

Kov z roztaveného povlaku ovlivňuje také chemické složení kovu svarové čocky. Podle výsledků kvantitativní mikroanalýzy byl ve svarových čockách ocelových plechů s povlakem čistého hliníku zjištěn obsah Al až do 6 %. Ve svarových čockách plechů s povlakem ze slitiny Al + 8 až 10 % Si byl naměřen obsah Al do 0,5 % [38].

3.2.1 Metodické postupy hodnocení kvality odporových bodových svarů

Kvalita bodových svarů se hodnotí různými destruktivními i nedestruktivními zkouškami, které s různou mírou objektivitě postihují výsledný efekt svařovacího procesu. Vhodný rozsah a způsob hodnocení kvality závisí především na účelu prováděných zkoušek. Základní způsoby namáhání bodových svarů při praktickém řešení svařků podle Doc IIW-III-970-91 jsou na obr 3.6 [39]. Konstrukční řešení svařků samozřejmě ovlivňuje i charakter zatěžování svarů. Tato skutečnost se odráží i v používaných postupech výpočtu svarů.



Obr. 3.6 Schéma způsobů namáhání bodových svarů:

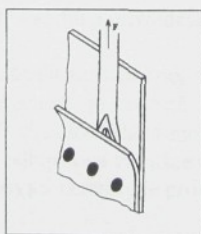
- a - namáhání na stříh, b - namáhání tahem na vytržení svaru (odtržení plechů),
- c - odlupování svarů, d - namáhání krutem

D e s t r u k t i v n í z k o u š k y bodových svařových spojů se obvykle dělí na technologické, mechanické a metalografické hodnocení.

Technologické zkoušky se používají především pro periodickou a namátkovou kontrolu svarů ve výrobním procesu a při seřizování svařovacího stroje při změně svařovaného dílu. Předností těchto zkoušek je jednoduchost provedení, aplikace běžných dilenských prostředků, zařízení a jednoduchých přípravků. K základním technologickým zkouškám bodových svarů patří:

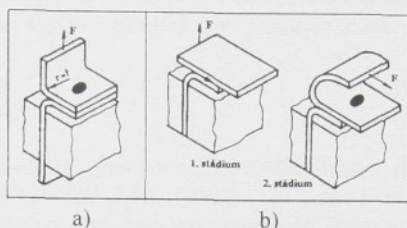
- zkouška sekáčem
- odlupovací zkoušky

Zkouška sekáčem je nejběžnější dilenská zkouška a její provedení je na obr. 3.7 [11]. Zkouška velmi rychle a snadno umožní identifikaci spojů bez svařové čočky a nadměrnou křehkost svarů.



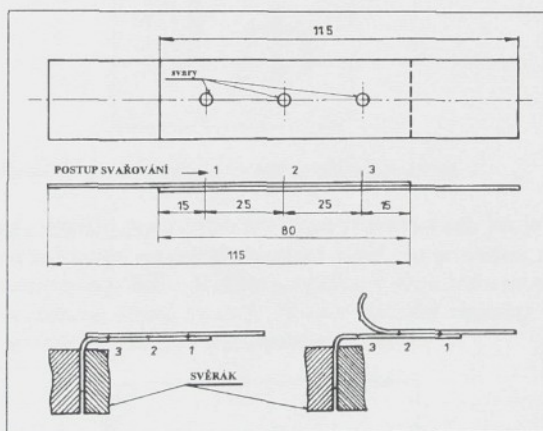
Obr. 3.7 Zkouška sekáčem

Odlupovací zkoušky mohou poskytovat cenné informace o chování svarových spojů v podmínkách blízkých provozním. Jejich princip je podobný jako u dílenské zkoušky sekáčem a mohou se provádět ručně i strojně tak, jak uvádí obr. 3.8 [40]. K ručnímu provedení zkoušky je normou doporučen speciální nástroj.



Obr. 3.8 Odlupovací zkoušky: a) strojní provedení, b) ruční provedení

Odlupovací zkoušky jsou objektivnější než běžná zkouška sekáčem a jsou vhodné a doporučované ke stanovení rozměru svaru při určování vhodných svařovacích parametrů, zkouškách životnosti elektrod a při hodnocení odporové svařitelnosti. Přesná specifikace podmínek zkoušky je obvykle dána různými předpisy. Na obr. 3.9 je provedení zkušebních vzorků a odlupovací zkouška podle Doc. IIW III-586-78 doporučovaná při testování elektrodových materiálů.



Obr. 3.9 Rozměry zkušebních vzorků a provedení odlupovací zkoušky podle [41]

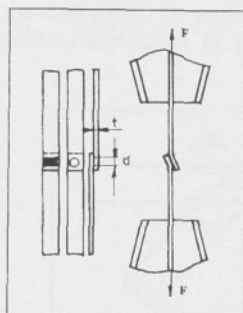
Odlupovací zkoušky umožní odhalit studené spoje a lze při nich posoudit i vlastnosti okolní zóny svarové čocky. Tato skutečnost je zvláště důležitá pro hodnocení kvality svarů pokovených ocelových plechů. Při zkoušce tahem mohou totiž svarové spoje u těchto plechů vykazovat dobré výsledky, ale při odlupovací zkoušce nevyhovují [42, 43]. Důležitým kritériem při vyhodnocování výsledků odlupovací zkoušky je proto charakter porušení vzorku.

Mechanickými zkouškami se získávají základní údaje u nosnosti svarových spojů, které slouží především pro pevnostní výpočty. Podle charakteru působení zátěžových sil se

mechanické zkoušky dělí na statické a dynamické. V praxi se používají především zkoušky statické, neboť dynamické zkoušky jsou časově náročné a nákladné. Statické mechanické zkoušky se liší zejména ve způsobu namáhání svaru v souladu se schématy na obr. 3.6. Mezi základní zkoušky, které vcelku objektivně hodnotí kvalitu bodových svarů z pevnostního hlediska patří:

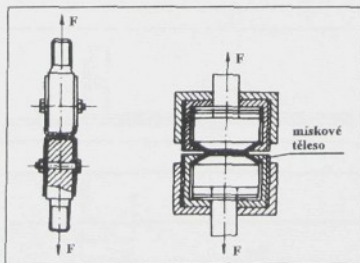
- zkouška tahem (také smyková zkouška, či zkouška tahem ve stříhu)
- zkouška tahem na vytržení svaru (také zkouška tahem „kolmo“, nebo zkouška na odtržení plechů)
- zkouška kroucením
- zkouška odlupovací

Zkouška tahem je používána pro hodnocení kvality bodových i švových přeplátovaných spojů a její princip je zřejmý z obr. 3.10. Zkouška se provádí na běžných trhacích strojích a stanovuje se při ní síla potřebná na porušení zkušebního tělesa a rozměry svaru po přetržení vzorku. Pro zjišťování maximální únosnosti bodových a průvarkových přeplátovaných jednořadých i víceřadých svarových spojů lze postupovat např. podle ČSN 05 1122 [44].



Obr. 3.10 Zkušební těleso a schéma provedené zkoušky tahem

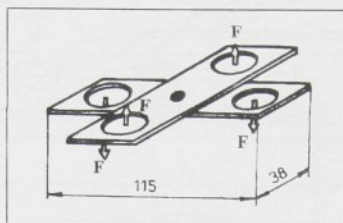
Zkouška tahem na vytržení svaru může mít různé provedení tak, jak je vidět na obr. 3.11. [9]. Při zkoušce se vyhodnocuje maximální únosnost svaru, po provedení zkoušky se posoudí vzhled lomu a stanoví se rozměr svaru. Deformace plechu v okolí svaru mohou u velmi tenkých plechů při použití zkušebního tělesa tvaru U zkreslit výsledky zkoušky. Tato nevýhoda se částečně odstraňuje použitím miskového tvaru zkušebního tělesa.



Obr. 3.11 Schéma provedení zkoušky tahem na vytržení svaru

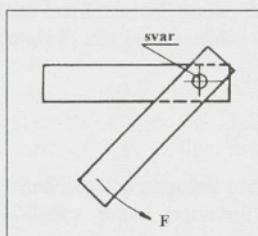
- zkušební těleso tvaru U
- zkušební těleso miskového tvaru

Na vytržení je svarový spoj namáhán i při křížové zkoušce. Provedení křížové zkoušky je znázorněno na obr. 3.12 [45]. Zkušební těleso se při zkoušce umístí do zvláštního přípravku a spoj je zatěžován staticky působící silou až do porušení. Účelem zkoušky je stanovit maximální únosnost svaru a posoudit vzhled a charakter porušení zkušebního tělesa.



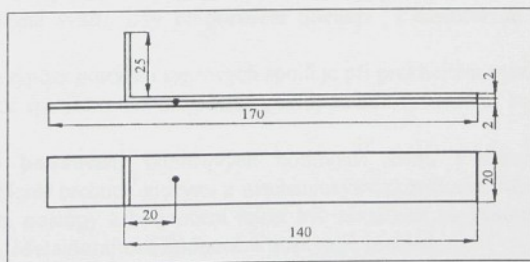
Obr. 3.12 Schéma křížové zkoušky

Zkouška kroucením je schématicky znázorněna na obr. 3.13 a stanovuje se při ní maximální krouticí moment potřebný na porušení spoje. Po porušení vzorku se posuzuje vzhled lomu a stanoví se velikost svaru. Zkouškou kroucením se zabývají i některé dokumenty IIW, ale používá se poměrně málo.

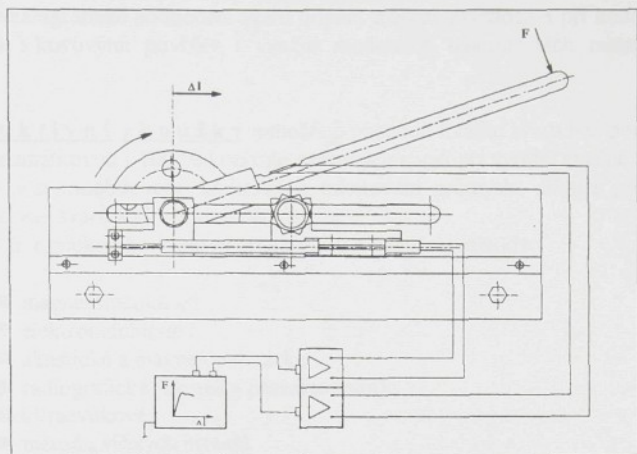


Obr. 3.13 Schéma zkoušky kroucením

Odlupovací zkouška má v praxi více variant provedení a jak již bylo uvedeno odlupovací zkoušky se obvykle zahrnují mezi zkoušky technologické. Podle Doc. IIW III- 997-92 lze při náležitém přístrojovém vybavení i při odlupovací zkoušce získat kvantitativní ukazatele kvality svaru. Na obr. 3.14 je zkušební těleso používané při ověřovacích testech zařízení a na obr. 3.15 celkové schéma zařízení k provedení zkoušky.



Obr. 3.14 Geometrie zkušebního tělesa



Obr. 3.15 Instrumentalizovaná odlupovací zkouška [46]

Při zkoušce se zjišťuje závislost síly na velikosti posunu středu upínacího mechanismu ohnuté části vzorku. Z obou hodnot lze integrací podle vztahu (3.1) určit práci potřebnou k destrukci tělesa. Ve vztahu (3.1) značí F_b sílu pro destrukci vzorku.

$$A_b = \int_0^{F_b} F d(\Delta l) \quad (3.1)$$

V práci [46] jsou uvedeny výsledky ověřovacích zkoušek pro dva typy základních materiálů při variaci svařovacích podmínek. Výsledky práce potvrzují vhodnost popsaného způsobu provedení odlupovací zkoušky ke stanovení kvantitativních ukazatelů kvality svaru.

U všech mechanických zkoušek a také při technologické odlupovací zkoušce je při vyhodnocení výsledků zkoušek nezbytné posoudit charakter porušení svarového spoje. Charakter porušení spoje závisí na svařovacích podmínkách, druhu materiálu, svařovacím zařízení a na druhu zkoušky. Základní údaje o posuzování charakteru porušení spoje a geometrie svaru uvádí [47]. V zásadě se rozlišují 3 typy porušení spoje:

- vytržení svaru, kdy k poruše dojde v základním materiálu v ovlivněné zóně, nebo ve svarové čáře a vytržená část zůstává na jednom z plechů
- porušení svaru, kdy k poruše dojde mezi plechy v rovině rozhraní napříč svarem
- částečné vytržení svaru, kdy při porušení dochází k částečnému vytržení i porušení svaru.

Vzhledem k různým typům porušení svarových spojů je při praktickém vyhodnocování výsledků zkoušek nutno přesně specifikovat i metodický postup měření „rozměrů“ svaru.

Metalografické hodnocení odporových bodových svarů v odůvodněných případech doplňuje výsledky získané technologickými a mechanickými zkouškami. Metalografické výbrusy se připravují běžnými postupy a hodnocení může být zaměřeno na posouzení makrostruktury nebo mikrostruktury. Metalografické hodnocení poskytuje přehled o:

- ⇒ geometrii svarů
- ⇒ homogenitě a velikosti svarů (trhliny, plynové dutiny, staženiny apod.)
- ⇒ strukturu svarové čáry a teplem ovlivněné oblasti
- ⇒ charakteru okolní zóny svarové čáry v rovině styku obou plechů

Často je účelné metalografické hodnocení svaru doplnit měřením tvrdosti a při hodnocení svarů ocelových plechů s kovovými povlaky i využití moderních laboratorních metalografických metod.

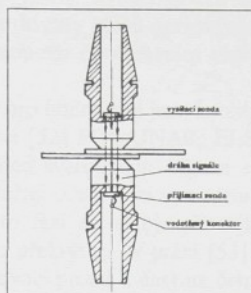
Nedestruktivní zkoušky umožňují posoudit kvalitu svaru bez porušení spoje. Jsou vhodné pro namátkovou i 100 % kontrolu svarových spojů při výrobě značně namáhaných a důležitých dílů v automobilovém, leteckém a raketovém průmyslu. Slouží pro zjišťování vnějších i vnitřních vad svarů a obvykle se dělí na:

- ◆ vizuální - tj. optickou kontrolu povrchu svaru a kapilární metody
- ◆ fyzikální
 - magnetoinduktivní
 - elektroinduktivní
 - akustické a magnetoakustické
 - radiografické (zkoušky prozařováním)
 - ultrazvukové
 - metodu vířivých proudů

Optická kontrola povrchu bodových svarů je zaměřena na posouzení velikosti a hloubky vtisku elektrod a vad povrchu svaru (tj. natavení povrchu základního materiálu, výstřik z povrchu materiálu). Optická kontrola zahrnuje pozorování průběhu svařovacího procesu a kontrolu svarku. Při sledování průběhu svařovacího procesu lze postihnout výstřiky tekutého kovu a posoudit náběhové barvy v bezprostředním okolí dosedu elektrod. Optická kontrola svarku je zaměřena na posouzení vtisku elektrod (velikost vtisku, tvar, symetrie, nalegování z elektrod), vad povrchu svaru (natavení a výstřiky z povrchu materiálu, velká teplem ovlivněná oblast, povrchové trhliny), velikosti odtlačení plechů a celkových deformací svarku. Optická kontrola umožňuje velmi rychle a účinně zjistit nevhodné nastavení základních svařovacích parametrů, špatnou volbu elektrodového materiálu a špatnou přípravu elektrod i nedostatky v silovém systému svařovacího stroje.

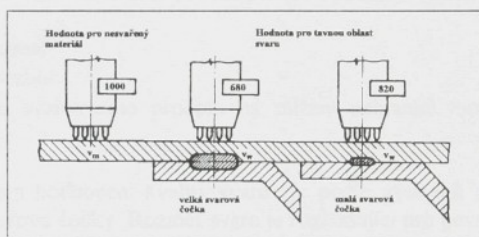
Zkouška prozářením rentgenovými paprsky umožňuje při kontrole bodových svarů odhalit vnitřní vady, tj. plynové dutiny, staženiny, trhliny i výstřiky tekutého kovu. Vzhledem ke geometrii svařovaných dílů lze používat pouze záření dopadající kolmo k povrchu plechu a tím jsou vymezeny i určité hranice pro odhalení vad, které nejsou příznivě orientované ke směru záření. Zkouška prozářením je sice v praxi nejvíce používanou nedestruktivní metodou kontroly svarů, ale její aplikace je pro kontrolu bodových svarů s ohledem na obvykle velký počet bodů a nákladnost metody diskutabilní. Navíc zkouškou prozářením nelze spolehlivě identifikovat spoje bez svarové čocky (nalepené svary) a pro tyto účely je nutno použít jinou průkaznější metodu, např. zkoušku ultrazvukem [48].

Z dalších uvedených nedestruktivních metod zkoušení svarů se pro kontrolu kvality bodových svarů ve větším rozsahu používá zkouška ultrazvukem. Při zkoušce lze rozlišit kvalitní svary, svary s vnitřními vadami (tj. plynové dutiny, staženiny, trhliny) a většinou i svary bez svarové čocky. Čelní ultrazvukové sondy se používají v případě, kdy svařované plechy mají tloušťku větší než 3 mm. Sondy mají průměr srovnatelný s rozměry svarové čocky. Úhlové sondy umožňují kontrolu bodových svarů plechů s tloušťkou již od 1 mm. Ke zkouškám se používají dvě úhlové sondy, z nichž jedna pracuje jako vysílací a druhá jako přijímací, nebo obě sondy plní současně obě funkce. Při kontrole bodových svarů se používá také průchodová metoda realizovaná přímo ve svařovacím stroji. Vysílací i přijímací sondy jsou umístěny v elektrodách. Schéma průchodové metody je na obr. 3.16 [49]. Ultrazvuková kontrola je součástí svařovacího cyklu a může být spojena s optickou nebo akustickou signalizací. Nevýhovující svary se mohou ve stroji ihned opravit.

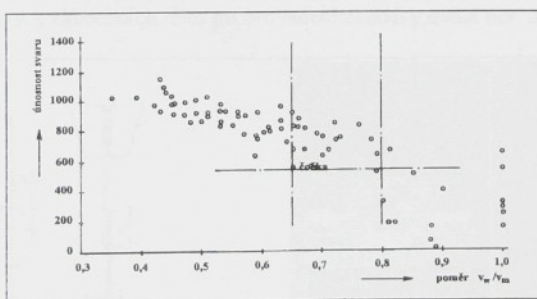


Obr. 3.16 Průchodová ultrazvuková metoda se sondami umístěnými v elektrodách

K nedestruktivním metodám kontroly bodových svarů se řadí i metoda založená na principu měření elektrického odporu v místě svaru [50, 51]. Odporová sonda s individuálně odpruženými snímacími hroty se přitiskne na povrch vtisku po elektrodách a do svaru se vyšle impuls stejnosměrného proudu. Výsledný pokles napětí je převeden na hodnotu odporu. Poměr odporu svaru a odporu nesvařených plechů je v korelaci s velikostí svaru. Princip stanovení hodnoty odporu základního materiálu v_m a odporu tavné oblasti v_w je na obr. 3.17 a na obr. 3.18 je graf závislosti únosnosti svaru stanovené smykovou zkouškou na poměru v_w/v_m [50]



Obr. 3.17 Princip stanovení odporu pro nesvařený materiál a odporu v místě svaru



Obr. 3.18 Závislost únosnosti svaru na poměru v_w/v_m (jednotky pro únosnost svaru nejsou v původní práci uvedeny)

Podle údajů, které uvádí HEIN v [50] je použití této metody vhodné především pro hodnocení kvality svarů tenkých plechů (maximálně do tloušťky 6,4 mm). Metoda je výrazně produktivnější než metoda ultrazvukového zkoušení svarů a lze předpokládat rozšíření její

praktické aplikace. Pro hodnocení kvality svarů ocelových plechů s povlaky bude aplikace této metody diskutabilní, neboť s rostoucím opotřebením elektrod se mění výrazně stav povrchu v místě vtisku elektrod.

Pro sledování tvorby svaru a pro hodnocení jeho kvality může být perspektivní také metoda sledování akustické emise. V práci [52] POLAJNAR, ELSAYED a PROSENC analyzují dílčí zdroje akustické emise ve fázi před svařováním, během svařovacího procesu i při zatěžování svarového spoje. Za důležité považují především vymezení užitečných signálů během průchodu svařovacího proudu, neboť v této fázi se zdroje ukazující na růst svarové čočky a zdroje ukazující na nízkou kvalitu svaru překrývají. V práci [53] POLAJNAR a PROSENC popisují vliv svařovacích parametrů (svařovací proud a čas) na četnost impulsů akustické emise ve fázi tvorby svaru a ve fázi chladnutí svaru pro dva různé materiály.

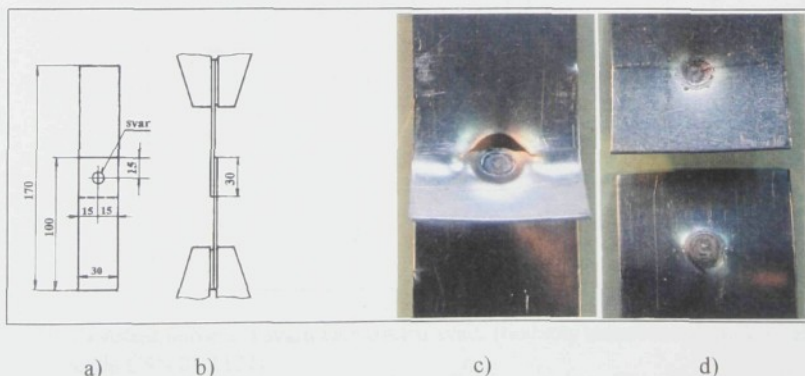
Zvláštní postavení mezi metodami nedestruktivního hodnocení bodových odporových svarů mají metody monitorování kvality svaru na základě sledování a vyhodnocení charakteristického průběhu veličin svařovacího procesu. O těchto metodách pojednává kapitola 5. v práci [54].

3.2.2 Hodnocení kvality odporových bodových svarů plechů s povlaky - postupy aplikované autorem práce

Metodicky postup hodnocení kvality svarů byl stanoven s přihlédnutím k metalurgickým zvláštnostem svařovacího procesu u svařování plechů s povlaky. Hodnocení kvality svarových spojů je zaměřeno na:

- mechanické zkoušení
- metalografický rozbor
- hodnocení vlivu svařovacího procesu na snížení ochranné funkce povlaku v místech dosedu elektrod

Základním kritériem hodnocení kvality svaru je podle výsledků prací [55, 56] rozměr svaru, resp. rozměr svarové čočky. Rozměr svaru je rozhodující pro pevnostní vlastnosti spoje a s ohledem na velikost svaru se samozřejmě provádí i výpočet svarového spoje při návrhu strojních konstrukcí. V práci [57] byla při zkouškách životnosti elektrod únosnost svarů hodnocena zkouškou tahem podle [44]. Schéma provedení zkoušky, rozměry zkušebních těles a pohled na oblast svaru u zkušebních těles po provedení zkoušky uvádí obr. 3.19.



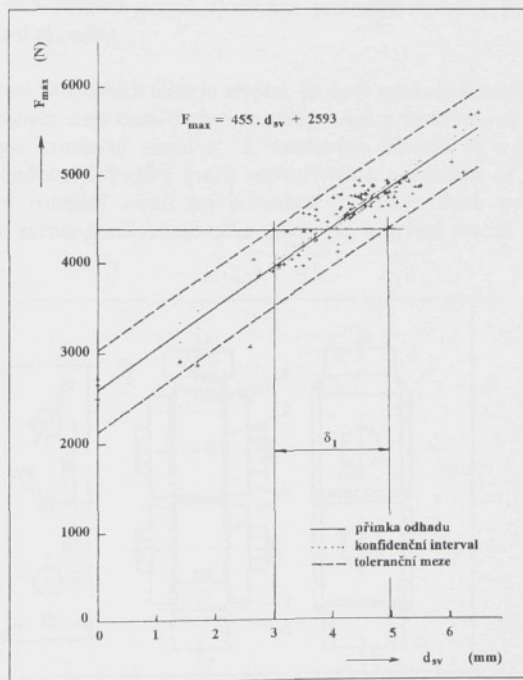
Obr. 3.19 Zkouška tahem podle ČSN 05 1122 - a) používaná zkušební tělesa, b) schéma provedení zkoušky, c) a d) tělesa po zkoušce tahem (oblast svaru)

Zkušební tělesa svařovaná během testu životnosti elektrod se svařovala na přeplátovaných pásech o rozměrech 100 x 1000 mm, přičemž první svar se nevyhodnocuje. Tělesa byla z pásu oddělena na tabulových nůžkách. Při zkouškách tahem bylo možno pozorovat dva typy porušení zkušebních těles, jak je zřejmé z obr. 3.19 c) a d):

- k poruše tělesa dojde mimo svar v základním materiálu - obr.3.19 c)
- k poruše dojde ustrížením svaru - obr. 3.19 d)

K poruše zkušebních těles s kvalitními svary dochází vždy v základním materiálu. Pokud došlo k poruše tělesa ve svaru, bylo velmi obtížné stanovit rozměr svaru, resp. oblast natavení. Rozměry svaru byly měřeny na Abheho komparátoru ve dvou na sebe kolmých směrech a z naměřených hodnot se stanovila střední hodnota. Pro měření rozměru svarů s porušením těles podle obr. 3.19 c) bylo možné pouze po předchozím zdeformování zkušebního tělesa.

Na obr. 3.20 je vidět graf zpracovaný z naměřených hodnot $F_{\max}$, d_{sv} pro jeden z realizovaných testů životnosti elektrod. Při výpočtu byl použit model lineární regrese s jednou nezávislou proměnnou. Rovnice přímky od bodu je uvedena rovněž na obrázku a v grafu je vyznačen i konfidenční interval pro hodnoty skutečné regresní přímky s konfidenčním koeficientem 0,95 vypočítaný pro jednotlivé naměřené hodnoty d_{sv} . Na obrázku jsou rovněž vyznačeny toleranční meze, které s pravděpodobností 0,95 zahrnují 95% podíl základního souboru. Výběrový koeficient korelace v hodnoceném souboru dat z 90 zkoušek tahem činil 0,94.



Obr. 3.20 Závislost únosnosti svaru na rozměru svaru (hodnoty stanovené zkouškou tahem podle ČSN 05 1122)

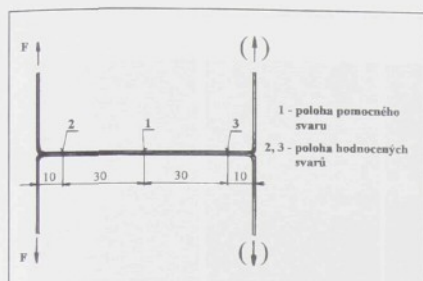
$F_{\max}$ maximální únosnost svaru

d_{sv} rozměr svaru naměřený po provedení zkoušky tahem

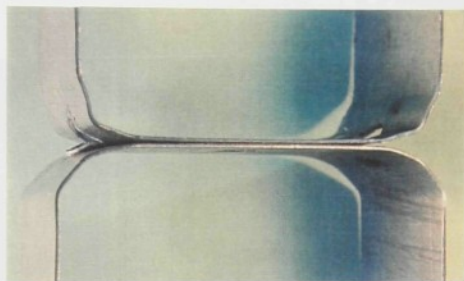
δ_1 šířka rozptylového pásma

Z grafu je zřejmé, že spoje s malou svarovou čoučkou a spoje bez svarové čoučky mají poměrně vysokou únosnost zajišťovanou adhezí oblastí svaru.

V rámci práce [57] se pro hodnocení kvality svarů používala také odlupovací zkouška strojní s uspořádáním podle obr. 3.21 a). Na obr. 3.21 b) je vidět oblast svaru u zkušebního tělesa po provedení zkoušky (šířka tělesa byla 30 mm).



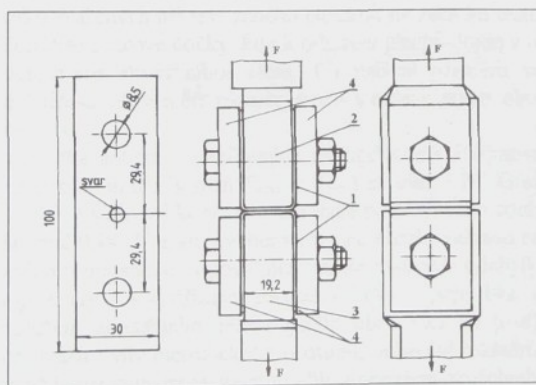
a)



b)

Obr. 3.21 Odlupovací zkouška strojní: a) schéma provedení zkoušky, b) těleso po provedení zkoušky

Z charakteru porušení zkušebních těles je zřejmé, že opět vznikaly komplikace se změřením rozměru svaru. Navíc nebyla mezi naměřenými rozměry svarů a stanovenými únosnostmi svarů zjištěna dostatečně těsná korelační závislost. Z uvedených důvodů se v již dalších pracích odlupovací zkouška k hodnocení kvality svarů nepoužívala a s ohledem na potíže spojené se spolehlivým stanovením rozměrů svarů po provedení zkoušky tahem podle ČSN se pro hodnocení kvality svarů začala používat zkouška tahem na odtržení plechů v provedení podle obr. 3.22 [54].

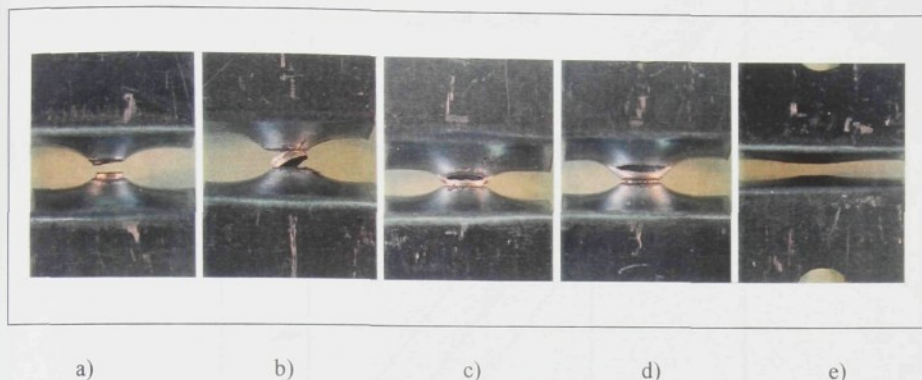


a)

b)

Obr. 3.22 Zkouška tahem na odtržení plechů - a) tvar a rozměry zkušebního tělesa před ohnutím do tvaru U, b) schéma provedení zkoušky (1 - zkušební vzorek, 2, 3 - horní a dolní těleso přípravku).

Zkušební tělesa se svařovala na přepletovaných páslech 100 x 1000 mm a z pásu se oddělovala na tabulových nůžkách (první svar se nehodnotí). U zkoušky tahem na odtržení plechů se vyhodnocovala opět maximální únosnost svarů F_{max} a po provedení zkoušky se na Abheho komparátoru změřily ve dvou na sebe kolmých směrech rozměry svaru, resp. svarové čocky a z naměřených hodnot se stanovila střední hodnota. Na obr. 3.23 jsou fotografie zkušebních těles po provedení zkoušky tahem na odtržení plechů s různým charakterem porušení.



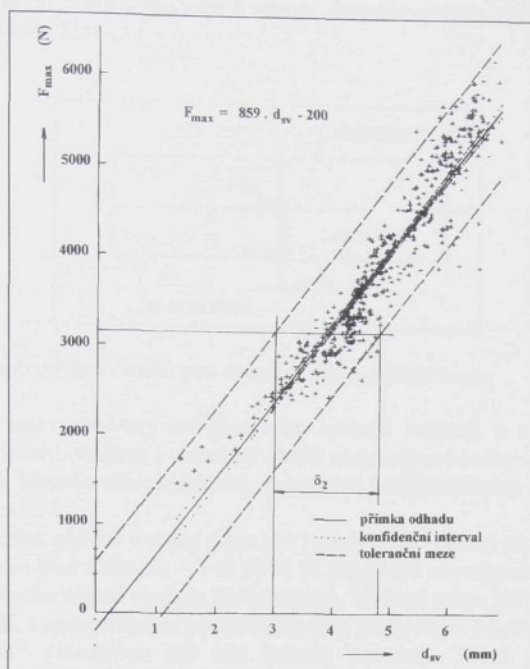
Obr. 3.23 Zkušební tělesa s různým charakterem porušení při zkoušce na odtržení plechů

Na obr. 3.22 a), b) jsou tělesa u nichž došlo k vytržení svaru z jednoho, resp. částečně z obou plechů. Takové způsoby porušování zkušebních těles výrazně převládají. Na obr. 3.23 c) je těleso, u kterého je iniciace porušení obdobná jako v předchozích případech. Po částečném vytržení svaru se však trhlinka šíří dál mimo oblast svaru do základního materiálu. Na obr. 3.23 d) je těleso s porušením mimo oblast svarové čocky v základním materiálu. Tento způsob porušení je ojedinělý a nastává především u vzorků svařených po kompenzaci opotřebení elektrod prodloužením svařovacího času, tj. s výraznějším tepelným ovlivněním základního materiálu, nebo občas u vzorků svařených při tzv. záběhu elektrod na začátku testu životnosti elektrod. Na obr. 3.23 e) je těleso bez svarové čocky, kdy k odtržení plechů dojde v rovině styku obou plechů bez výraznější deformace zkušebního tělesa. Při měření rozměru svaru se bez ohledu na charakter porušení tělesa vždy měří rozměr svaru v rovině styku obou plechů. Pro spoj bez svarové čocky je $d_{sv} = 0$.

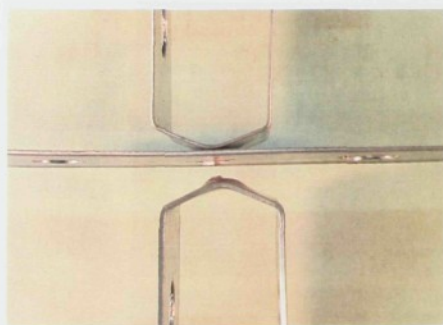
Z výsledků několika souborů zaměřených na hodnocení životnosti elektrod byl metodou regresní analýzy sestrojen graf závislost $F_{max} = f(d_{sv})$ na obr. 3.24. Graf je sestrojen analogicky jako graf na obr. 3.20. Výběrový koeficient korelace hodnoceného souboru dat ze 433 zkoušek na odtržení plechu činil 0,94. V grafu uvedená rovnice přímky odhadu neposkytuje pro spoje bez svarové čocky hodnotu únosnosti odpovídající realitě. Největší odchylky od stanovené regresní závislosti vykazují svary s výstřikem tekutého kovu, spoje bez svarové čocky a spoje s charakterem porušení zkušebního tělesa podle obr. 3.23 c) a d). V této souvislosti je samozřejmě nutno uvážit i vliv metodického postupu, určování rozměru svaru, neboť stanovená únosnost svaru se vždy vztahuje na skutečnou oblast porušení zkušebního tělesa.

Z porovnání grafů na obr. 3.20 a obr. 3.24 vyplývá, že tahová zkouška na odtržení plechů indikuje změnu rozměru svaru výraznější změnou únosnosti svarů, než zkouška tahem podle ČSN 05 1122, ale závislosti $F_{max} - d_{sv}$ u obou zkoušek mají téměř stejnou šířku rozptylového pásma ϑ_1 a ϑ_2 . Hlavní předností zkoušky na odtržení plechů je snadné měření rozměru svarů a jednoznačné rozlišení spojů bez svarových čockek. Příprava zkušebních těles je však ve srovnání s tělesy pro normalizovanou zkoušku tahem pracnější. Zkouška tahem na odtržení plechů se

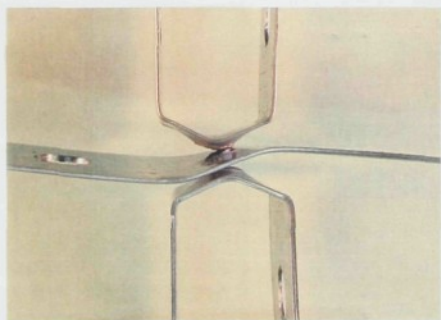
velmi dobře osvědčila také při hodnocení svarových spojů při svařování 3 plechů. Způsob přípravy tělesa je zřejmý z obr. 3.25, na kterém je zobrazeno zkušební těleso po provedení zkoušky.



Obr. 3.24 Závislost únosnosti svaru na rozměru svaru - hodnoty stanovené zkouškou tahem na odtržení plechů



a)

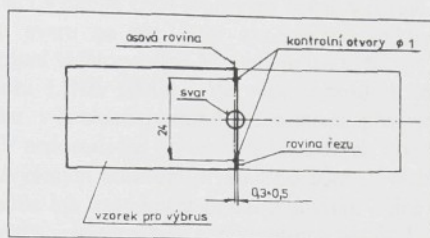


b)

Obr. 3.25 Zkušební těleso po provedení zkoušky na odtržení plechů - svar tří plechů

Obvykle se při zkoušce vytrhne jeden ze svarů tak, jako na obr. 3.25 a). Pokud se začnou porušovat oba svary současně, dochází k deformaci prostředního plechu jako na obr. 3.25 b).

V práci [54] a [58] se značná pozornost věnovala metalografickému rozboru svarových spojů. Metalografické výbrusy se prováděly v osové rovině svaru kolmo na povrch plechů. Před oddělením vzorku pro přípravu výbrusu se osová rovina vyznačí dvěma otvory $\varnothing 1$ mm, aby během přípravy výbrusu zůstala možnost kontroly skutečné polohy roviny výbrusu. Způsob odběru vzorku je na obr. 3.26 [54].

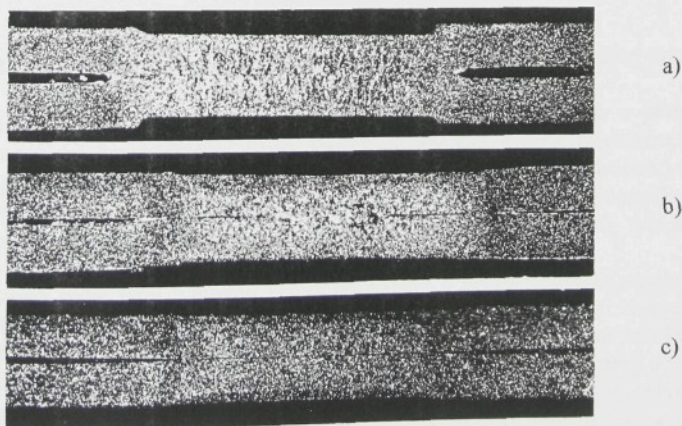


Obr. 3.26 Způsob odběru vzorků pro metalografický rozbor svaru

Při hodnocení makrostruktury se především hodnotí velikost a tvar svarové čochy, metalografické vady svaru, velikost a charakter okolní zóny svarové čochy v rovině styku plechů (tzv. adhezni oblast), hloubka vtisku elektrod, eventuálně i další měřitelné charakteristiky spoje v souladu s částí práce 3.2.

Při experimentálních pracích v rámci práce [54] se používal ocelový plech od fy THYSEN typ fal 1 s povlakem na bázi slitiny Al + 8 až 10 % Si. Plech měl oboustranný povlak v množství 80 g.m^{-2} . Tloušťka plechu včetně povlaku činila 0,8 mm. V rámci práce [58] se používal ocelový plech od fy COCERIL s oboustranným povlakem na bázi slitiny 55 % Al, 43,5 % Zn a 1,5 % Si v množství 200 g.m^{-2} s tloušťkou 0,8 mm (včetně povlaku). Tento plech je označován obchodním názvem Galvalume.

Na obr. 3.27 jsou ukázky snímků makrostruktur svarových spojů plechu fal 1. Na obr. 3.27 a) je snímek svaru bez vnitřních vad s dobře vyvinutou svarovou čochou.



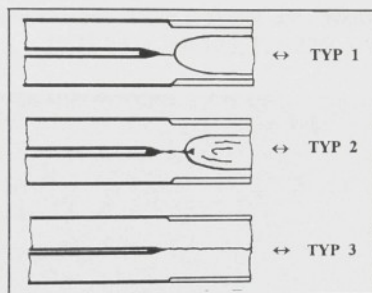
Nital 3%

10 x

Obr. 3.27 Makrostruktury svarových spojů - plech typu fal 1

Na obr. 3.27 b) je příklad svaru s metalurgickými vadami a nedostatečně vyvinutou svarovou čoučkou a na obr. 3.27 c) je spoj bez svarové čoučky. U spojů na obr. 3.27 b) a c) se v rovině styku plechů vyskytují vrstvy, které se s ohledem na šikmé osvětlení výbrusu jeví na obrázku černě. U snímků mikrostruktur zhotovených při přímém osvětlení se budou jevit jako světlé. Tyto vrstvy u svarů ocelových plechů s povlaky na bázi Al označuje KRAUSE [37] jako „hliníkové vměstky“. Obdobné vrstvy se vyskytují také u svarů plechů s povlaky na bázi Zn, slitiny Al-Zn a vyskytují se i v okolní zóně svarových čouček v rovině styku plechů u kvalitních svarových spojů, tj. i u svaru na obr. 3.27 a). Světelná mikroskopie neumožňuje blíže specifikovat povahu a složení těchto vrstev. V rámci práce [54] a [58] byly proto provedeny analýzy na ED analyzátoru LINK 10000. Ve všech případech jde o vrstvy se zvýšeným obsahem prvků z povlaku v širokém rozmezí koncentrací především v okolní zóně svaru v rovině styku plechů. V nedostatečně vyvinutých svarových čoučkách se obvykle jedná o feritické vrstvy s mírně zvýšeným obsahem prvků z povlaku. V okolní zóně svarových čouček v rovině styku plechů může být zastoupení prvku z povlaku velmi vysoké a mohou se zde vytvářet tenké tvrdé a křehké vrstvy tvořené např. u plechů typ řál 1 slitinami Al-Fe-Si. To bylo potvrzeno nejenom semikvantitativní analýzou vrstev, ale také měřením mikrotvrdosti [54].

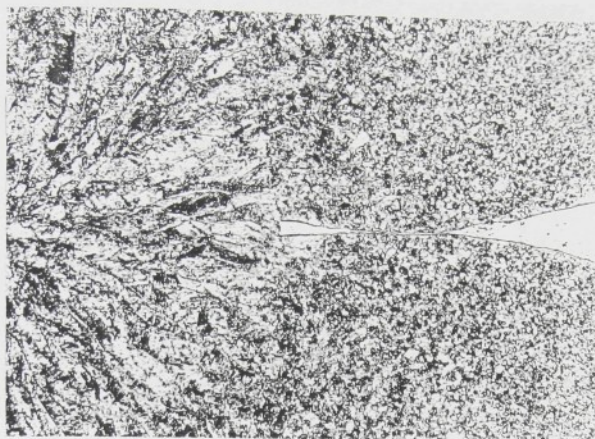
Při makroskopickém hodnocení lze spoje podle metalurgické kvality svarové čoučky a charakteru okolní zóny svarové čoučky v rovině styku plechů rozřadit do tří typů podle schématického obr. 3.28.



Obr. 3.28 Typy svarových spojů podle kvality svarové čoučky a okolní zóny svaru

Svarové spoje typu 1 mají svarovou čoučku bez vrstev obohacených o prvky z povlaku plechů. Jsou typické pro počáteční stadia klasických zkoušek životnosti elektrod, kdy se při vhodném nastavení svařovacích parametrů (vhodné intenzitě svařovacího procesu) tvoří kvalitní svary s dostatečně velkou svarovou čoučkou. Na obr. 3.29 je snímek mikrostruktury z oblasti okraje svarové čoučky a okolní zóny svarové čoučky v rovině styku plechů, typický pro svary typu 1.

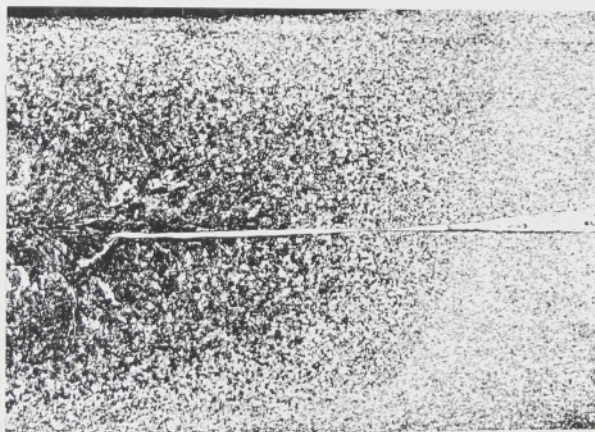
U svarových spojů typu 2 mohou vrstvy obohacené o prvky z povlaku zasahovat z okolní zóny svaru částečně do svarových čouček, nebo je částečně lemuji. Mohou se vyskytovat také přímo ve svarových čoučkách. Tak vypadají svarové spoje tvořící se v dalším průběhu klasických zkoušek životnosti elektrod, kdy se s rostoucím opotřebením elektrod vytvářejí po metalurgické stránce nedostatečně vyvinuté svary. Pokud je svarová čoučka ještě dostatečně velká mají takové svary obvykle vyhovující pevnostní vlastnosti. Na obr. 3.30 je snímek okraje svarové čoučky a okolní zóny svaru, kde obohacená vrstva zasahuje částečně i do svarové čoučky.



Nital 3%

100 x

Obr. 3.29 Svar typu 1 - okraj svarové čocky a okolní zóna svarové čocky u svaru plechu fal 1 (svar č. 8, $I_s = 10,35$ kA, $t_s = 0,10$ s, $F_s = 2250$ N)

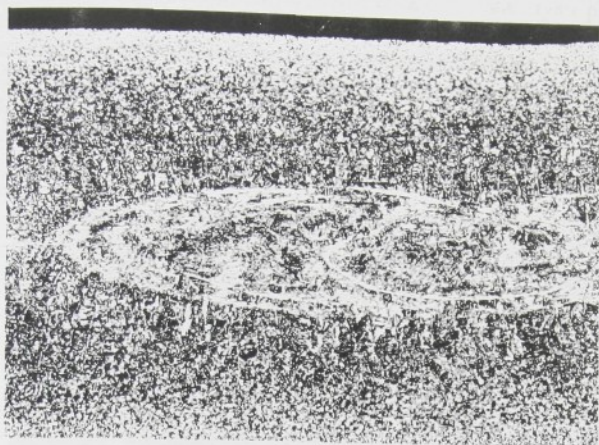


Nital 3%

50 x

Obr. 3.30 Svar typu 2 - okraj svarové čocky a okolní zóna svarové čocky u svaru plechu fal 1 (svar č. 1106, $I_s = 10$ kA, $t_s = 0,12$ s, $F_s = 2250$ N)

Na obr. 3.31 je snímek struktury z oblasti tvořící se svarové čocky s výskytem vrstev obohacených o prvky z povlaku u svaru svařeného ke konci životnosti elektrod. Ze snímku lze usuzovat na dynamické poměry počátečního stádia tvorby svarové čocky. Vrstvy obohacené o prvky z povlaku se vyskytují i ve svarových čockách svarů vytvořených za situace, kdy opotřebení elektrod je kompenzováno pouze zvýšením svařovacího času. Pouhé zvýšení svařovacího času totiž nezabrání snížení intenzity svařovacího procesu.



Nital 3%

50 x

Obr. 3.31 Svar typu 2 - střední část svaru, počáteční stádium tvorby svarové čocky u plechu fal 1 (svar č. 1204, $I_s = 9,85$ kA, $t_s = 0,12$ s, $F_s = 2250$ N)

Svarové spoje typu 3 nemaji svarovou čocku a jsou nevyhovující. V rovině styku plechů je obvykle souvislá vrstva obohacená o prvky z povlaku v koncentracích, které se mohou pohybovat v širokém rozmezí. Spoje typu 3, jsou tzv. nalepené či pájené a vytvářejí se při nadměrném opotřebení elektrod v závěrečném stadiu zkoušek životnosti, nebo při nevhodně nastavených svařovacích parametrech. Příklad takového spoje je na obr. 3.32. Snímek je pořízen ze stejného spoje, jehož makrostruktura je na obr. 3.27 c). Základní ocelový plech v oblasti tvorby svaru nebyl nataven, neboť svařovací čas byl příliš krátký.

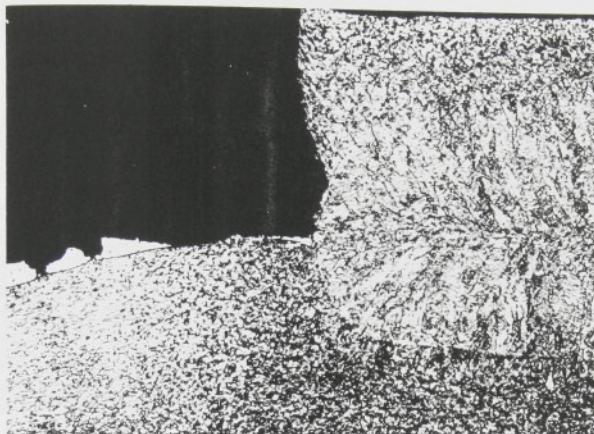


Nital 3%

50 x

Obr. 3.32 Spoj typu 3 - svarová čocka nevznikla - tzv. nalepený spoj (svar č. 2, $I_s = 9,85$ kA, $t_s = 0,08$ s, $F_s = 2250$ N)

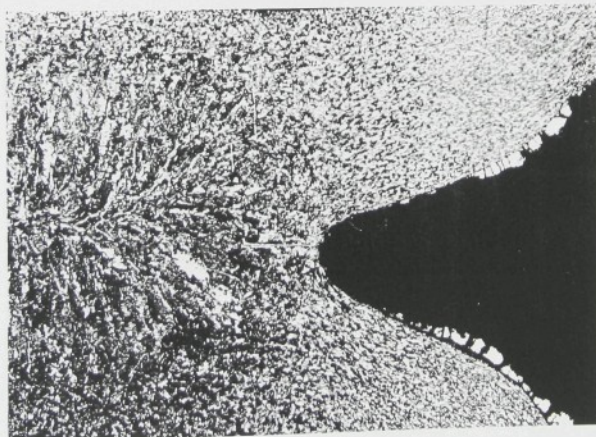
Charakter a vlastnosti okolní zóny svarové čocky v rovině styku plechů mají samozřejmě vliv také na způsob porušování zkušebních těles při mechanické zkoušce na odtržení plechů. Na obr. 3.33 je snímek struktury okraje svaru ze zkušebního tělesa po zkoušce tahem, kde k poruše došlo vytržením svaru z obou plechů. Z obrázku je zřejmé, že celá okolní zóna svarové čocky je porušená a vytržení svaru začíná u svarové čocky. V souladu s dříve uvedeným způsobem měření rozměrů svaru v tomto případě naměřený rozměr svaru odpovídá průměru svarové čocky.



Nital 3%

50 x

Obr. 3.33 Okraj svaru vytrženého z plechu při zkoušce tahem (svar č. 16, $I_s = 10$ kA, $t_s = 0,12$ s, $F_s = 2250$ N)

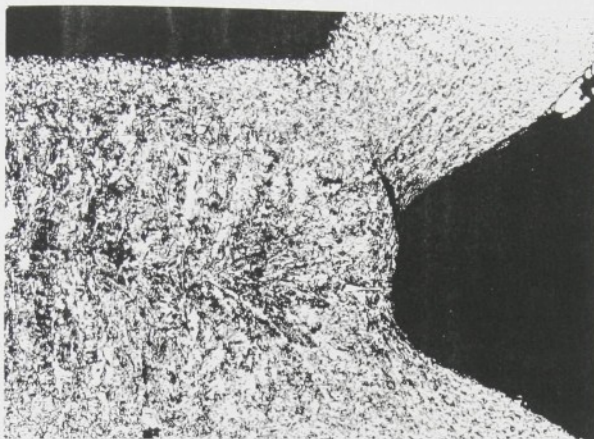


Nital 3%

50 x

Obr. 3.34 Okraj svaru po zkoušce tahem na vytržení svaru - část okolní zóny svarové čocky neporušena (svar č. 205, $I_s = 10,6$ kA, $t_s = 0,20$ s, $F_s = 2250$ N)

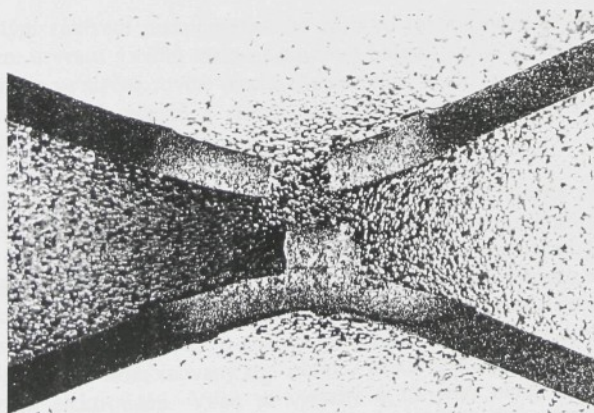
Na obr. 3.34 je snímek struktury okraje svaru ze zkušebního tělesa, kde k porušení došlo v základním materiálu jako u tělesa na obr. 3.23 d). Ze snímku je vidět, že část okolní zóny svarové čocky zůstává neporušena. Na obr. 3.35 je snímek z druhého okraje svaru, kde se začíná trhat plech v blízkém okolí svarové čocky. Také zde však je část okolní zóny svarové čocky neporušená. Naměřený rozměr svaru po zkoušce tahem je větší, než rozměr svarové čocky. Velikost neporušené části okolní zóny svarové čocky je samozřejmě rozdílná.



Nital 3%

50 x

Obr. 3.35 Okraj svaru po zkoušce tahem na vytržení svaru - část okolní zóny svarové čocky neporušena, začíná se vytrhávat i svar

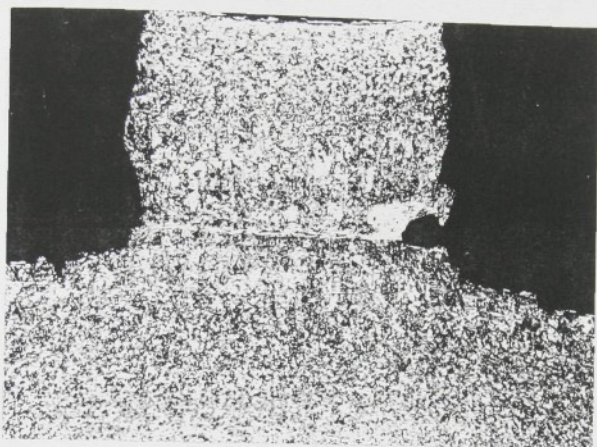


Nital 3%

10 x

Obr. 3.36 Makrostruktura svaru po provedení zkoušky tahem na vytržení svaru (svar č. 1307, $I_s = 9,95$ kA, $t_s = 0,12$ s, $F_s = 2250$ N)

Na obr. 3.36 je makrostruktura svarového spoje po zkoušce tahem na vytržení svaru, u kterého vznikla pouze malá, spíše částečně natavená oblast. Svar byl zhotoven v poslední sérii zkušebních vzorků před ukončením testu životnosti elektrod. Na obr. 3.37 je uveden ještě snímek vytrženého svaru ve větším zvětšení. Ve styčné rovině plechů jsou vrstvy obohacené o prvky z povlaku a svar je po metalurgické stránce nekvalitní a nevyhovuje ani rozměrem a únosností.



Nital 3%

50 x

Obr. 3.37 Vytržený svar - detail předchozího snímku (přímé osvětlení)

Důležitým závěrem metalografického rozboru tohoto svaru je skutečnost, že i v tomto případě (tzn. u svaru s velmi malou natavenou oblastí) dojde k vytržení svaru z plechu a ne k poruše spoje ve styčné rovině plechů. Samozřejmě v této souvislosti je nutno mít na zřeteli i tloušťku svařovaných plechů a složitý charakter namáhání spoje. Proto nelze tento závěr jednoduchým způsobem zevšeobecnit.

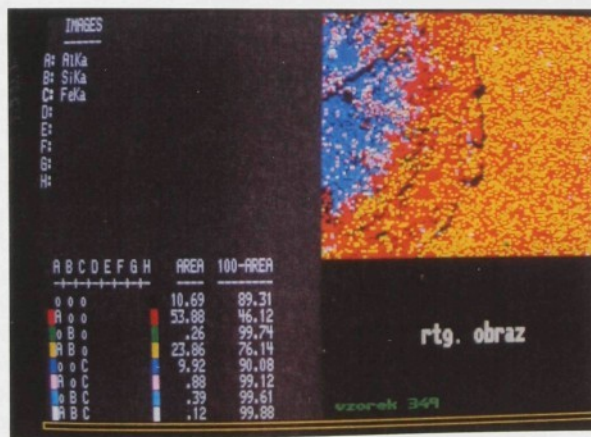
V části práce 3.2 je pojednáno o metalurgických zvláštностech při svařování ocelových plechů s povlaky, které mají vliv i na návrh metodiky hodnocení jakosti svarových spojů. V této souvislosti je důležitý vliv svařovacího procesu na snížení ochranné funkce povlaku v místě dosedu elektrod. Pro hodnocení míry snížení ochranné funkce povlaku není dosud vypracována žádná metodika. Proto byla v práci [54] k posouzení charakteru a rozsahu poškození povlaku v místě dosedu elektrod provedena analýza povrchu plechu na ED analyzátoru LINK 10 000.

Na obr. 3.38 je kombinovaný rtg. obraz z místa vtisku po elektrodě u vzorku svařeného téměř novými elektrodami. Vtisk je výrazný a na jeho okraji je val vytlačeného kovu z roztaveného povlaku. Z obrázku je zřejmé, že největší poškození povlaku je v obvodových částech vtisku. Semikvantitativní analýzou provedenou z plochy $0,5 \times 0,5$ mm na povrchu plechu byl v těchto místech naměřen obsah Al 14,5 %, Si 1,6 % a Fe 83,9 %. Ve střední části vtisku činil obsah Al 42 %, Si 4,9 % a Fe 53,1 %.



Obr. 3.38 Kombinovaný rtg. obraz rozložení Al, Si a Fe v místě vtisku po elektrodě (svar č. 14, $I_s = 9,8$ kA, $t_s = 0,12$ s, $F_s = 2250$ N)

Na obr. 3.39 je kombinovaný rtg. obraz z místa vtisku po elektrodě u svaru, jehož struktura je uvedena na obr. 3.31.



Obr.3.39 Kombinovaný rtg. obraz rozložení Al, Si a Fe v místě vtisku po elektrodě (svar č. 1204, $I_s = 9,85$ kA, $t_s = 0,12$ s, $F_s = 2250$ N)

Jedná se o svar zhotovený již značně opotřebovanými elektrodami ke konci jejich životnosti. K největšímu poškození povlaku došlo ve střední části vtisku. Semikvantitativní analýzou (opět z celkové ploch $0,5 \times 0,5$ mm) byl v těchto místech zjištěn obsah Al 55,6 %, Si 6,7 % a Fe 37,7 %. Celkové poškození povlaku je sice menší než u svaru z počátku testu životnosti elektrod, ale svar nelze pokládat za kvalitní, neboť má pouze malou svarovou čoučku.

Tloušťka analyzovaných vrstev v místě dosedu elektrod nepřesahuje několik mikrometrů. Poškození povlaku je výrazné během celého testu životnosti elektrod. Při zkouškách životnosti elektrod s konstantně nastavenými svařovacími parametry je při svařování málo opotřebovanými elektrodami největší poškození povlaku v obvodových částech vtisku a při svařování značně opotřebovanými elektrodami především ke konci jejich životnosti je největší poškození ve střední části vtisku. To právě dokumentují obr. 3.38 a obr. 3.39 neboť oba hodnocené svary jsou z jednoho souboru měření.

U souboru měření v práci [54], kdy se rostoucí opotřebení elektrod kompenzovalo prodloužováním svařovacího času, zůstávalo největší poškození povlaku v obvodových částech vtisku. S postupně rostoucím počtem svařených bodů se rozdíl v poškození povlaku v obvodové a střední části vtisku zmenšují.

Analýza zbytků povlaku v místech dosedu elektrod ED analyzátoru má z hlediska hodnocení míry snížení ochranné funkce povlaku pouze kvalitativní charakter. Pro kvantitativní hodnocení míry snížení ochranné funkce povlaku by bylo nutné vypracovat metodiky speciálních korozních zkoušek.

3.3 Elektrodové materiály a charakteristika jejich základních vlastností

Hlavní funkci elektrod při bodovém svařování je zabezpečit spolehlivý průchod elektrického proudu svařovanými díly. Zároveň musí elektrody zajistit i pokování svarového spoje. Uvedené funkce jsou určující pro namáhání elektrod, které lze rozdělit podle povahy na:

- elektrické
- tepelné
- mechanické
- metalurgické

Všechny dílčí druhy namáhání působí komplexně a v průběhu svařovacího procesu se dynamicky mění. „Ideální“ elektrodový materiál by měl mít tyto vlastnosti [9]:

- ♦ vysokou elektrickou a tepelnou vodivost za normální i zvýšené teploty
- ♦ dostatečnou mechanickou pevnost, aby se elektroda ani při vysokém svařovacím tlaku nedeformovala
- ♦ co nejvyšší teplotu měknutí
- ♦ co nejmenší sklon k legování svařovaným materiálem
- ♦ velkou odolnost proti oxidaci, se zřetelem k žádoucimu malému odporu mezi elektrodou a svařovaným dílem
- ♦ dobrou odolnost proti otěru za vyšších teplot
- ♦ dobrou obrobiteľnosť
- ♦ nízké výrobní náklady

Vzhledem k požadované vysoké elektrické a tepelné vodivosti je většina elektrodových materiálů vyráběna na bázi slitin mědi. Základní třídění elektrodových materiálů podle fyzikálních a mechanických vlastností bylo provedeno RWMA (Resistance Welder Manufacturers Association) a je uvedeno např. v [59]. Obdobný postup třídění elektrodových materiálů je i v normě ISO 5182 - „Materials for resistance welding electrodes and ancillary equipment“, která rozděluje materiály elektrod do dvou skupin A a B a v nich dále do několika typů.

Skupina A zahrnuje nejpoužívanější elektrodové materiály vyrobené na bázi mědi a slitin mědi. Materiály se připravují tvářením za tepla, za studena, nebo se používají v litém stavu. Ve skupině jsou materiály dále rozděleny do 4 typů.

Typ 1 obsahuje nevytvrditelné slitiny s vysokou elektrickou vodivostí. Odlévané i kované materiály získávají konečnou pevnost a tvrdost tvářením za studena.

Typ 2 zahrnuje vytvrditelné slitiny s vyššími mechanickými vlastnostmi než u typu 1. Mechanické vlastnosti jsou zlepšeny tepelným zpracováním nebo kombinací tepelného zpracování a tváření za studena.

Typ 3 obsahuje vytvrditelné slitiny s vyššími mechanickými vlastnostmi než u typu 2, ale s nižšími hodnotami elektrické vodivosti než u typů 1 a 2.

Typ 4 zahrnuje slitiny se specifickými vlastnostmi a tyto materiály jsou mezi sebou nezaměnitelné. Konečné vlastnosti získávají buď tepelným zpracováním, nebo tvářením za studena.

Typ 5 až 9 je dosud neobsazen.

Skupina B zahrnuje materiály vyrobené práškovou metalurgií na bázi žáruvzdorných kovů a to W a Mo. V této skupině je celkem 6 typů materiálů.

Základní údaje o elektrodových materiálech skupiny A i B obsahuje tabulka 3.1.

Pro odporové bodové svařování se používají také materiály elektrod, které v uvedeném třídění nejsou zahrnuty. Především jsou to materiály vyrobené práškovou metalurgií na bázi Cu zpevněné jemně dispergovanými částicemi oxidů Al, Zr, nebo i jiných prvků. Postup výroby základního polotovaru i jeho dalšího zpracování na finální produkt je obvykle předmětem patentové ochrany [60]. Např. firma SCM METAL PRODUCTS, INC., vyrábí práškovou metalurgii materiály na bázi Cu zpevněné oxidy Al_2O_3 pod označením GlidCop® v různých variantách. GlidCop® Al-15 obsahuje 0,3 hmotnostní % Al_2O_3 , GlidCop® Al-25 0,5 % Al_2O_3 a GlidCop® Al-60 1,1 % Al_2O_3 . Materiály GlidCop® podle vyjádření výrobce řeší také majoritní problém tzv. lepení elektrod při svařování ocelových plechů s povlaky. Dále firma vyrábí kompozitní materiál GlidCop® Al 60 s přídavkem 10 % Niobu, který především doporučuje pro aplikace při odporovém svařování. Tento materiál má elektrickou vodivost srovnatelnou s materiály A2 podle RWMA a tvrdost srovnatelnou se slitinami typu Cu-Be, nebo materiály na bázi Cu-W. Navíc má velmi dobrou teplotní stálost [61].

Příznivé výsledky při svařování pozinkovaných plechů vykazuje také slitina na bázi Mo označovaná TZM (0,05 % Ti, 0,08 % Zr a zbytek Mo), která se ve formě čepičky připájí na elektrodu ze slitiny Cu [62]. Jako elektrodové materiály lze použít také precipitačně vytvrditelné slitiny na bázi Cu-Fe. O možnostech použití slitiny CuFe0,6Ag0,1 na výrobu elektrod pojednává práce [63].

Z tabulky 3.1 je zřejmé, že elektrodový materiál je charakterizován především třemi základními vlastnostmi:

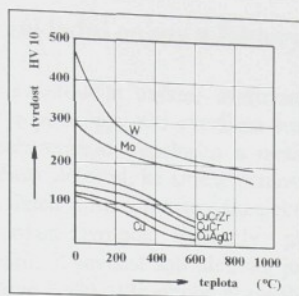
- tvrdosti
- elektrickou vodivostí (a tím také tepelnou vodivostí)
- tzv. teplotou měknutí

V tabulkách uvedené hodnoty tvrdosti jsou stanovené za normální teploty. Velmi cenné a důležité jsou však údaje o tvrdosti elektrodových materiálů za zvýšených teplot, které jsou i určitým kritériem životnosti. Na obr. 3.40 je průběh teplotních závislostí tvrdosti pro různé typy elektrodových materiálů [64].

Tabulka 3.1 Elektrodové materiály a jejich základní vlastnosti podle DIN ISO 5182, doporučené použití

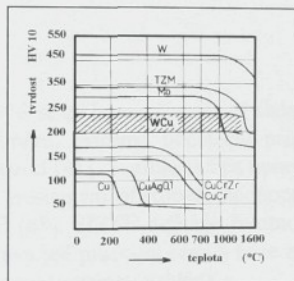
Material		Š	Ohraničení	Nominální složení	Dostupné polotovary	Minimální tvrdost	Minimální elektr. vodivost	Teplota měknutí	Použití
Skupina	Typ			[%]	[mm]	HV 30	[MS.m ⁻¹]	[°C]	
A	1	1	Cu-ETP	Cu/Ag/min 99,9	tažený ≥ 25 tažený < 25 kovany lity	85 90 50 40	56 56 56 50	150	Elektrody na bodové a švové svaření Al
		2	Cu-Cdl	Cd 0,7-1,3	tažený ≥ 25 tažený < 25 kovany	90 95 90	45 43 45	250	Elektrody na bodové a švové svaření Al a pokovených ocelových plechů (Zn, Sn, Al, Pb).
	2	1	CuCrI	Cr 0,3-1,2	tažený ≥ 25 tažený < 25 kovany lity	125 140 100 85	43 43 43 43	475	Elektrody na bodové a švové svaření nízkouhlíkových ocelí, držáky elektrod, velké tvarové přípravky
		2	Cu-CrI Zr	Cr 0,5-1,4 Zr 0,02-0,2	tažený ≥ 25 tažený < 25 kovany	130 140 100	43 43 45	500	Bodové a švové elektrody na svaření nízkouhlíkových a pokovených ocelí
		3	CuCrZr	Zr 0,4 -1,0 Zr 0,02-0,15	vytvřazený broušený < 30	160 160	43 43	500	Bodové a švové elektrody na svařování nelegovaných, pokovených,
		4	CuZr	Zr 0,11-0,25	vytvřazený broušený < 30	130 130	47 47	500	vysokopevnostních a nízkolegovaných
	3	1	CuCo2Be	Co 2,0-2,8 Be 0,4- 0,7	tažený ≥ 25 tažený < 25 kovany lity	180 190 180 180	23 23 23 23	475	Elektrody na svařování nerezavějících a žáruvzdorných ocelí, velmi namáhané elektrody, držáky, ramena bodovek, vložky a tvarové přípravky
		2	CiNi2Si	Ni 1,6-2,5 Be 0,4- 0,7	tažený ≥ 25 tažený < 25 kovany lity	200 200 168 158	18 17 19 17	500	Namáhané elektrody, držáky, ramena bodovek, čepy, pouzdra
	4	1	CuNi1P	Ni 0,8-1,2 P 0,16- 0,25	tažený ≥ 25 tažený < 25 kovany lity	130 140 130 110	29 29 29 29	475	Elektrodové držáky, ohnutá ramena čepy, pouzdra
		2	CuBe2CoNi	Be 1,8-2,1 Co-Ni-Fe 0,2-0,6	tažený ≥ 25 tažený < 25 kovany lity	350 350 350	12 12 12	300	Elektrodové držáky, ramena strojů, tvarové čelisti a přípravky namáhané extrémním mechanickým namáháním
		3	CuAg6	Ag 6 - 7	kovany ≥ 25 kovany 25-50	140 120	40 40	400	Kotoučové elektrody na svaření nízkouhlíkových ocelí-velmi tepelně namáhané
		4	CuAl10	Al 8,5-11,5 Fe 2,0-6,0 Ni 4,0-6,0 Mn 0 - 2,0	kovany lity	170 170	4 4	400 650	Elektrodové držáky, čepy, pouzdra, tvarové přípravky-nízké elektrické zatížení
B	10		W75Cu	Cu 25		220	17	1 000	Čelisti na odtavovací svaření nízkouhlíkových ocelí - velké mechanické namáhání
	11		W78Cu	Cu 23		240	16	1 000	
	12		WC70Cu	Cu 30		300	12	1 000	Vložky na svaření nerezavějících ocelí
	13		Mo	Mo 99,5		150	17	1 000	Vložky na svaření materiálů na bázi Cu s vysokou vodivostí
	14		W	W 99,5		420	17	1 000	Vložky na svaření materiálů na bázi Cu s vysokou vodivostí
	15		W65Ag	35 Ag		140	29	900	Pomocné příslušenství elektrody na vysokofrekvenční svaření železných materiálů

Teplota měknutí elektrodového materiálu může být definována různými způsoby. Např. může být definována jako teplota, na kterou lze materiál krátkodobě ohřát, aniž by po ochlazení na pokojovou teplotu byl zjištěn pokles tvrdosti.



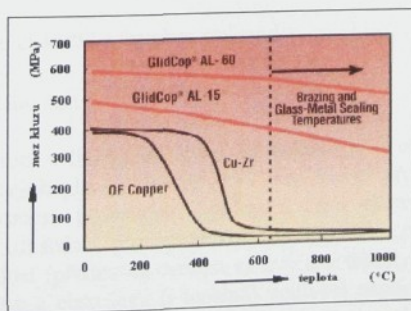
Obr. 3.40 Teplotní závislosti tvrdosti elektrodových materiálů

Podle [65] je teplota měknutí taková teplota, kdy po výdrži 2 hod na této teplotě, dojde po ochlazení na pokojovou teplotu ke snížení tvrdosti o 12 % ve srovnání s výchozím stavem. Podle ISO 5182 je odpovídající pokles tvrdosti stanoven na 15 % [66]. Na obr. 3.41 jsou teplotní závislosti tvrdosti naměřené za pokojové teploty po 2 hod. žhání na příslušné teplotě pro vybrané elektrodové materiály [64]. Tyto závislosti vyjadřují teplotní stálost materiálů a lze z nich určit teplotu měknutí.



Obr. 3.41 Teplotní stálost vybraných elektrodových materiálů

Na obr. 3.42 jsou teplotní závislosti meze kluzu zjišťované při pokojové teplotě pro klasický elektrodový materiál na bázi Cu-Zr, čistou měď a materiály GlidCop® po předchozím přetvoření v rozmezí 74 - 80%. Uvedené závislosti svědčí o velmi dobré teplotní stálosti materiálů GlidCop®.



Obr. 3.42 Teplotní závislosti meze kluzu po jednodinové výdrži na teplotě [61]

3.4 Životnost elektrod - základní pojmy a faktory ovlivňující životnost

V průběhu svařování se s rostoucím počtem svařovaných bodů postupně opotřebovává pracovní část elektrod, mění se podmínky pro vytváření svarových spojů a tím i jejich kvalita. V důsledku elektrického, mechanického, tepelného a metalurgického namáhání dochází ke změnám geometrie pracovní části elektrod, ke změně drsnosti a znečištění pracovních ploch, ke změnám mechanických i fyzikálních vlastností materiálu elektrod.

Definovat jednoznačně pojem životnost elektrody předpokládá stanovit i jednoznačná kritéria hodnocení kvality svaru. Z pevnostního hlediska je základním kritériem kvality svaru velikost, eventuálně tvar svarové čocky. Při výrobě nosných svarů je proto pro praxi důležitým údajem počet svarů zhotovitelných elektrodami, u kterých dosáhneme vytvoření pravidelné svarové čocky větší, než určitá minimální hodnota a tím s dostatečnou únosností. Problematická zde zůstává právě otázka přípustné minimální velikosti svarové čocky. Navíc je nutno uvážit, že velikost svarové čocky souvisí i s geometrií pracovní části elektrody. Vzhledem k tomu, že rozměr pracovní části elektrod musí odpovídat tloušťce svařovaných plechů, vztahuje se přípustná minimální velikost svarové čocky k tloušťce plechu podle rovnice (3.2), kde s je tloušťka plechu v mm. Za přijatelnou velikost svaru se např. při vyhodnocování kontrolních systémů bodového svařování pokládal v práci [67] rozměr svaru v rozmezí $(3 \text{ až } 5)\sqrt{s}$. Počáteční velikost průměru pracovní části elektrody obvykle odpovídá hodnotě $5\sqrt{s}$.

$$d_n = k \cdot \sqrt{s} \quad (3.2)$$

Podle Doc IIW III-586-78 se za konec životnosti elektrody pokládá pokles průměru svaru pod 80 % počátečního průměru, přičemž počáteční průměr svaru se má rovnat průměru pracovních ploch nových elektrod [41]. Svařuje se bez úprav svařovacích parametrů a bez úprav pracovních částí elektrod. S uvedeným přístupem hodnocení životnosti elektrod je v souladu definice, kterou uvádí SITTE [68]. SITTE definuje životnost elektrody jako počet bodů, které lze elektrodou svařit bez úpravy její pracovní části a beze změn svařovacích parametrů, aniž by se znatelně zhoršila kvalita svaru (pevnost, vzhled).

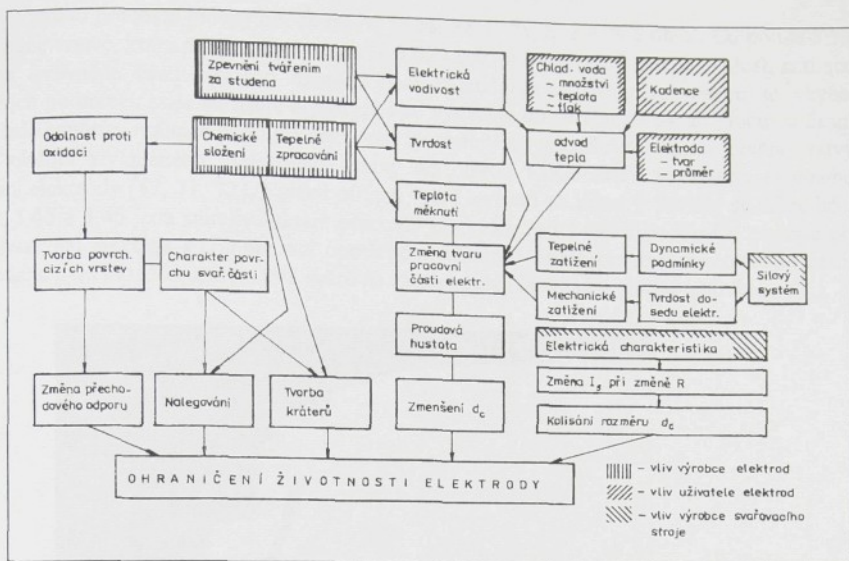
Pokud bude hlavním účelem bodového svaru pouze zajištění vzájemné polohy svařovaných dílů bez zvláštních požadavků na nosnost (tzv. stehovací svary) lze za kritérium životnosti pokládat počet bodů, kdy se ještě tvoří svarová čocka bez limitování jejího tvaru a velikosti. Tento počet svarů označuje SVÍTIL v [62] jako tzv. celkovou životnost, na rozdíl od tzv. použitelné životnosti definované počtem bodů, které mají pravidelnou svarovou čocku o průměru větším nebo rovném dosedacímu průměru pracovní plochy elektrody.

Životnost elektrod závisí na celé řadě mnohdy protichůdně působících faktorů, které ovlivňují a určují:

- výrobce materiálu elektrod a výrobce elektrod
- uživatel elektrody
- výrobce svařovacího stroje

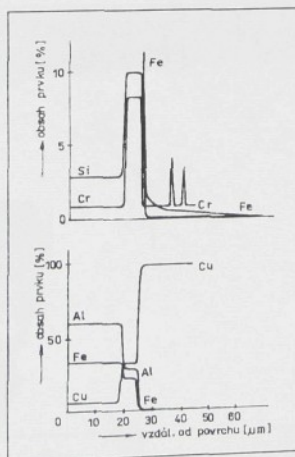
Přehled jednotlivých faktorů ovlivňujících životnost elektrod je na obr. 3.43 [69].

Při svařování ocelových plechů bez povlaků jsou hlavní příčinou ohraničení životnosti elektrod deformační procesy probíhající v pracovní části elektrod, které postupně vedou k nadměrnému zvětšení dosedací plochy elektrod a tím ke snížení proudové hustoty pod přístupnou úroveň. Tvrdost (především tvrdost za zvýšené teploty) a teplota měknutí ovlivňují deformační procesy přímo a elektrická (i tepelná) vodivost nepřímo změnou teploty, která se dosahuje na pracovní ploše elektrody.



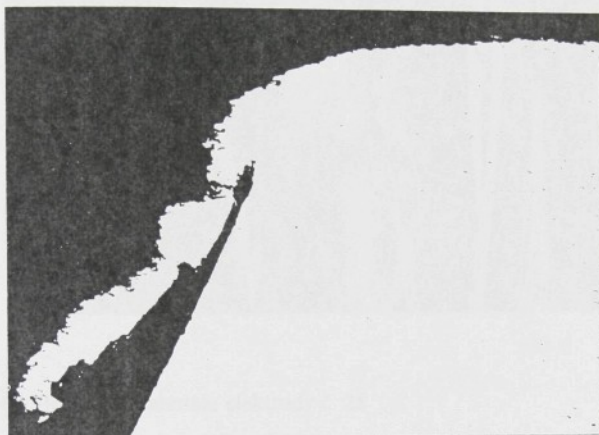
Obr. 3.43 Faktory ovlivňující životnost elektrod

Mechanismus opotřebování elektrod při svařování plechů s povlaky je složitější. Pracovní plocha elektrody je intenzivně ovlivňována roztaveným kovem z nataveného povlaku. Mění se elektrické i mechanické vlastnosti elektrody a nastává také mechanické poškození pracovní části elektrody vlivem „nalepování“ na svařovaný materiál a následného odtržení od svařovaného materiálu po skončení svařovacího procesu. Metalurgicky ovlivněná vrstva se na elektrodě vytváří velmi rychle a již po svaření několika bodů se změni podmínky pro průchod elektrického proudu. Na obr. 3.44 jsou výsledky mikroanalýzy vrstvy vzniklé na povrchu elektrody po svaření cca 5000 svarů ocelového plechu žárově pokoveného slitinou Al + 8 až 10 % Si [70].



Obr. 3.44 Výsledky kvantitativní mikroanalýzy metalurgicky ovlivněné vrstvy na pracovní ploše elektrody

Na povrchu pracovní plochy byl obsah Al 58 %, Fe 33 %, Si 2,8 % a obsah Cu pouze 5 %. V ovlivněné vrstvě, která má tloušťku přibližně 0,02 - 0,03 mm výrazně stoupá tvrdost, zatímco v teplem ovlivněné části elektrod naopak klesá. Metalurgicky ovlivněná vrstva se vlivem pracovních podmínek stále narušuje a postupně se vytlačuje do otřepu na okraji pracovní části. Na základě experimentálních prací lze usuzovat, že období zrychleného nárůstu ovlivněné vrstvy střídají období zrychleného vytlačování vrstvy do otřepu v důsledku zvýšeného tepelného namáhání elektrody [57, 71, 72]. Vzhled otřepu, který se tvoří na konci elektrody se může lišit. Na obr. 3.45 a 3.46 jsou snímky okrajů pracovní části elektrod z materiálu Cu-Cr, použité při testu životnosti elektrod s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času. Elektrodami bylo svařeno celkem 908 svarů na žárově pohlínkovaném plechu typu fal 1.



Neleptáno

50 x

Obr. 3.45 Otřep na okraji pracovní části elektrody č. 25

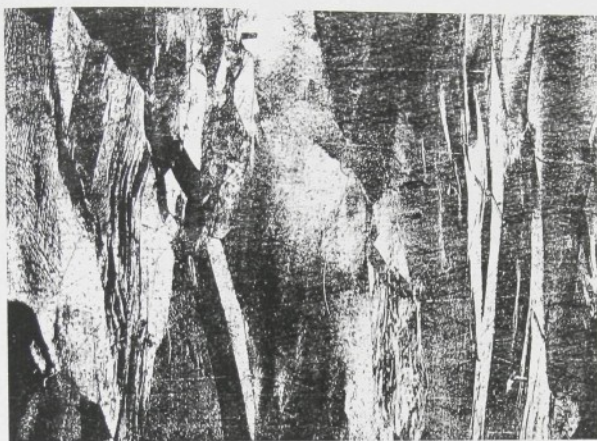


Neleptáno

50 x

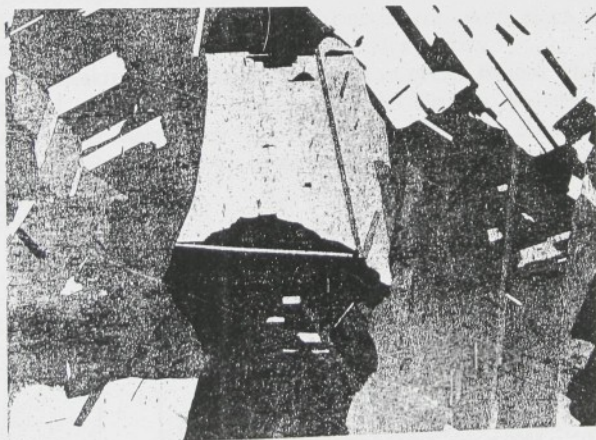
Obr. 3.46 Otřep na okraji pracovní části elektrody č. 26

Rozdíly v tvorbě otřepu u obou elektrod jsou dány rozdílným způsobem výroby polotovaru elektrody, což potvrzují snímky mikrostruktury obou elektrod na obr. 3.47 a 3.48. Orientace snímků struktur elektrod souhlasí s orientací snímku na obr. 3.45 a 3.46. Při přípravě výbrusů bylo použito leptadlo č. 13 podle [73]



50 x

Obr. 3.47 Struktura materiálu elektrody č. 25

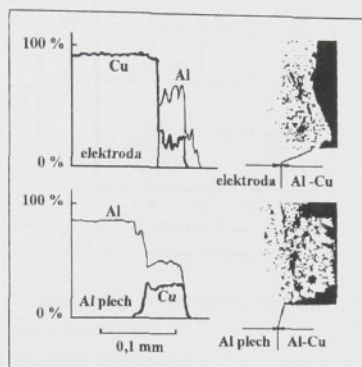


50 x

Obr. 3.48 Struktura materiálu elektrody č. 26

Zrna materiálu u elektrody č. 25 jsou tvářením výrazně orientována ve směru kolmém na pracovní část elektrody. Struktura materiálu elektrody č. 26 má polyedrický charakter bez výrazné orientace. Je zřejmé, že z hlediska životnosti elektrod je výhodnější materiál ve stavu odpovídajícím struktuře na obr. 3.47.

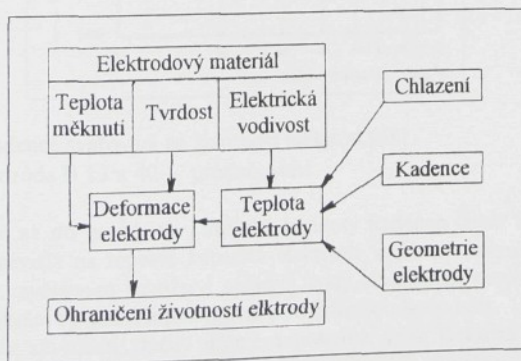
O mechanismu vytváření ovlivněné vrstvy a o přenosu kovu z povlaku na pracovní plochy elektrody pojednávají DYCHNO a PUGAČEV v práci [74]. Experimentálně potvrdili zásadní podíl sublimačních procesů na přenos kovu do prohlubní na elektrodách. RIVET a WESTGATE v [75] uvádějí jako hlavní mechanismus opotřebení elektrod při svařování hliníku erozi mědi hliníkem ulpívajícím na povrchu elektrody. Mechanismus opotřebování elektrod při svařování hliníkových plechů studovali také NAGATA, NOMURA a KONDO [76]. Mikroanalýzou ovlivněné části elektrody a povrchu plechu došli k závěru, že opotřebení je způsobováno „otěrem“ slitinové vrstvy Cu-Al vytvářené na elektrodě a jejím přenosem na svařované plechy. Výsledky mikroanalýzy jsou na obr. 3.49.



Obr. 3.49 Výsledky mikroanalýzy pracovní části elektrody a povrchu plechu

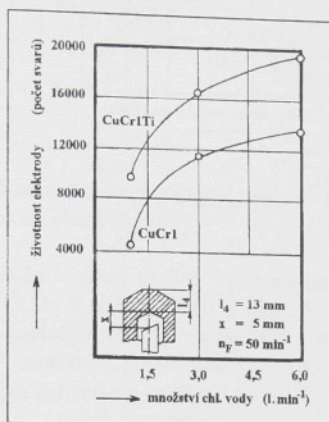
Uvedený mechanismus se projevuje přemísťováním lokálních kontaktů na pracovní ploše elektrod, nerovnoměrným opotřebením a zeškmením pracovních ploch elektrod. S obdobnými jevy se lze setkat také při svařování ocelových plechů s povlaky.

Pro uživatele elektrodových materiálů je znalost dílčích faktorů, kterými může ovlivňovat životnost elektrod velmi důležitá z technologického hlediska. Na obr. 3.50 jsou vyznačeny vzájemné vazby mezi vlastnostmi elektrodových materiálů a životností elektrod. Obrázek zároveň vysvětluje jakými faktory může životnost elektrod ovlivnit uživatel elektrodového materiálu [68].



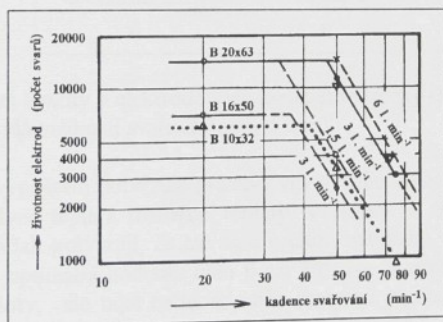
Obr. 3.50 Vliv vlastností elektrodového materiálu na ohraničení životnosti elektrod a možnosti uživatele k ovlivnění životnosti

Významný vliv intenzity chlazení na životnost elektrody lze posoudit podle obr. 3.51. Na obrázku je závislost životnosti elektrody na množství chladicí vody pro dva elektrodové materiály. Geometrie elektrodové špičky a kadence je uvedena na obrázku.



Obr. 3.51 Vliv množství chladicí vody na životnost elektrod [68]
 o klasická zkouška životnosti
 o krátkodobá zkouška životnosti

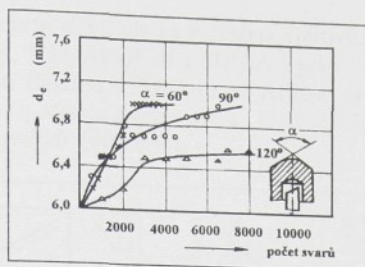
Na obr. 3.52 jsou grafy závislosti životnosti různých typů velikosti elektrod z materiálu CuCr1 na použité kadenci svařování.



Obr. 3.52 Vliv kadence svařování na životnost elektrod [68]
 ▽ elektroda B 13 x 40 - protlačovaná

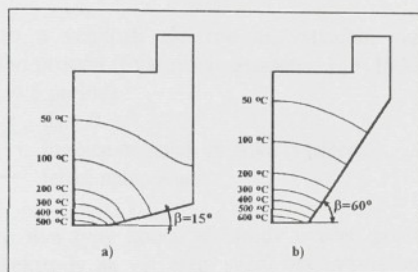
Životnost elektrody je až do určité, tzv. kritické hodnoty kadence téměř konstantní. Kritická hodnota kadence je závislá na tepelné kapacitě elektrody a dá se ovlivnit změnou intenzity chlazení elektrody, tj. zvětšením množství chladicí vody, zvětšením plochy odvádějící teplo. Zvolená kadence svařování by se měla pohybovat pod kritickou hodnotou.

Na obr. 3.53 jsou závislosti změny průměru pracovní části elektrod z materiálu CuCr1 s různým vrcholovým úhlem při svařování plechu StZu-A2 tloušťky 1 mm. Z průběhu uvedených závislostí lze soudit na vyšší životnosti elektrod pro elektrody s většími vrcholovými úhly. SIMONS [77] uvádí pro elektrody s vrcholovým úhlem 120° dvojnásobnou životnost, než pro elektrody s vrcholovým úhlem 90°.



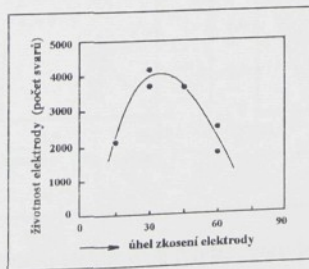
Obr. 3.53 Závislost průměru pracovní plochy elektrod na počtu svařených bodů - vliv geometrie špičky elektrody [69]

Takové závěry o příznivém vlivu větších vrcholových úhlů elektrod nelze jednoduše zevšeobecnit. IKEDA, YASUDA, YAMAGUCHI a SHIGA se v práci [78] zabývají vlivem geometrie pracovní části na rozložení teploty v elektrodě a na životnost při svařování plechů typu Galvannealed. Metodou konečných prvků určili rozložení teploty v kuželových elektrodách pro dvě hodnoty úhlu β , tak jak je uvedeno na obr. 3.54 a), b).



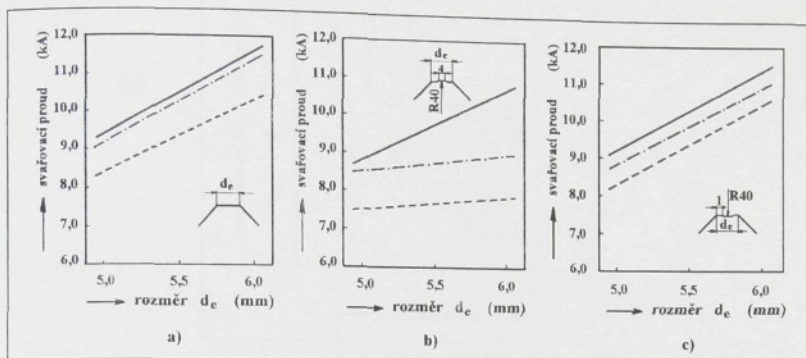
Obr. 3.54 Rozložení teploty v elektrodě - vliv geometrie špičky ($F_s = 1900$ N, $t_s = 10$ period, I_s odpovídá velikosti svarové čochky 5 mm).

Je zřejmé, že se i výpočtem potvrzuje příznivý vliv většího vrcholového úhlu elektrody, (tj. menšího úhlu β) na odvod tepla a rozložení teploty. Výsledky ze zkoušek životnosti elektrod uvedené na obr. 3.55 však potvrzují, že lze najít určitou optimální velikost vrcholového úhlu. Pro uvedený případ je optimální hodnota úhlu β asi 30° . Na životnost elektrod totiž má vliv nejenom rozložení teploty, ale také rychlost změn pracovní plochy elektrod v souvislosti se zvláštnostmi svařování plechů s povlaky.



Obr. 3.55 Vliv geometrie pracovní části elektrody na její životnost

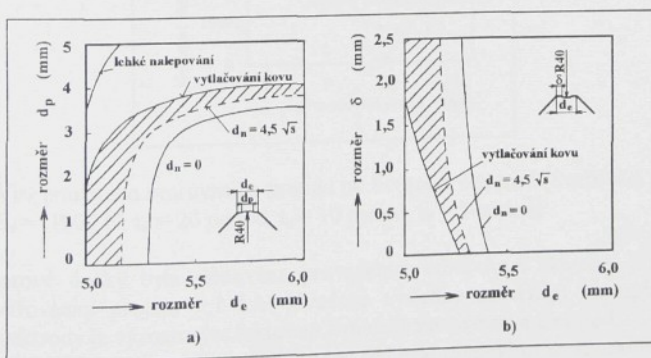
Vliv geometrie pracovní části elektrody na vytváření svarových spojů plechů Galvannealed studovali IKEDA, YASUDA, YAMAGUCHI a SHIGA v práci [79]. Na obr. 3.56 jsou pro tři typy provedení pracovní části elektrod v závislosti na velikosti svařovacího proudu a rozměru elektrody vymezeny oblasti počátku tvorby svaru, hranice lehkého nalepování elektrod a čárkovaně hranice místních výstřiků (vytláčení).



Obr. 3.56 Vliv tvaru a velikosti elektrod na vytváření svarového spoje při variaci svařovacího proudu (Svařovací parametry: $F_s = 1900$ N, $t_d = 20$ period, $t_s = 10$ period, $t_k = 5$ period)

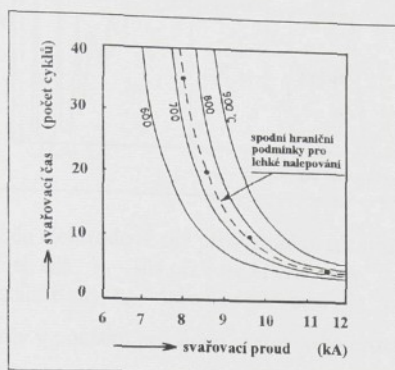
- $d_n = 0$
- · - · - hranice místních výstřiků (vytláčení)
- lehké nalepování

Na obr. 3.57 je pro dva typy konců elektrody uveden pro určité konkrétní svařovací podmínky vliv rozměrů elektrody na vytváření svarů opět vyznačením oblastí počátku tvorby svarové čochy, získání svaru nominální velikosti odpovídající rozměru $4,5 \cdot \sqrt{s}$, hranice vytlačení, resp. místních výstřiků a hranice lehkého nalepování elektrod. Z obr. 3.57 a) je zřejmé, že u elektrody s přiměřeně velkým výstupkem lze vytvářet svařování nominální velikosti i když celkový rozměr elektrody roste. U elektrody s prohlubní i elektrody ploché je tato možnost vyloučena. Ve vztahu k dlouhé životnosti je výhodné na činné části elektrody udržet adekvátní výstupek.



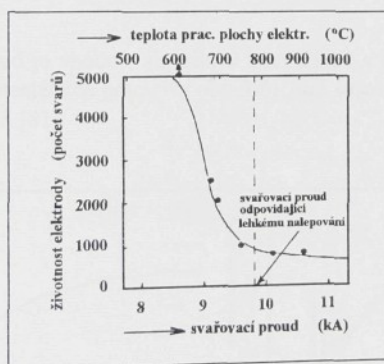
Obr. 3.57 Vliv tvaru a rozměru elektrod na tvorbě svaru při konstantních svařovacích podmínkách (Svařovací parametry: $I_s = 9,0$ kA, $F_s = 1900$ N, $t_d = 20$ period, $t_s = 10$ period, $t_k = 5$ period)

Uvedení autoři sledovali také vliv teploty na povrchu pracovní části elektrody na její opotřebení. Zjistili, že k nalepování elektrody dochází při teplotě elektrody asi 750 °C a to bez ohledu na použité svařovací parametry. To je vidět i na obr. 3.58.



Obr. 3.58 Relace mezi svařovacími parametry, teplotou povrchu pracovní části elektrody a hranicí lehkého nalepování (Svařovací parametry: $F_s = 1900$ N, $d_d = 20$ period, $t_k = 5$ period)

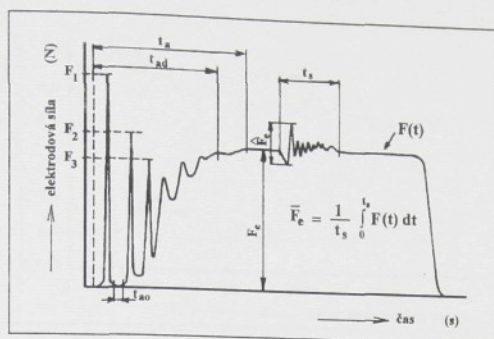
Na obr. 3.59 jsou výsledky zkoušek životnosti elektrod se zachycením vlivu teploty dosažené na pracovní ploše elektrod při variaci svařovacího proudu. Ostatní svařovací parametry jsou uvedeny u obrázku.



Obr. 3.59 Vliv použitého svařovacího proudu na životnost elektrod (Svařovací parametry: $F_s = 1900$ N, $t_d = 20$ period, $t_s = 10$ period, $t_k = 5$ period)

Tvorba svarové čočky byla sledována prováděním odlupovací zkoušky a to vždy při konstantním svařovacím proudu 9,1 kA. Uvedené výsledky potvrzují, že teplota povrchu pracovní části elektrody je významným faktorem ovlivňujícím životnost elektrod.

Výrobce svařovacího stroje ovlivňuje životnost elektrod především konstrukčním řešením a vlastnostmi silového systému stroje. Na obr. 3.60 je schématický nákres časového průběhu elektrodové síly pro případ výstupkového svařování (platí však obecně i pro svařování bodové) [80].

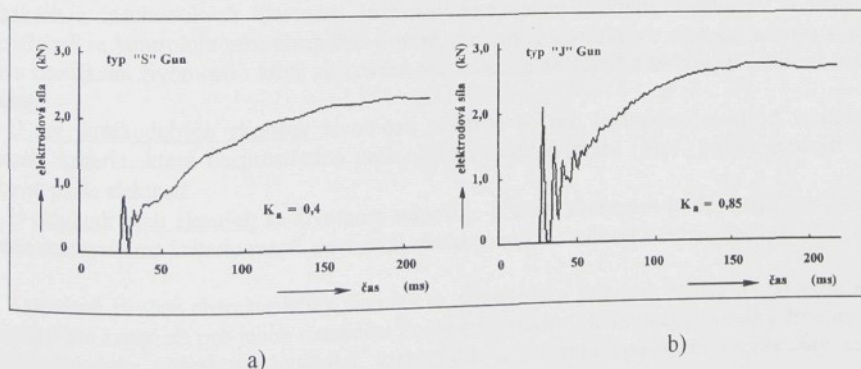


Obr. 3.60 Časový průběh elektrodové síly při výstupkovém svařování
 F_e - statická el. síla, F_1 - síla při dosedu elektrody, t_a - doba nárůstu síly
 t_{ad} - doba oscilace síly, t_{ao} - doba bez působení síly, t_s - doba svařování,
 $\hat{F}_e$ - výkyv síly v počátku průchodu svařovacího proudu,
 $\bar{F}_e$ - střední hodnota svařovací síly, F_2 a F_3 - síly druhého a třetího maxima
výkyvu síly po dosedu elektrod

Časový průběh síly v počáteční fázi po dosedu elektrod se u svařovacích strojů může významně lišit a závisí také na nastavení tlumení dosedu. Časový průběh síly lze hodnotit podle vztahu (3.3).

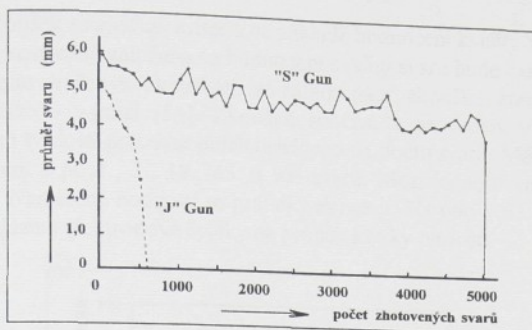
$$K_a = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{3F_e} \quad (3.3)$$

Z hlediska životnosti elektrod je vhodné, aby silový koeficient K_a byl co nejnižší. Tento závěr potvrzují i výsledky experimentálních prací. Na obr. 3.61 jsou časové průběhy síly pro dva typy svařovacích pistolí typ J a S [81].



Obr. 3.61 časové průběhy síly pro dva typy závěsných bodových svařeček

Příslušné hodnoty K_a jsou uvedeny u obrázku. Na obr. 3.62 je výsledek provozní zkoušky životnosti elektrod vyjádřený závislostí rozměru svaru na počtu svařených bodů [81].



Obr. 3.62 Výsledky testu životnosti elektrod pro dva typy závěsných bodových svařeček

Testy byly provedeny při svařování na plechu tloušťky 1 mm s povlakem Fe-Zn kuželovými elektrodami s vrcholovým úhlem 120° a průměrem pracovní části 5 mm ($F_s = 1,8$ kN, $t_s = 12$ period)

3.4.1 Metodické postupy stanovení životnosti elektrod

Vzhledem ke skutečnosti, že životnost elektrod závisí na mnoha faktorech a také přístup k hodnocení životnosti elektrod může být různý, lze poměrně obtížně porovnávat práce různých autorů, zvláště, když se obvykle neuvádějí ani všechny podmínky provedených experimentů.

Metodikou hodnocení životnosti elektrod pro bodové odporové svařování se v práci [82] a [83] zabývá MUCHA, který metodicky zkoušení elektrod rozděluje na:

- kontrolní zkoušky
- krátkodobé zkoušky
- dlouhodobé zkoušky

Kontrolní zkoušky slouží na kontrolu jakosti elektrodového materiálu podle vybraných fyzikálních a mechanických vlastností (např. tvrdost, teplota měknutí, elektrická vodivost). Samozřejmě se kontroluje také chemické složení. Kontrolní zkoušky ve vlastním smyslu slova nejsou zkouškami životnosti i když zjišťované vlastnosti samozřejmě s životností elektrod úzce souvisejí.

U tzv. krátkodobých zkoušek životnosti elektrod se pro hodnocení elektrod využívají odvození kritéria, která bezprostředně nesouvisejí s kvalitou svaru (např. pokles tvrdosti na pracovní ploše elektrod).

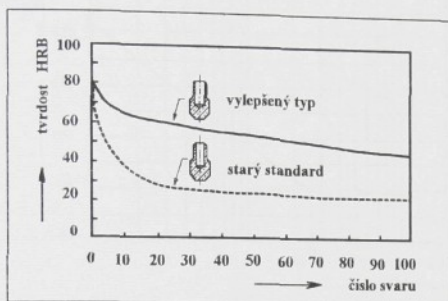
U dlouhodobých zkoušek se životnost stanovuje počtem svařených bodů, které vyhovují předem stanovenému kritériu (např. pevnostní charakteristiky, velikost svarové čočky).

Z uvedené stručné charakteristiky zkoušek je zřejmé, že v podstatě otázka trvání zkoušky není určujícím kritériem pro jejich rozřazení. Podle mého názoru je účelnější zkoušky životnosti rozdělit z hlediska charakteru výsledků, které poskytují. Tímto způsobem se zkoušky dají rozřadit na:

- zkoušky kvalitativní - přímé
- nepřímé
- zkoušky kvantitativní - přímé
- nepřímé

U přímých zkoušek se zjišťují kritéria na základě hodnocení kvality svarových spojů. Pokud zkouška není bezprostředně založena na hodnocení kvality svaru bude označena jako nepřímá.

Ke kvalitativním nepřímým zkouškám lze zařadit např. zkoušku, kterou popisují CHANG, MITCHELL a YONG v práci [84]. Zkouška spočívá v provedení 93 svarových spojů a stanovení závislosti tvrdosti pracovní plochy elektrod na počtu svarů. Měření tvrdosti se provádí před prvním svarem a po 1., 3., 18., 43. a 93. svaru. Mezi jednotlivými měřeními se svařuje kadencí 50 min^{-1} . Naměřené hodnoty se graficky zpracují. Na obr. 3.63 je možno sledovat vliv různé intenzity chlazení elektrodové špičky na průběh křivky tvrdosti.

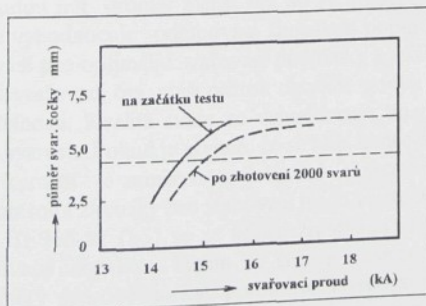


Obr. 3.63 Výsledky zkoušky měření tvrdosti pracovní plochy elektrod

Výsledek zkoušky sice poskytuje kvantitativní vyjádření změn tvrdosti pracovní plochy, ale z hlediska životnosti elektrod v praktických podmínkách má tato zkouška pouze kvalitativní charakter.

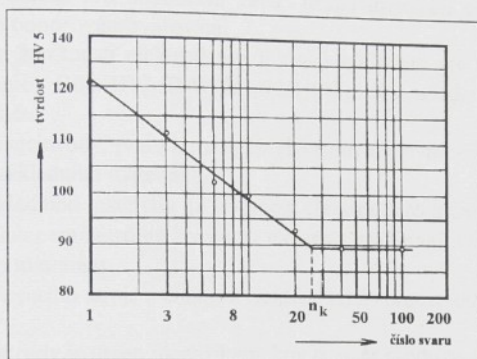
K nepřímým kvalitativním zkouškám lze zařadit kontrolní zkoušky hodnotící jakost elektrodových materiálů. Zjištěné údaje slouží jako základní ukazatel při výběru elektrodových materiálů.

V práci [84] CHANG, MITCHELL a YONG popisují kvalitativní přímou zkoušku nazvanou Test 2000. Při této zkoušce se zjišťuje závislost rozměru svarové čocky na velikosti svařovacího proudu pro novou elektrodu a pro elektrodu po provedení 2000 svarů. Svary mezi určováním obou závislostí se provádějí svařovacím proudem, který odpovídá definované hodnotě rozměru svarové čocky (6 mm). Výsledky testu se graficky zpracují tak, jak je vidět na obr. 3.64. Kritériem hodnocení výsledků zkoušky je posun křivky $d_n = f(I_s)$ v důsledku zhotovení 2000 svarů. Tímto způsobem lze mezi sebou kvalitativně porovnávat elektrodové materiály, nebo hodnotit vliv různých faktorů ovlivňujících životnost elektrod.



Obr. 3.64 Vyhodnocení výsledků zkoušky Test 2000

SITTE v práci [69] popisuje tzv. krátkodobou nepřímou kvantitativní zkoušku, která je modifikací postupu kvalitativní zkoušky CHANGA, MITCHELLA a YONGA z práce [84]. Zkouška spočívá ve stanovení závislosti tvrdosti pracovní plochy elektrody na počtu zhotovených svarů již dříve uvedeným postupem. Grafické zpracování výsledků se liší tím, že stupnice pro počet zhotovených svarů je logaritmická. Vlastní grafické zpracování výsledků je na obr. 3.65.



Obr. 3.65 Vyhodnocení tzv. krátkodobé nepřímé kvantitativní zkoušky

Z grafu se stanoví hodnota n_k , kdy dochází ke zlomu v průběhu tvrdosti. Mezi hodnotou n_k a životností elektrod zjistil SITTE empirický vztah (3.4).

$$\text{Životnost elektrody} = 200 \cdot n_k - 500 \quad (3.4)$$

Při ověřování vhodnosti uvedeného metodického postupu bylo zjištěno, že při kadenci větší než 50 min^{-1} neposkytuje věrohodné výsledky.

Přímé kvantitativní zkoušky životnosti poskytují údaje, které slouží k posouzení elektrodového materiálu v reálných provozních podmínkách i pro hodnocení odporové svařitelnosti. Zkoušky se provádějí za definovaných podmínek svařování (tj. např. druh stroje, typ základního materiálu, určité svařovací parametry) a kritéria kvality svaru se stanovují předepsanými postupy. Cílem zkoušky je zjistit zhotovitelný počet svarů, které budou splňovat předem stanovené kritérium kvality.

Podle Doc. IIW III - 586-78 se za dosažení životnosti elektrody považuje okamžik, kdy produkované svary budou mít průměr menší než 80 % počátečního průměru špičky elektrody [65]. Kvalita svarů se vyhodnocuje odlupovací zkouškou popsanou již v části práce 3.2 (obr. 3.9). Zkouška se provádí pro optimální svařovací podmínky a ztížené svařovací podmínky (vyšší svařovací proud, delší svařovací čas, nižší průtok chladicí vody). Podmínky svařování se určují podle smyčky svařitelnosti. Kvalita svaru se vyhodnocuje po provedení 100, 500 a 1000 a každých dalších 1000 svarech. Pokud je zřejmé, že se blíží konec testu, potom po každých 500 a dále 100 svarech. Dokument je zaměřen na určování a zkoušení elektrodových materiálů a popisuje i základní kontrolní zkoušky pro stanovení jejich vlastností.

Podle Doc. IIW III-966-91 [85] se za konec životnosti elektrody pokládá okamžik, kdy únosnost svarů zjišťovaná zkouškou tahem ve smyku klesne pod 70 % výchozího stavu. Budeme-li měřit rozměry svarové čocky, potom se konec životnosti může určit z poklesu rozměru svarové čocky, který odpovídá poklesu únosnosti svaru pod 70 % počátečního svaru. Hodnocení životnosti se provádí běžně při tzv. normálním svařovacím proudu (proud o 10 % nižší, než je minimální hodnota svařovacího proudu pro výstřik tekutého kovu), nebo při tzv.

předimenzovaném proudu (proud o 10 % větší, než minimální hodnota svařovacího proudu pro výstřik tekutého kovu). Při začátku testu se zhotoví 3 vzorky pro zkoušku tahem ve stříhu a další vzorek se zhotoví vždy po provedení 200 svarů. Pokud se test provádí s žárově pozinkovaným plechem, potom se jeden vzorek zhotovuje vždy po 50 svařech. Počáteční hodnota únosnosti svarů se stanoví jako průměrná hodnota ze tří prvních svařených vzorků. Další podmínky průběhu zkoušky životnosti a obsah zprávy o výsledku zkoušky uvádí [85]. Popsaná zkouška je určena pro hodnocení vlivu druhu materiálu elektrod, tvaru a rozměru elektrod při bodovém odporovém svařování.

Postup stanovení životnosti elektrod pro bodové svařování pro nepokovené a pokovené ocelové plechy popisuje Doc. IIW III-WG13-92/1 [47]. Dále uvedený postup zkoušky může být aplikován pro zjištění:

- vlivu materiálu elektrody, tvaru a rozměru elektrody na životnost elektrody při svařování určitého typu základního materiálu
- vlivu druhu základního materiálu na životnost elektrod pro určitou konfiguraci elektrod
- vlivu svařovacích parametrů na životnost elektrod, materiálu, tvaru, a rozměru elektrod a typu základního materiálu
- vlivu typu svařovacího stroje a chlazení elektrod na životnost elektrod.

Konec životnosti elektrody je určen okamžikem, kdy rozměr produkovaných svarů poklesne pod 70 % počáteční hodnoty pro jakékoliv 3 svař z pěti po sobě provedených svarů. Rozměr svarů je určován odlupovací zkouškou a počáteční hodnota rozměru svaru musí odpovídat počátečnímu rozměru elektrodové špičky. Test životnosti elektrod se opakuje třikrát, aby se zjistila velikost rozptylu výsledků. Ve výsledku zkoušky se zaznamenává průměrná hodnota životnosti a rozsah životnosti. Po dohodě může být pro stanovení životnosti elektrod použito jiné kritérium, jako typické příklady lze uvést:

- ⇒ pokles únosnosti svarů stanovené zkouškou tahem ve smyku o 30 %
- ⇒ shodná kritéria zjišťovaná zkouškou krutem
- ⇒ limity založené na estetických požadavcích, např. velikost a vzhled vtisku po elektrodách.

Pokud se nehodnotí vliv druhu základního materiálu, používají se při zkouškách životnosti elektrod

- * za studena válcovaný hlubokotažný ocelový plech
- * žárově pozinkovaný ocelový plech tloušťky 0,8 mm nebo 2 mm s tloušťkou povlaku 7 až 12 μm na každé straně. Jiná tloušťka plechu může být stanovena dohodou.

Kadence svařování při zkouškách odpovídá podmínkám, které se simulují a to:

- pro simulaci podmínek práce na stacionárním svařovacím stroji 50 min^{-1}
- pro simulaci svařování robotem 30 min^{-1}
- pro simulaci podmínek mnohabodového svařování 10 min^{-1}

Svař určené k vyhodnocení kvality se svařují na vzorcích $30 \times 250 \text{ mm}$ a to vždy 8 svarů. Pět z provedených svarů se vyhodnotí a 3 zůstávají pro eventuelní dodatečné hodnocení kvality. Ostatní svař se zhotovují na panelech z plechu o rozměrech $470 \times 350 \text{ mm}$. Na panelu se celkem provádí 192 svarů ve 12 řadách po 16 svařech. Okrajová vzdálenost činí 10 mm. Při svařování se postupuje od jednoho rohu panelu a po svaření řady se obrátí o 180° a svařuje se od rohu opět další řada. Svař pro hodnocení kvality se zhotovují vždy po provedení 200 svarů. Do tohoto počtu se zahrnují i svař provedené k hodnocení kvality.

Zkouška životnosti elektrod se provádí při různých úrovních svařovacího proudu:

- hodnota svařovacího proudu je o 10 % nižší, než minimální hodnota proudu pro výstřik tekutého kovu
- hodnota svařovacího proudu je o 200 A nižší, než nominální hodnota pro výstřik tekutého kovu.
- hodnota svařovacího proudu je o 10 % větší, než hodnota proudu pro výstřik tekutého kovu

Další podmínky průběhu zkoušky a obsah zprávy o provedené zkoušce uvádí [47].

RIVETT a WESTGATE v práci [75] popisují zkoušku životnosti elektrod používanou v souvislosti se studiem vlivu tvaru a materiálu elektrod, svařovacího zařízení a svařovacích podmínek na životnost elektrod při svařování hliníku. Pro každé konkrétní podmínky se zkouška životnosti provádí třikrát. Před každým testem se stanoví a nastaví svařovací proud, který odpovídá velikosti svaru $5\sqrt{s}$ a hloubka vtisku musí být menší než 30 % tloušťky plechu. Vlastní zkouška životnosti se provádí na vzorcích o rozměrech 25 x 300 mm, na kterém je zhotoveno vždy 10 svarů kadenci 10 - 20 min⁻¹. Každý pátý vzorek (t.j. s 10 svary) se podrobí odlupovací zkoušce. Za konec životnosti elektrod se pokládá okamžik, kdy ze šedesáti za sebou vyhodnocovaných svarů jsou 3 svary vadné, což odpovídá střední hodnotě 5 % vadných svarů. Za vadné tj. nepřijatelné se pokládají svary:

- s porušením svarové čocky v rovině styku plechů
- s částečným porušením svarové čocky v rovině styku plechů
- svary s průměrem svarové čocky menším než $4\sqrt{s}$.

Velikost a hloubka vtisku elektrod se zaznamenává pro každý padesátý svar a po ukončení testu se ještě stanoví rozměr pracovní části elektrod.

MUCHA ve své práci [82] popisuje novou metodiku určování životnosti elektrod založenou na odvozené a ověřené modelové rovnici (3.5), ve kterém a_e , b_e jsou konstanty charakterizující nárůst průměru pracovní plochy elektrody podle vztahu (3.6) a a_0 , a_1 jsou konstanty charakterizující průměr svaru d_z v závislosti na počtu svařených bodů n.

$$d_z = a_0 + \frac{a_1}{a_e + b_e n} \quad (3.5)$$

$$d_e = a_e + b_e n \quad (3.6)$$

Při zkouškách životnosti se svařuje za konstantní velikosti svařovacího proudu a počáteční rozměr pracovní části elektrod $d_e = 5\sqrt{s}$. V intervalu po 500 svarech se provádí měření průměru pracovní části elektrod a rozměry svarů po provedení odlupovací zkoušky. Z naměřených hodnot se regresní analýzou nejprve stanoví odhady parametrů a_e , b_e z rovnice (3.6) a s využitím tohoto vztahu opět regresní analýzou odhady parametrů a_0 , a_1 ze vztahu (3.5). Teoretická životnost elektrod je potom určena počtem svarů n_z , které budou mít průměr svarové čocky větší nebo roven kritickému rozměru svaru d_{zk} . Za kritický rozměr se pokládá 0,8 násobek teoretického (maximálního) počátečního rozměru svaru d_{zp} vypočítaného z rovnice (3.7) před začátkem svařování.

$$d_{zp} = a_0 + \frac{a_1}{a_e} \quad (3.7)$$

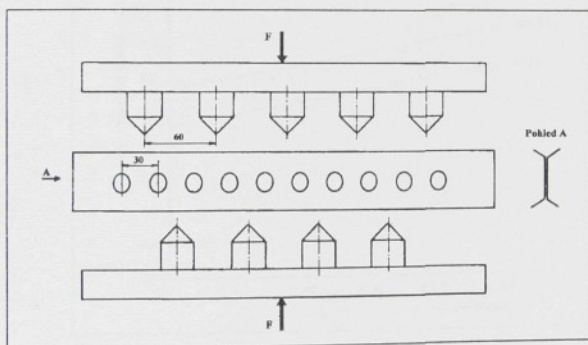
Počet svarů n_z charakterizující tzv. teoretickou životnost se vypočítá z rovnice (3.8).

$$n_z = \frac{a_0 a_e - d_{zk} a_e}{b_e (d_{zk} - a_0)}$$

(3.8)

Pro stanovení závislosti $d_z = f(n)$ postačuje v příznivém případě zhotovení 200 svarů, přičemž se prvních 500 svarů nebere do úvahy, neboť v tomto rozmezí není vztah pro určení d_e linearizovatelný. Uvedený postup určení životnosti elektrod přináší časové i materiálové úspory vyplývající ze zkrácení zkoušky, neboť není nutné zhotovit všechny svary až k dosažení kritických rozměrů.

V Doc. IIW III-991-92 se popisuje postup při odhadu životnosti elektrod jako kritéria vhodnosti ocelových plechů s povlaky pro odporové bodové svařování. Zkoušky životnosti elektrod se provádějí pro dvě tloušťky plechů (0,8 a 2 mm) a za podmínek definovaných v [35]. V závislosti na tloušťce plechu a tvaru svarové čocky jsou předepsané minimální rozměry akceptovatelného svaru. Před každým testem se nejprve předepsanými svařovacími parametry zhotoví 100 svarů jako záběh elektrod. Potom se určí počáteční efektivní hodnota svařovacího proudu odpovídající stavu, kdy se zastaví výstřiky tekutého kovu, tj. jako horní limit pro smyčku svařitelnosti. Na pásech o rozměrech 50 x 330 mm se s roztečí 30 mm zhotovují zkušební svary pro vyhodnocení kvality, (celkem 10 svarů). Vzorek pro vyhodnocení kvality svarů se zhotoví na začátku testu a potom vždy po zhotovení 200 svarů. Způsob provedení mechanické zkoušky tj. roztržení zkušebního vzorku je na obr. 3.66. Zkoušku se může podrobit najednou všech 10 svarů (vyznačeno na obrázku), nebo lze zkoušku provést ve dvou operacích (tj. 2 x po pěti svarech u plechu s tloušťkou 2 mm).



Obr. 3.66 Způsob destrukce zkušebního vzorku

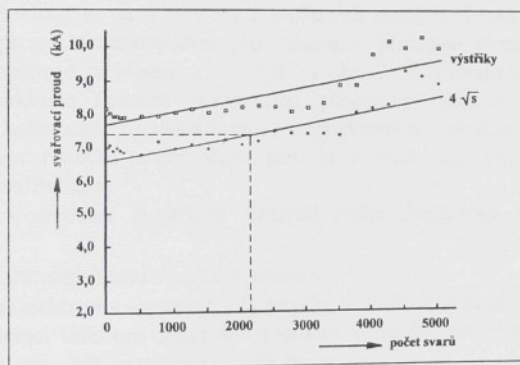
Pokud se při vyhodnocování rozměru svarů zjistí pokles rozměrů pod předepsanou úroveň, zvyšuje se efektivní hodnota svařovacího proudu o 200 A a v testu se pokračuje již uvedeným postupem. O ukončení testu rozhoduje operátor a důvod ukončení testu se musí uvádět ve zprávě o zkoušce (např. příliš vysoké procentuelní zvýšení svařovacího proudu, počet akceptovatelných svarů získaných po zvýšení svařovacího proudu je již příliš malý). Ve zprávě se uvádí počet svarů vyhovujících stanovenému rozměrovému kritériu, zhotovených s počáteční hodnotou svařovacího proudu a celkový počet svarů zhotovených před tím, než zvýšení svařovacího proudu již nevede k získání akceptovatelných svarů (tj. v podstatě počet vyhovujících svarů zhotovených za definovaných podmínek před totálním opotřebením elektrod). Uvádí se také počet zvýšení svařovacího proudu během testu. Zaznamenávají se i případy tzv. lepení elektrod. V grafickém zpracování výsledků se uvádějí závislosti $d_s = f(n)$ a $I_s = f(n)$. Závislost $d_s = f(n)$ se sestavuje z průměrných hodnot rozměrů svarů příslušného vzorku (tj. vždy z 10 svarů), ale v grafu se zakresluje i všechny jednotlivé hodnoty.

WANDELL a WILLIAMS v [32] popisují tři metody stanovení životnosti elektrod:

- standardní test životnosti
- oscilační smyčku svařitelnosti
- dynamickou smyčku svařitelnosti

Standardní test životnosti slouží ke stanovení počtu svarů s rozměrem v předem určeném intervalu, které lze zhotovit s konstantním nastavením svařovacích parametrů. Test simuluje typické výrobní situace a pro provozní podmínky může být dobrým základem pro stanovení časového limitu pro obnovu pracovní části elektrod. Je však časově náročný a poskytuje pouze omezené množství informací.

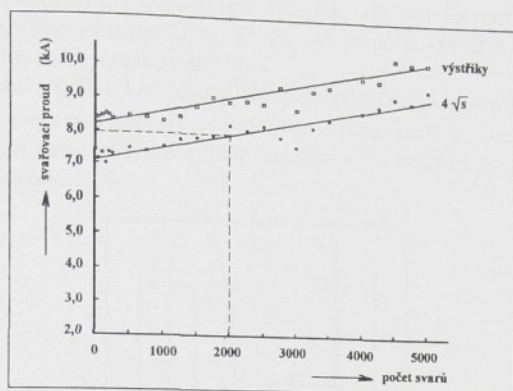
Oscilační smyčka svařitelnosti je používána pro porovnávání elektrodových materiálů. Při tomto testu se nejdříve stanoví hranice výstřiků a s proudem o 200 A nižším se zhotoví 50 svarů. Potom se stanoví podmínky pro získání svarů s minimální přípustnou velikostí $4\sqrt{s}$ a příslušným proudem se vytvoří dalších 50 svarů. Znovu se určí hranice výstřiků a s proudem o 200 A nižším než činí tento nový limit se zhotoví opět 50 svarů. Takto se postupuje až do vytvoření 250 svarů. V dalším průběhu testu se nové limity pro střídavé nastavení svařovacího proudu na spodní a horní úrovni opakuje vždy po svaření 250 svarů, dokud se celkově nesvaří 5000 svarů. Postupně určované limity proudů na hranici výstřiků a na úrovni pro vytváření svarů s minimálním přípustným svarem se graficky zpracují jako závislosti počtu svařených bodů tak, jak je vidět na obr. 3.67.



Obr. 3.67 Oscilační smyčka svařitelnosti pro ocelový plech s povlakem slitiny Fe-Zn (elektrodové špičky Cu-Cr-Zr) a vyhodnocení elektrod

Dynamická smyčka svařitelnosti je určitou modifikací oscilační smyčky a odlišuje se především v tom, že je určována s konstantním nastavením svařovacích parametrů během celého testu. Před zahájením vlastního testu se elektrody připraví zhotovením 50 svarů s proudem ekvivalentním podmínkám „lepení“. Potom se stanoví hranice výstřiků a následně i proud odpovídající velikosti svarů $3,5\sqrt{s}$. Svařovací proud se nastaví na hodnotu o 200 A nižší nežli činí hranice výstřiků a svaří se 50 svarů. Znovu je určena hranice výstřiků i proud odpovídající velikosti svarů $3,5\sqrt{s}$. A svařovací proud je nastaven na původní hodnotu. Tento postup se opakuje po svaření 50, 100, 200, 300, 500 a dále vždy po 200 svarech. Podmínky výstřiků jsou určovány ne více než ze tří svarů, aby se minimalizovalo poškození elektrod. Postupně určované limity proudů na hranici výstřiků a na úrovni pro vytváření svarů s rozměrem $3,5\sqrt{s}$ se opět graficky zpracují jako závislosti počtu svařených bodů. Na obr. 3.68 je pro porovnání uvedena

dynamická smyčka svařitelnosti pro stejný základní materiál, pro který je na obr. 3.67 oscilační smyčka svařitelnosti.



Obr. 3.68 Dynamická smyčka svařitelnosti pro ocelový plech s povlakem slitiny Fe-Zn, (elektrodové špičky Cu-Cr-Zr), a vyhodnocení životnosti elektrod

Při stanovení životnosti elektrod z oscilační i dynamické smyčky svařitelnosti se postupuje obdobně. Životnost elektrod je dána počtem vytvořených svarů v období, během kterého se nominální svařovací proud stane proudem pro minimální přípustné rozměry svarů. Způsob stanovení životnosti elektrod je zřejmý z obr. 3.67 a obr. 3.68. Životnost elektrod je přímo úměrná podílu původního rozsahu svařovacího proudu a rychlosti růstu minimálního svařovacího proudu. Dynamické i oscilační smyčky svařitelnosti poskytují informace o životnosti elektrod i o použitém rozsahu svařovacího proudu a odstraňují tak nutnost stanovení konvenčních smyček svařitelnosti.

Popsaná metodika určování životnosti elektrod podle dynamické a oscilační smyčky svařitelnosti umožňuje:

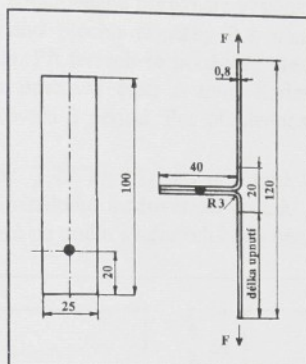
- posoudit vliv počátečních svařovacích podmínek
- odhad životnosti elektrod v situacích, kdy smyčka je zhotovena pouze pro omezený počet svarů - extrapolací linie pro minimální rozměry svarů lze provést indikaci životnosti elektrod pro situace, kdy je typická dlouhá životnost
- odhad potřebné rychlosti růstu proudu či proudové hustoty ke kompenzaci účinku opotřebení elektrod.

Při porovnání výsledků standardních testů životnosti elektrod a životnosti elektrod stanovených na základě smyček svařitelnosti jsou podobné jako u standardních testů a životnosti stanovené z oscilační smyčky svařitelnosti jsou až o 50 % menší, než u obou dalších metod. Podle závěru v [32] je svařitelnost plechů s povlaky nejlépe indikována dynamickou smyčkou svařitelnosti, eventuálně i oscilační smyčkou svařitelnosti. Dynamické a oscilační smyčky svařitelnosti jsou také prostředkem k programování krokových systémů kompenzujících opotřebení elektrod.

SCHMITZ a DEFOURNY v [86] popisují postup hodnocení svařitelnosti ocelových plechů s povlaky podle změny nominální hodnoty svařovacího proudu v průběhu testu, ve kterém se celkem svaří 2000 svarů. Při provádění testu se používají dva typy vzorků. Vzorky s rozměry 100 x 300 mm slouží pro vytváření svarů, v kterých se během testu nevyhodnocuje kvalita a vzorky 25 x 100 mm pro odlupovací zkoušku. Postup zkoušky zahrnuje opakované provádění tří kroků až do zhotovení 2000 svarů. Před vlastním testem se provede kontrola

rovnoběžnosti pracovních ploch elektrod a elektrody se připraví svařením 50 svarů (5 krát se opakuje první krok vlastního testu). Během prvního kroku se zhotoví 10 vzorků pro odlupovací zkoušku s postupně rostoucím svařovacím proudem tak, aby byl zahrnut jak začátek tvorby svarů, tak i hranice výstřiku tekutého kovu. To umožní stanovit závislost $I_s - d_s$ a také vhodné nastavení odboček svařovacího transformátoru.

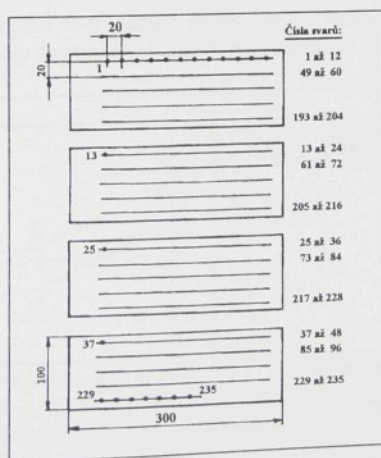
Na základě výsledků prvního kroku se svařovacím proudem odpovídajícím velikosti svaru $5\sqrt{s}$ (tzv. nominální svařovací proud) ve druhém kroku svaří 5 vzorků pro odlupovací zkoušku. Umístění svarů na vzorku pro odlupovací zkoušku i celkové geometrické uspořádání vzorku při zkoušce je na obr. 3.69.



Obr. 3.69 Geometrické uspořádání odlupovací zkoušky

Výsledky získané vyhodnocením odlupovacích zkoušek slouží k posouzení rozptýlu rozměrů svarů. Nominální hodnotu svařovacího proudu je vhodné stanovit ze závislosti $I_s - d_s$ získané regresní analýzou z dat stanovených v prvním kroku.

Stejným svařovacím proudem jako ve druhém kroku se ve třetím kroku zhotoví 235 svarů při kadenci specifikované v popisu testu na vzorcích s rozměry 100 x 300 mm postupem zřejmým z obr. 3.70.

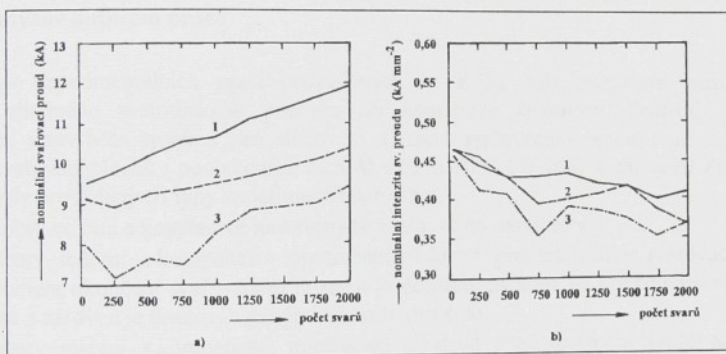


Obr. 3.70 Postup svařování při zkoušce životnosti elektrod

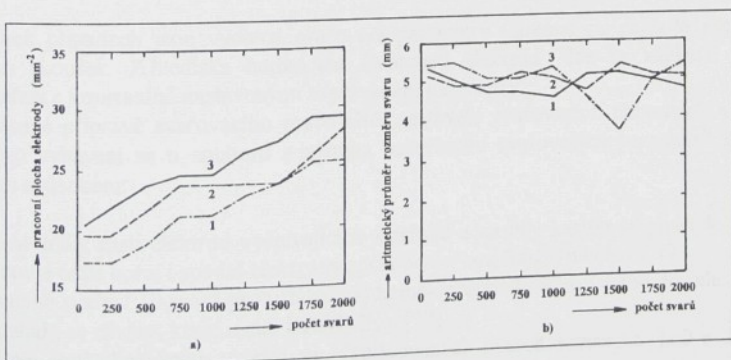
Při první aplikaci třetího kroku se svařuje pouze 195 svarů, neboť 50 svarů již bylo předtím zhotoveno. Třetí krok v podstatě simuluje průběh rostoucího opotřebení elektrod. Každá realizace všech tří kroků znamená zhotovení 250 svarů. Potom se vždy musí postupem uvedeným v prvním kroku znovu stanovit nominální hodnota svařovacího proudu pro realizaci druhého a třetího kroku. Test je ukončen po zhotovení 2000 svarů. Za situace, že během testu již nelze dosáhnout podmínek pro vytváření svarků s velikostí $5\sqrt{s}$, test se ukončí dříve.

Hlavním výsledkem testu je grafické zpracování závislosti nominálního svařovacího proudu na počtu svařených bodů. V závislosti na počtu svařených bodů se vyhodnocuje také velikost pracovní plochy elektrod, hustota nominálního svařovacího proudu a střední hodnota rozměru svarů. V práci [86] je podrobně zpracování a porovnání výsledků testu i hodnocení svařitelnosti oboustranně žárově pozinkovaného plechu tloušťky 0,8 mm a tloušťkou povlaku $10\text{ }\mu\text{m}$ provedených v sedmi laboratořích. Při testech se používaly elektrodové špičky z materiálu Cu-Cr-Zr a počátečním průměrem pracovní části 6 mm. Kadence svařování činila 30 min^{-1} , svařovací čas 12 period a čas kování 8 period. Pro přehlednost bude v dalším uveden pouze výběr výsledků ze tří laboratoří.

Na obr. 3.71, a), b), a obr. 3.72 a), b) jsou postupně uvedeny závislosti nominálního svařovacího proudu, hustoty nominálního svařovacího proudu, velikosti plochy pracovní části elektrod a středních rozměrů svarů na počtu svařených bodů během testů.



Obr. 3.71 Závislost nominálního svařovacího proudu (a) a hustoty nominálního svařovacího proudu (b) na počtu zhotovených svarů - výsledky ze tří laboratoří



Obr. 3.72 Závislosti na velikosti pracovní plochy elektrod (a) a středních průměrů svarů (b) na počtu zhotovených svarů - výsledky ze tří laboratoří

Z uvedených obrázků je zřejmé, že výsledky z jednotlivých laboratoří se liší. Rozdílnost může být způsobena druhem svařovacího stroje, měřicími přístroji pro měření proudu i mnoha dalšími okolnostmi. Rozdílný může být i samotný nárůst opotřebení elektrod, o čemž svědčí i závislosti velikosti pracovních ploch elektrod. Z obr. 71 b) vyplývá, že pro kompenzaci opotřebení elektrod během testů není nutné udržovat konstantní úroveň hustoty nominálního svařovacího proudu.

Svařitelnost jednotlivých druhů základních materiálů lze porovnávat podle rychlosti růstu nominálního svařovacího proudu během testu. Podle [86] poskytuje tento test spolehlivější a významnější informace o svařitelnosti ocelových plechů s povlaky, než klasický postup určování životnosti elektrod.

Podle [87] je kritériem svařitelnosti plechu nejmenší rozměr svaru zjištěný při testu, během kterého se vytvoří celkem 2000 svarů s pevně nastavenými svařovacími parametry a bez úpravy pracovních ploch elektrod. Při testu se proměřuje každý 250-tý svar. Test se provádí pro plech tloušťky 0,8 mm a 1,3 mm s kuželovými elektrodami na bázi slitiny Cu-Cr s průměrem pracovní části 4,8 mm (pro tloušťku plechu 0,8 mm) a 6,35 mm (pro tloušťku plechu 1,3 mm) a vrcholovým úhlem 90°. Při testu je plech situován tak, že povlak je ve styku s elektrodami.

3.4.2 Metodické postupy hodnocení životnosti elektrod při svařování plechů s povlaky aplikované autorem práce

V rámci experimentálních prací prováděných na KSM byla pozornost zaměřena na stanovení vhodného metodického postupu při hodnocení životnosti elektrod především v souvislosti s návrhem systému pro sledování a řízení svařovacího procesu při odporovém bodovém svařování plechů s povlakem na bázi Al + (8 až 10 % Si) [54] a slitiny Al-Zn [58].

V zásadě byly prováděny tři typy experimentálních prací:

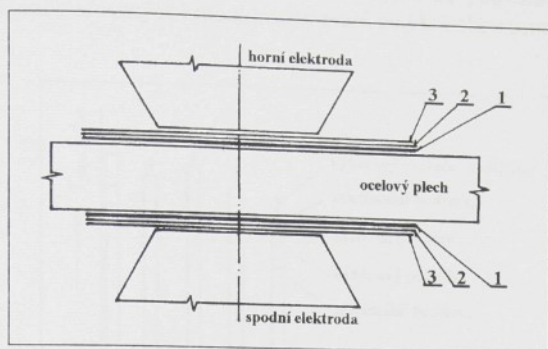
- soubory měření s konstantně nastavenými svařovacími parametry
- soubory měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času (kritériem ukončení svařovacího procesu je dosažení maxima na křivce tepelné expanze svaru a zároveň je limitován maximální svařovací čas)
- soubory měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času (kritériem pro ukončení svařovacího procesu je dosažení určité hodnoty kontrolní veličiny odvozené z průběhu elektrických veličin a zároveň je limitován maximální svařovací čas).

Ve všech případech jsou výchozí svařovací parametry určeny na základě předchozích ověřovacích zkoušek. Z hlediska hodnocení životnosti elektrod lze za základní pokládat soubory měření s konstantně nastavenými svařovacími parametry.

Po celkové přípravě svařovacího pracoviště, nastavení svařovacích parametrů a přípravě přístrojového vybavení se u souboru s pevným nastavením svařovacích parametrů postupuje následujícím způsobem:

- a) určení délky části elektrod vyčnívajících z držáků a na bílý karton se provede 6 vtisků pracovní části horní i spodní elektrody způsobem vyznačeným na obr. 3.73
- b) postupné svaření 10 svarů pro ustálení podmínek průchodu svařovacího proudu v souladu se závěry, které uvádí KRAUSE v [37]
- c) svaření šesti zkušebních vzorků na přepletovaných pásech s rozměry 100 x 1000 mm pro vyhodnocení únosnosti svarového spoje
- d) svaření svarových spojů mezi jednotlivými sériemi zkušebních vzorků na přepletovaných pásech 30 x 1000 mm (rozteč svarů se udržuje přibližně 15 mm)

- e) pro hodnocení opotřebení elektrod se změří délka a provede se 6 vtisků pracovní části stejně jako v bodě a).



Obr. 3.73 Provedení otisku pracovní části elektrod
1 - bílý karton, 2 - kopírovací papír, 3 - Al fólie (Alobal)

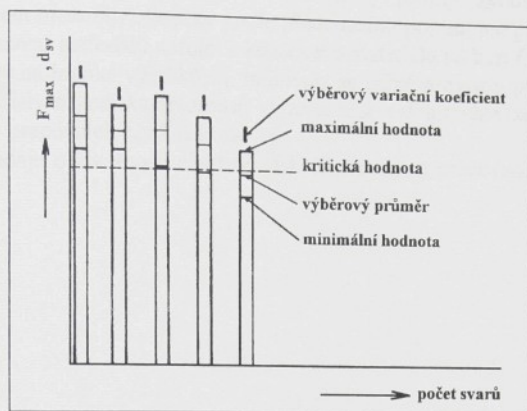
V dalším průběhu souborů měření se postupuje opakováním činnosti podle bodů c), d), a e). Série zkušebních vzorků se svařují po provedení 50, 100 a dále každých dalších 100 svarů až do okamžiku, kdy se přestávají tvořit svarové čočky (zjišťuje se občasným provedením odlupovací zkoušky u svarů prováděných na přeplátovaných páslech 30 x 1000 mm).

U jednotlivých souborů měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času do okamžiku dosažení maxima na křivce průběhu tepelné expanze svaru se během postupného vytváření svarů podle bodu d) udržují svařovací parametry na hranici výstřiků. Postup činností podle bodu c), d), a e) končí po dosažení maximálního svařovacího času 0,30 s.

U souboru měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času podle hodnot kontrolní veličiny se nejprve postupuje podle bodů a), b) a c). Vhodný svařovací čas pro další zkušební sérii vzorků je stanoven po vyhodnocení kontrolní veličiny u tří předběžně zhotovených svarů. Podle výsledků se nastaví vhodný svařovací čas a svaří se série zkušebních vzorků. Dále se pokračuje podle bodů d), e) a po opětovné úpravě svařovacího času bodem c). Uvedeným způsobem se postupuje až do okamžiku, kdy se dosáhne zvýšení svařovacího času o 100 % vzhledem k výchozí hodnotě svařovacího času. Další podrobnosti o metodickém postupu realizace experimentu jsou uvedeny v práci [54].

U každé série zkušebních vzorků se provede vyhodnocení kvality svarů. Ze šestice vzorků se náhodným způsobem vybere vzorek pro metalografický rozbor a ostatní jsou určeny pro mechanickou zkoušku t.j. zkoušku tahem na odtržení plechů v souladu s obr. 3.22. Ze stanovených hodnot maximální únosnosti svaru F_{max} a rozměru svarů d_{sv} se určí základní charakteristiky náhodného výběru (tj. výběrový průměr, výběrová směrodatná odchylka a výběrový variační koeficient). Získané výsledky jsou dále zpracovány formou sloupcových grafů $F_{max} - n$ a $d_{sv} - n$, kde n představuje počet vytvořených svarů, způsobem zřejmým z obr. 3.74. V jednotlivých typech grafů pro soubory měření s konstantně nastavenými svařovacími parametry se vyznačí kritická hodnota pro veličiny F_{max} a d_{sv} . Kritická hodnota byla pro únosnost svaru stanovena v souladu s Doc. IIW III-536-78 jako 80 % z hodnoty výběrového průměru svarů z první série zkušebních vzorků svařených na začátku testu. Pro kritickou únosnost svarů z první série zkušebních vzorků svařených na začátku testu. Pro kritickou úroveň hodnoty rozměru svaru se v práci [54] uvažovala v souladu s ČSN 05 0005 hodnota o 10 % menší než předepsaná hodnota. Za předepsanou hodnotu byla považována doporučená

velikost svaru $5\sqrt{s}$. Takto stanovené kritérium pro kritickou velikost rozměru svaru je však velmi přísné a v dalších testech byla uvažována kritická hodnota stanovená jako $3\sqrt{s}$. Životnost elektrod je stanovena jako počet svarů zhotovených do poslední série zkušebních svarů, než došlo k poklesu sledovaných kritérií kvality svarů pod kritickou úroveň.



Obr. 3.74 Zpracování naměřených hodnot únosnosti a rozměrů svarů

V souborech měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času se za základní kritérium kvality svaru pokládá jeho rozměr. V grafech $d_{sv} - n$ byla pro veličinu d_{sv} vyznačena úroveň rozměru svaru odpovídající vztahu $5\sqrt{s}$. Během celého testu nesměla úroveň kvality vyhodnocovaných svarů pod tuto mez poklesnout. V daném případě je vlastně životnost elektrod dána celkovým počtem svařených bodů až do ukončení testu v okamžiku dosažení předem stanoveného limitu svařovacího času.

Pro urychlení zkoušek životnosti elektrod s konstantním nastavením svařovacích parametrů i úsporu svařovaných plechů byl uvedený metodický postup s vyhodnocením podle obr. 3.74 modifikován následujícím způsobem. V každé zkušební sérii se svařovaly pouze 3 vzorky. Pokud se uvažovalo provedení metalografického rozboru svařoval se jeden vzorek navíc. Série zkušebních vzorků se svařovaly po svaření 10, 50, 100, 250 a dále vždy po 250 svarech až do zhotovení 2000 svarů. Test je samozřejmě ukončen dříve, pokud se přestanou tvořit svarové čocky (zjišťuje se opět občasným provedením odlupovací zkoušky u svarů svařovaných mezi sériemi zkušebních vzorků na přeplátovaných páscech 30×1000 mm). Tři vzorky ze zkušební série jsou určeny pro mechanické zkoušení (provádí se zkouška na odtržení plechů podle obr. 3.22). Při mechanické zkoušce se určí maximální únosnost svaru F_{max} a po zkoušce se změní rozměry svaru d_{sv} . Při vyhodnocování závislosti $F_{max} - n$ a $d_{sv} - n$, se vzhledem k malému počtu vzorků ve zkušební sérii v sloupcových grafech vyznačí všechny 3 naměřené hodnoty a nepočítají se charakteristiky náhodných výběrů. V grafech se vyznačí kritické hodnoty pro rozměr svaru $3\sqrt{s}$ a pro únosnost svaru 80 % z hodnoty aritmetického průměru maximální únosnosti tří svarů zhotovených v první sérii zkušebních vzorků. Životnost elektrod je stanovena jako počet svarů zhotovených do poslední série zkušebních svarů než dojde k poklesu sledovaných veličin pod kritickou úroveň.

U všech dosud popsaných postupů provádění zkoušek životnosti elektrod byly vždy obě elektrody zhotovené ze stejného materiálu a to z klasického elektrodového materiálu Cu-Cr

podle ON 42 3079.71 s cílem získat údaje o životnosti elektrod při svařování různých typů plechů a určení vlivu svařovacích parametrů a geometrie pracovní části elektrod.

Při ověřování nových elektrodových materiálů je žádoucí porovnání těchto materiálů s klasickými elektrodovými materiály na bázi slitiny Cu-Cr event. Cu-Cr-Zr. V této souvislosti se při testování nových elektrodových materiálů vyráběných práškovou metalurgií v ÚMV SAV v Košicích osvědčila tzv. porovnávací zkouška. Metodický postup zkoušky byl shodný s modifikovaným postupem metodiky zkoušky podle předchozího popisu, ale při svařování byla horní elektroda z testovaného materiálu a dolní z klasického materiálu na bázi Cu-Cr. Svařovací parametry byly nastaveny na hranici výstřiků, tj. imitovaly se těžké provozní podmínky. Pokud se oba elektrodové materiály z hlediska životnosti výrazně liší, velmi rychle lze toto porovnání provést např. již z otisků pracovních částí elektrod.

Některé konkrétní údaje o životnosti elektrod získané na našem pracovišti budou uvedené v části práce 4.

4. BODOVÉ ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ OCELOVÝCH PLECHŮ S POVLAKY

4.1 Přehled vybraných výsledků zkoušek životnosti elektrod

Životnost elektrod závisí na mnoha faktorech a tak lze poměrně obtížně porovnávat práce různých autorů, neboť ne vždy se uvádějí všechny podmínky provedených experimentů. Navíc se samozřejmě může lišit i metodický přístup. V dalším budou uvedeny výsledky některých zkoušek životnosti pro plechy s povlakem na bázi Al-Si a plechy s různými povlaky na bázi slitin Zn. Vzhledem k návaznosti některých experimentálních prací budou zde uvedeny i výsledky souborů měření s kompenzací opotřebení elektrod změnou svařovacích parametrů.

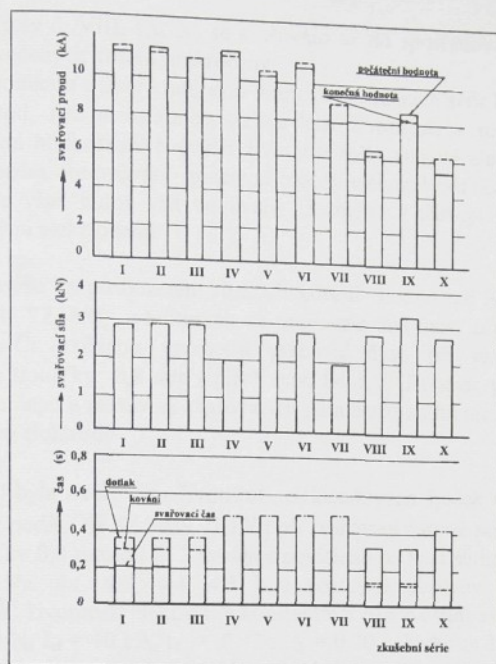
KRAUSE [37] se zabýval hodnocením životnosti elektrod při svařování oboustranně pohlínikovaných plechů tloušťky 0,8 mm. Při experimentech použil dva typy strojů označené A a B (parametry stroje A: $F_s = 1$ až 30 kN, $I_{\max} = 44$ kA, napětí naprázdno 5 a 10 V, parametry stroje B: $F_s = 0,5$ až 3,5 kN, $I_{\max} = 14$ kA, napětí naprázdno 1 až 4 V). Svařovací proud byl na začátku testu nastaven těsně pod hranici výstřiků roztaveného kovu a kadence se pohybovala v mezích 10 až 50 svařů za minutu. Další technologické podmínky a svařovací parametry provedených zkušebních sérií jsou v tab. 4.1 a na obr. 4.1. U páté zkušební série byl po poklesu průměru svaru (včetně tzv. adhezni oblasti) na 80 % původní hodnoty na začátku testu obnoven průměr dosedací plochy elektrody na 5,8 mm a to soustružením boku kuželů.

Výsledky experimentů jsou v grafické podobě na obr. 4.2. Za konec životnosti elektrod se u zkušební série I až VII pokládal pokles jednoho z následujících kritérií o 30 % proti výchozím hodnotám:

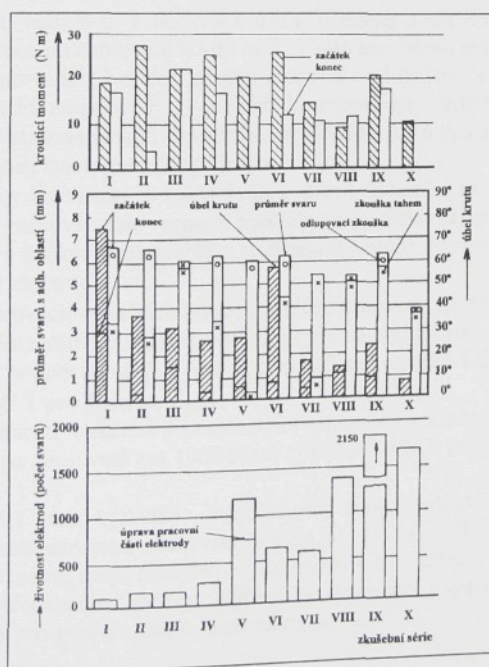
- průměr svaru (měřeno včetně adhezni oblasti)
- krouticí moment stanovený při zkoušce krutem
- úhel krutu dosažený při zkoušce krutem

Tabulka 4.1 Technologické podmínky experimentů z práce [37]

Číslo série	Množství povlaku ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	Rozměry elektrod				Materiál elektrod	Poznámky
		vnější průměr (mm)	průměr pracovní plochy (mm)	poloměr pracovní části (mm)	délka čepu (mm)		
I	100	20	8,5	75	-	CuCrZr	stroj A, množství chlad. vody 4,5 l.min ⁻¹
II	100	20	8,5	75	-	SE-CuAg	stroj A, množství chlad. vody 9 l.min ⁻¹
III	100	20	8,5	75	-	CuCrZr	stroj A, množství chlad. vody 9 l.min ⁻¹
IV	100	20	6,5	100	-	CuCrZr	stroj A, množství chlad. vody 9 l.min ⁻¹
V	100	20	5,8	100	-	CuCrZr	stroj A, množství chlad. vody 9 l.min ⁻¹
IV	150	20	5,8	100	-	CuCrZr	stroj A, množství chlad. vody 9 l.min ⁻¹
VII	150	20	5,0	100	-	CuCrZr	stroj A, množství chlad. vody 9 l.min ⁻¹
VIII	150	12,5	5,0	100	5,0	CuCrZr	stroj B
IX	200	12,5	6,0	100	5,0	CuCrZr	stroj B
X	200	20	5,0	100	5,0	CuCrZr	stroj A, množství chlad. vody 9 l.min ⁻¹



Obr 4.1 Svařovací parametry zkušebních sérií v práci [37]



Obr. 4.2 Vyhodnocení výsledků zkušebních sérií z práce [37]

U čepových elektrod (testy č. VIII, IX, X) se svařovalo až do spotřebování čepu, i když byly mezní hodnoty podle uvedených kritérií překročeny

Podle krouticího momentu a úhlu krutu jsou svařky ze zkušebních sérií I až VI únosnější při kratší životnosti elektrod, než u ostatních sérií s delší životností a menšími výkyvy mezi počátečními a konečnými hodnotami. Nejvyšší životnost měly čepové elektrody, u kterých se využívá efektu postupného obnovování pracovní plochy elektrod odtlačováním ovlivněného materiálu do otřepu. Je však nutné vzít do úvahy i změnu v přístupu při vyhodnocování výsledků testů s čepovými elektrodami.

Hodnocením životnosti a posouzením různých kritérií hodnocení životnosti elektrod se zabývají také práce [71, 72, 88], ve kterých se ověřovala životnost přímých elektrodových špiček z materiálu Cu-Cr s různou geometrií pracovní části při svařování oboustranně pohlínkovaného plechu tloušťky 0,8 mm (plech typu fal 1, f. Thyssen, povlak 80 g.m⁻²). Při vhodné volbě geometrie čepu a nastavení svařovacích parametrů na hranici výstřiků vykazovaly nejdelší životnost čepové elektrody.

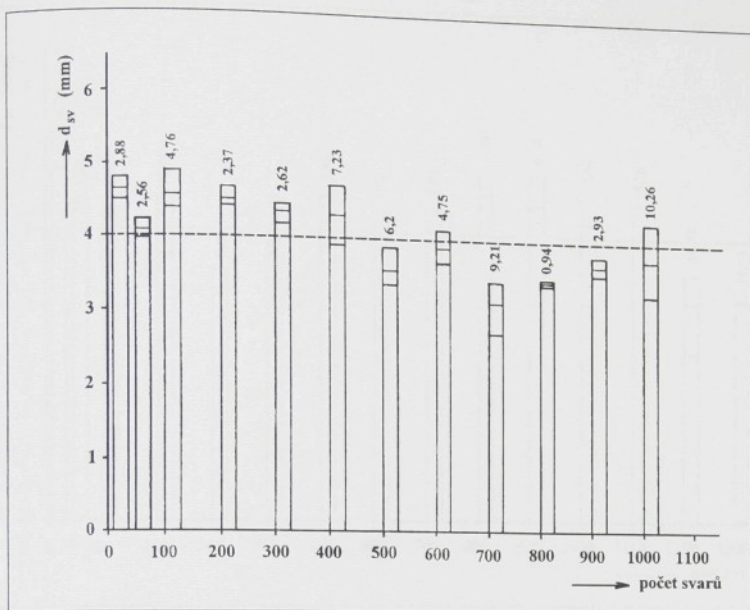
V rámci práce [54] byla ověřována životnost elektrodových špiček C 16 ON 05 2675.2 [89] z materiálu Cu-Cr podle ON 42 3039.71 [30] při svařování žárově pokoveného ocelového plechu typu fal 1 tloušťky 0,8 mm od f. Thyssen s povlakem na bázi slitiny Al + 9 až 10 % Si v množství 80 g.m⁻². Na obr. 4.3, 4.4, 4.5 jsou postupně uvedeny výsledky grafického vyhodnocení tří zkoušek životnosti elektrod s konstantním nastavením svařovacích parametrů ($t_e = 0,12$ s, $F_s = 2250$ N, $I_{ef} = 10$ kA, $t_d = 0,42$ s, $t_k = 0,20$ s, kadence 12 min⁻¹). Metodický postup provedení a vyhodnocení zkoušek je v souladu s popisem v části práce 3.4.2 a schématickým obr. 3.74. Z grafů d_{sv} - n je zřejmé, že při limitování přípustného poklesu rozměru svarů pouze o 10% proti hodnotě odpovídající $5\sqrt{s}$, je dosahovaná životnost elektrod velmi nízká. U souboru měření č. 1 došlo k poklesu rozměru svaru pod tuto mez již v sérii zkušebních vzorků svařených po zhotovení 50-ti svarů. V této souvislosti je nutno připomenout, že zkoušky životnosti se prováděly bez tzv. záběhu elektrod a „doladění“ svařovacích parametrů. Celkový charakter průběhu závislosti F_{max} - n dobře koresponduje s průběhem závislosti d_{sv} - n. Při porovnání úrovní stanovených kritických hodnot kvality svarů d_{krit} a F_{krit} se kritérium pro kritickou úroveň únosnosti svaru jeví jako přísnější.

V průběhu zkoušky životnosti se může kvalita svarů dočasně znovu zvýšit (především u souboru měření č. 2), celkově však proces opotřebování elektrod vede ke stavu, kdy se přestávají tvořit svarové čochy. Okamžik, kdy se přestávají tvořit svarové čochy se pokládá za tzv. celkovou životnost elektrod.

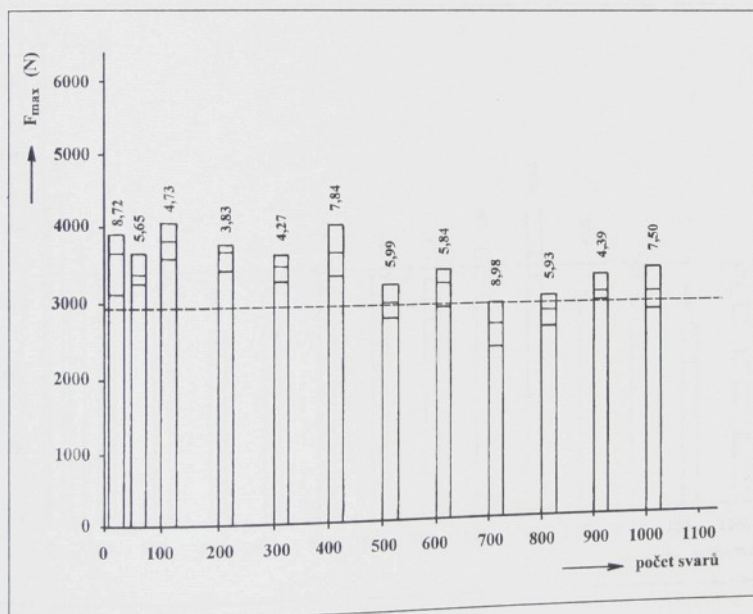
Podle hodnot výběrových variačních koeficientů lze pozorovat, jak se v průběhu rostoucího opotřebování elektrod mění relativní charakteristika rozptýlení hodnot rozměrů svarů a únosnosti svarů. Největší rozptyl hodnot d_{sv} a F_{max} je u sérii zkušebních vzorků svařených ke konci testů (s výjimkou u souboru č. 1 pro hodnoty F_{max}).

Během testu životnosti elektrod s konstantním nastavením svařovacích parametrů činil úbytek délky elektrod po zhotovení cca 1000 svarů přibližně 1 mm a průměr dosedací plochy se zvětšil o 2 až 2,5 mm.

Na obr. 4.6, a 4.7 jsou výsledky vyhodnocení dvou souborů měření s kompenzací opotřebování elektrod prodlužováním svařovacího času až do okamžiku dosažení maxima na křivce tepelné expanze svaru, resp. dosažení hranice výstřiků. Počáteční nastavení svařovacích parametrů je shodné s předchozími soubory měření. Ve sloupcích v grafech jsou vždy uvedeny příslušné svařovací časy pro příslušné série zkušebních vzorků.

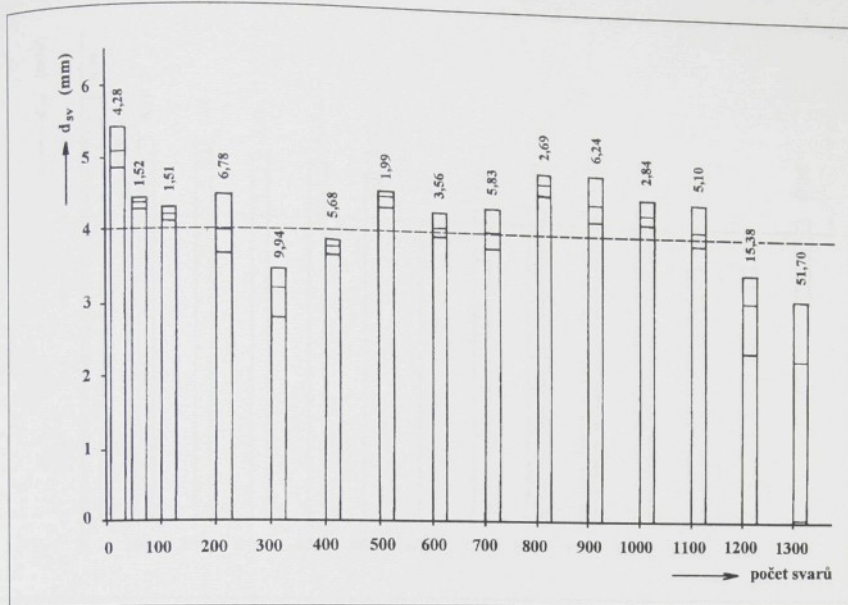


a)

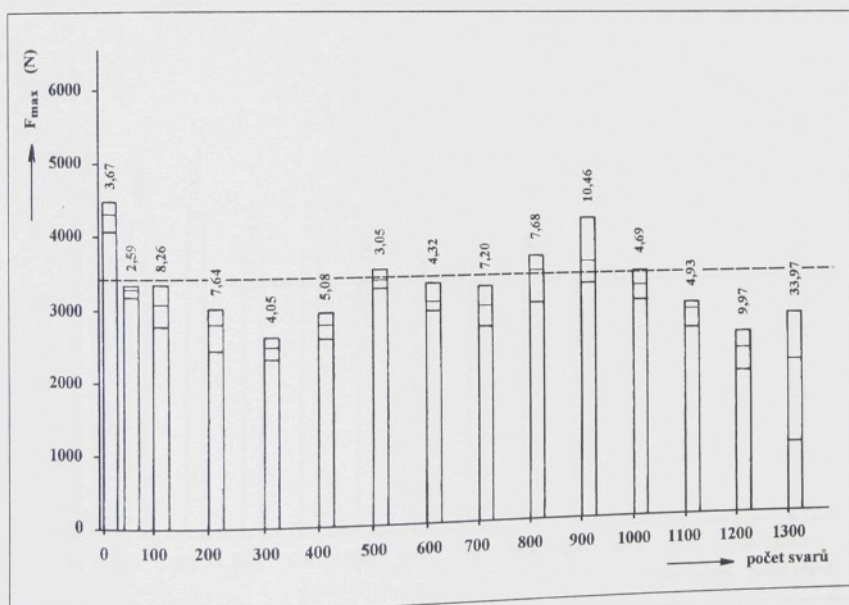


b)

Obr. 4.3 Závislosti rozměru svarů (a) a únosnosti svarů (b) na počtu zhotovených svarů-
soubor měření č. 1

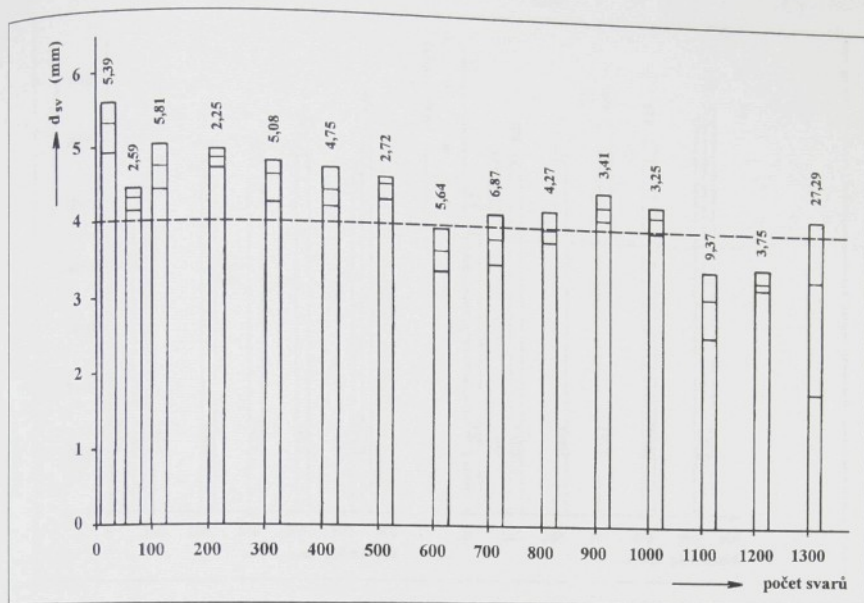


a)

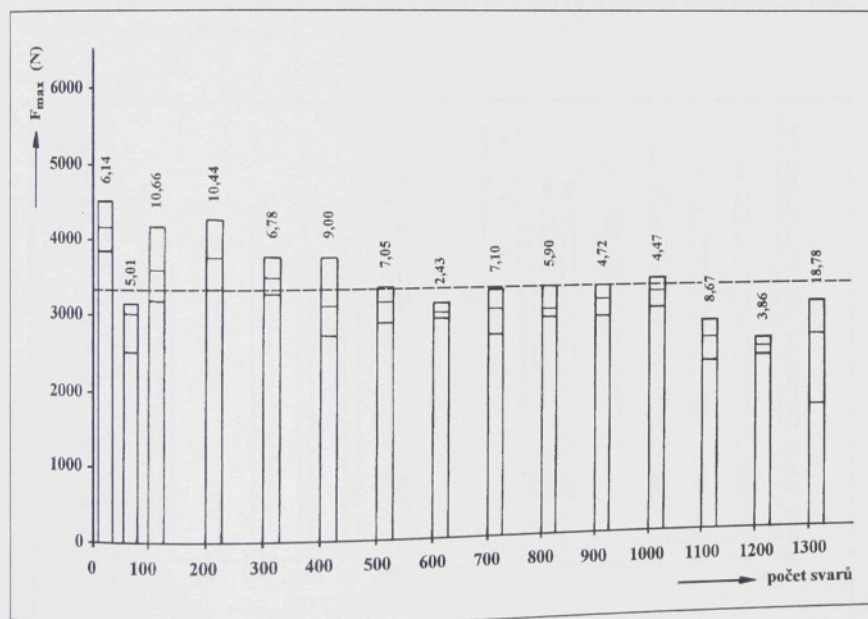


b)

Obr. 4.4 Závislosti rozměru svarů (a) a únosnosti svarů (b) na počtu zhotovených svarů- soubor měření č. 2



a)



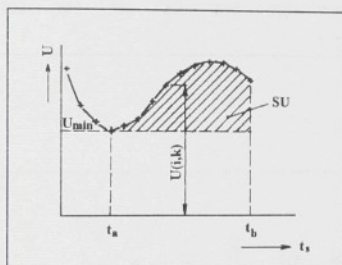
b)

Obr. 4.5 Závislosti rozměru svarů (a) a únosnosti svarů (b) na počtu zhotovených svarů- soubor měření č. 3

Testy byly ukončeny v okamžiku, kdy se dosáhlo zvýšení svařovacího času z 0,12 s na 0,30 s. Z uvedených grafů je zřejmé, že kompenzace rostoucího opotřebení elektrod prodloužováním svařovacího času, kdy kritérium pro ukončení svařovacího procesu je dosažení maxima na křivce tepelné expanze svaru (resp. hranice výstřiků), vede k postupnému zvětšování rozměrů i únosnosti svarů. Výběrové variační koeficienty charakterizují rozptýlení hodnot F_{max} a d_{sv} u jednotlivých sérií zkušebních vzorků se v průběhu testů výrazně nemění a jsou v porovnání s výběrovými variačními koeficienty stanovenými u souborů měření s konstantně nastavenými svařovacími parametry nižší. Předem stanovený limit maximálního svařovacího času byl dosažen obvykle po zhotovení 600 svařových spojů.

Na obr. 4.9 a 4.10 jsou výsledky vyhodnocení souborů měření s kompenzací opotřebení elektrod prodloužováním svařovacího času, u kterých kritériem pro ukončení svařovacího procesu bylo dosažení určité hodnoty kontrolní veličiny SU, stanovené z časového průběhu napětí mezi elektrodami (obdobně i veličiny SR stanovené z časového průběhu tzv. dynamického elektrického odporu mezi elektrodami). Význam veličiny SU (obdobně i SR) definované vztahem (4.1) je zřejmý z obr. 4.8.

$$SU = \int_{t_a}^{t_b} (U - U_{min}) dt \quad (4.1)$$

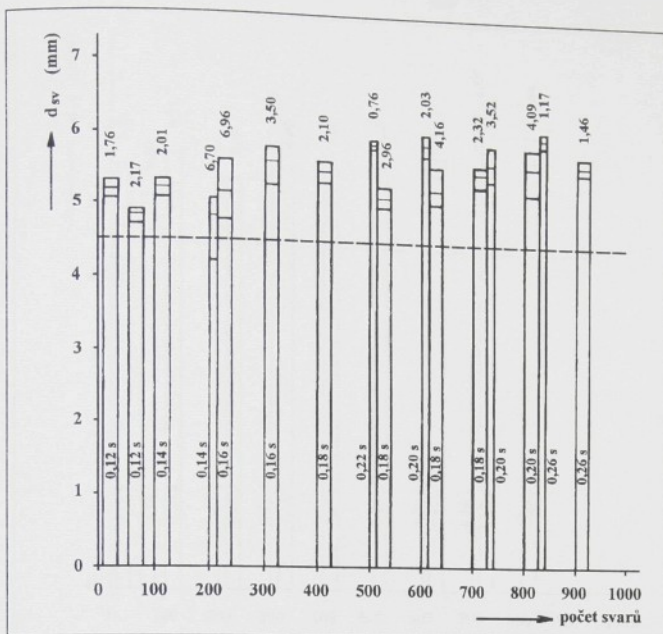


Obr. 4.8 Význam kontrolní veličiny svařovacího procesu SU definovaný vztahem (4.1)
i = číslo vzorku, k = číslo půlvy svařovacího proudu.

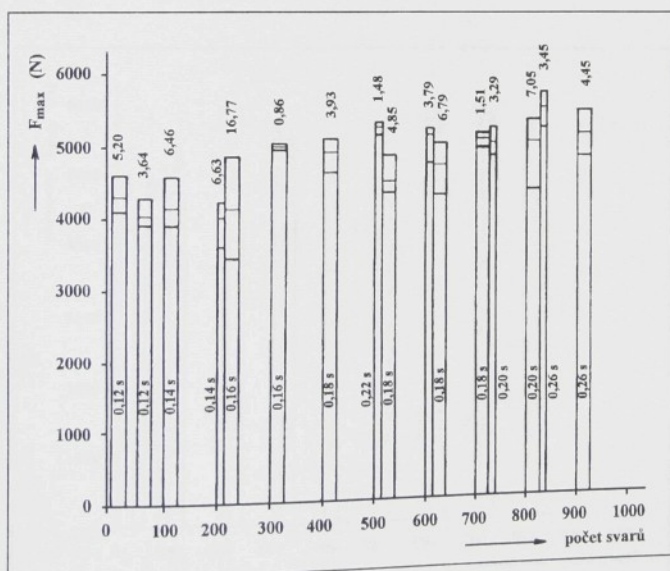
Praktický výpočet veličiny SU se prováděl podle vztahu (4.2), kde z značí číslo půlvy s výskytem minima hodnoty U (i, k) v čase delším než 2 půlperiody a Δt je čas 1 půlperiody, tj. 0,01 s.

$$SU(i) = \Delta t \sum_{k=z+1}^j \left[\frac{U(i, k-1) + U(i, k)}{2} - U(i, z) \right] \quad (4.2)$$

Ve sloupcových grafech na obr. 4.8 a 4.9 jsou uvedeny příslušné svařovací časy a v grafu d_{sv} - n je vyznačena minimální přijatelná velikost svaru. V případě, že v některé sérii zkušebních vzorků byla naměřena hodnota $d_{sv} < 4,5$ mm, svařila se vždy ještě jedna série vzorků s delším svařovacím časem. Zkušební série s výskytem hodnot $d_{sv} < 4,5$ mm jsou v grafech d_{sv} - n a F_{max} - n odlišeny poloviční šířkou základny sloupce. Úzké sloupce jsou kresleny i v případech, kdy opotřebení elektrod bylo kompenzováno zbytečně velkým prodloužením svařovacího času. Pokud se berou do úvahy pouze zkušební série s přiměřenou kompenzací opotřebení, pohybovaly se rozměry svarů v rozmezí 4,65 až 6,06 mm. Výběrové variační koeficienty charakterizující rozptýlení hodnot d_{sv} a F_{max} se pro jednotlivé zkušební série vzorků příliš neliší a pro hodnoty rozměrů svarů jsou menší, než pro hodnoty únosnosti svarů.

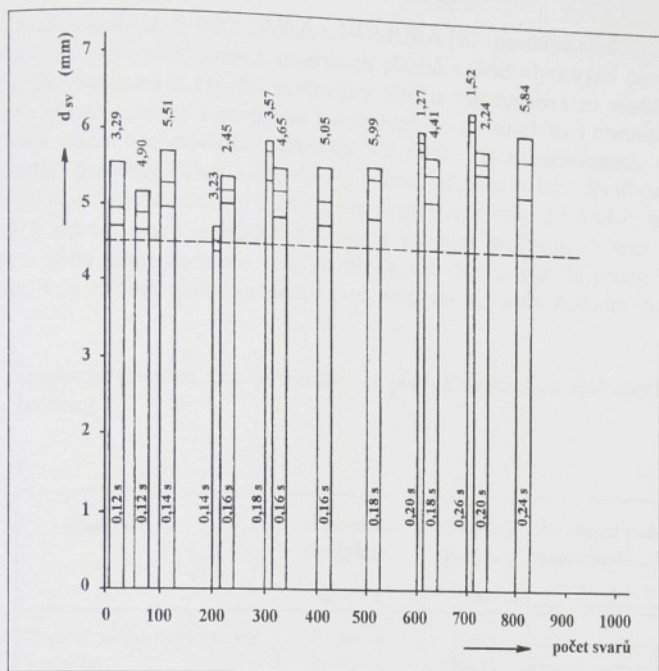


a)

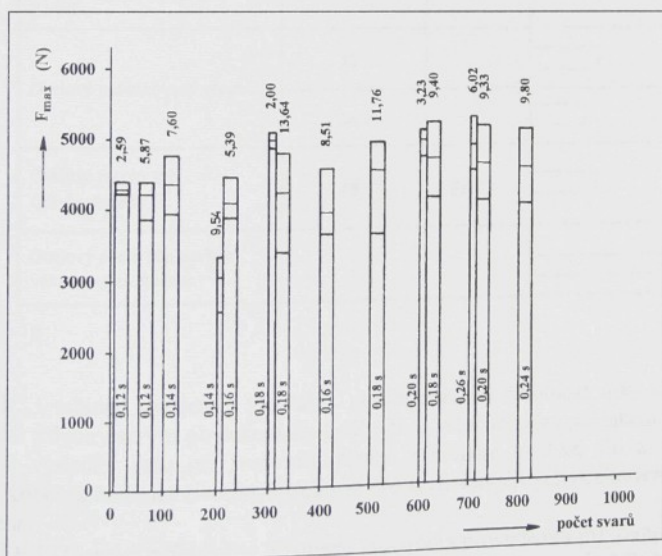


b)

Obr. 4.9 Závislosti rozměru svarů (a) a únosnosti svarů (b) na počtu zhotovených svarů-soubor měření č.9



a)

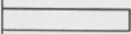
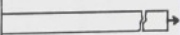


b)

Obr. 4.10 Závislosti rozměru svarů (a) a únosnosti svarů (b) na počtu zhotovených svarů - soubor měření č.7

TANAKA, SAKAGUCHI, SHIRASAWA a NOMURA [91] porovnávají životnost elektrod z materiálu CuCr1 při svařování různých ocelových plechů s elektrolytickými povlaky na bázi Zn, plechů typu Galvannealed a čistého ocelového plechu válcovaného za studena. Základní ocelový plech pro výrobu plechů s povlakem byl shodný co do tloušťky i chemického složení jako čistý ocelový plech bez povlaku (tloušťka 0,8 mm). Při experimentech se používaly elektrody s vypuklou pracovní částí s dosedací plochou průměru 6 mm. Svařovací síla činila přibližně $F_s = 2000$ N, svařovací čas $t_s = 0,24$ s a svařovací proud byl o 2 kA větší, než minimální svařovací proud k získání svarů průměru 4,5 mm a kadence svařování 1 svar za sekundu. Periodicky se prováděla kontrola svaru vždy po provedení 500 svarů. Za konec životnosti se pokládá okamžik, kdy rozměr svaru poklesne pod hodnotu 4,5 mm. Získané výsledky jsou v tab. č. 4.2.

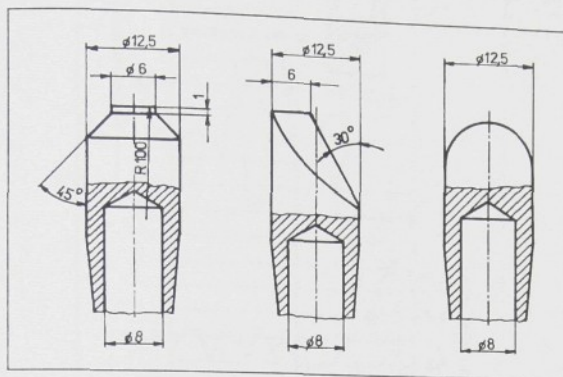
Tabulka č. 4.2 Životnost elektrod z materiálu CuCr1 při svařování ocelových plechů s různými povlaky.

Materiál	Hmotnost povlaku (g.m ⁻²)	Obsah prvku (%)	Životnost elektrod: počet bodů x 10 ³									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ocelový plech s dvouvrstvým povlakem Zn-Fe/Zn-Ni	Zn-Fe: 4 Zn-Ni: 16	Fe: 85 Ni: 11										
Ocelový plech s jednovrstvým povlakem Zn-Ni	20	Ni: 11										
Ocelový pozinkovaný plech	20	-										
	36	-										
Ocelové plechy typ Galvannealed	40	Fe: 12										
Ocelový plech bez povlaku válcovaný za studena	-	-										

Porovnáváme-li v tabulce uvedené výsledky, potom nejvyšší životnost mají elektrody při svařování plechů s dvouvrstvým povlakem Zn-Fe/Zn-Ni a jednovrstvým povlakem typu Zn-Ni. Podstatně horší výsledky jsou při svařování plechů s povlaky na bázi Zn a plechů typu Galvannealed. Konečná hodnota životnosti elektrod pro svařování čistých ocelových plechů není v článku uvedena.

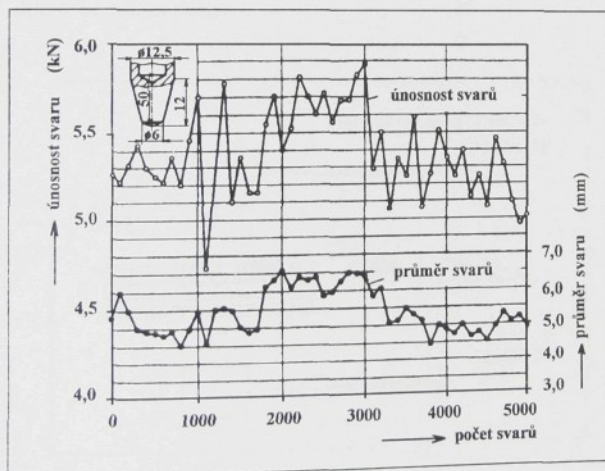
GRAHLE [92] uvádí průměrnou životnost elektrod s provedením pracovní části podle obr. 4.11 při svařování žárově pozinkovaných plechů klešťovými svařečkami 1000-1500 svarů.

U stacionárních bodových svářeček činila životnost elektrod s tvarem pracovních částí podle obr. 4.11 4000 - 5000 svarů.



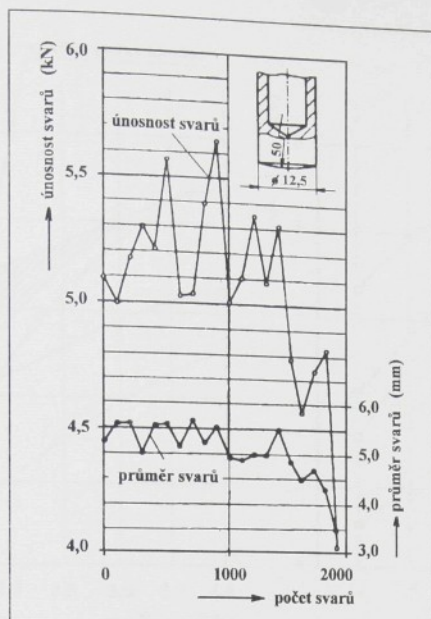
Obr. 4.11 Tvary elektrod pro klešťové svářečky

Na obr. 4.12 jsou grafy závislosti rozměru svarů a maximální únosnosti svarů stanovené smykovou zkouškou na počtu svařených bodů při svařování oboustranně pozinkovaných plechů tloušťky 0,75 mm s povlakem zinku 10 μm . Pro stejné plechy jsou na obr. 4.13 uvedeny obdobné výsledky pro elektrodu s vypuklou pracovní částí. Životnost elektrod s vypuklou pracovní částí je podstatně nižší než u elektrod s tvarem podle obr. 4.12.

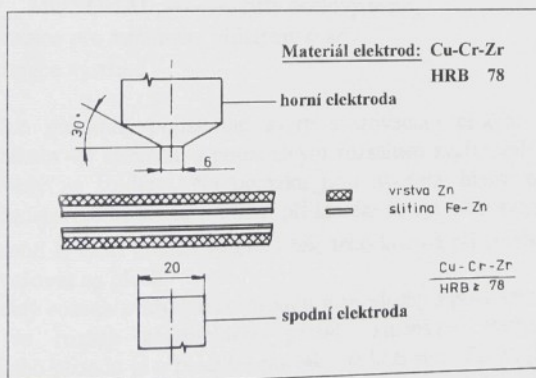


Obr. 4.12 Závislost maximální únosnosti svarů (smyková zkouška) a rozměru svarové čocky na počtu svarů

Na obr. 4.15 a), b) je porovnání použitelných rozsahů svařovacího proudu pro plech MONOGAL (žárově pozinkovaný plech, u kterého je zinek z jedné části okartáčován tzn., že na této straně zůstane pouze tenká vrstva slitiny Fe-Zn vytvořená difúzí) ve srovnání s ocelí bez povlaku. Uspořádání experimentu je na obr. 4.14 [93]. Plechy mají tloušťku 0,8 mm a svařovací čas $t_s = 0,16$ s.

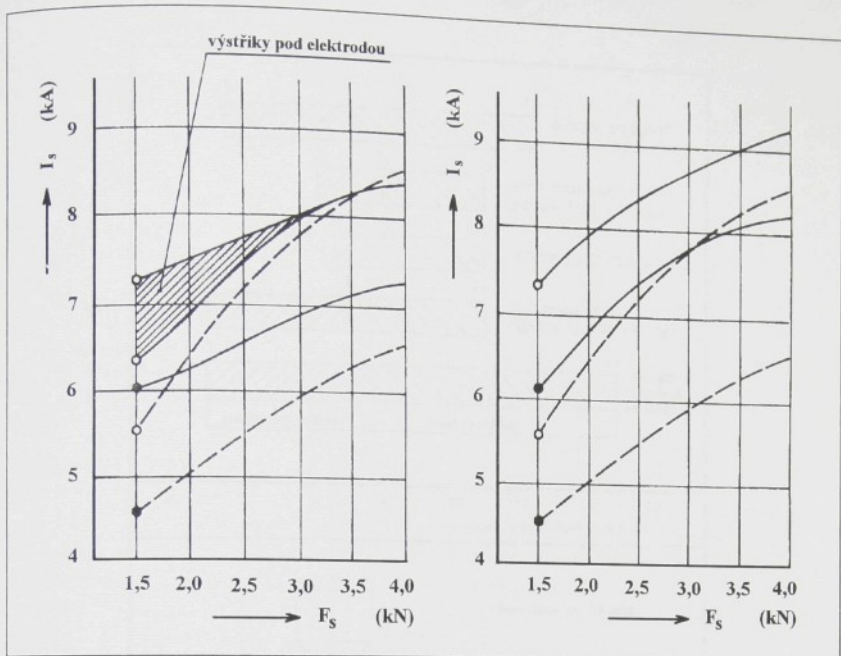


Obr. 4.13 Závislost maximální únosnosti svarů (smyková zkouška) a rozměru svarové čocky na počtu svarů



Obr. 4.14 Uspořádání experimentu při svařování plechu Monogal

Obr 4.15 a) představuje porovnání rozsahů svařovacího proudu pro případ, kdy strany plechu s vrstvou slitiny Fe-Zn jsou uvnitř (tak jako na obr. 4.14) a obr 4.15 b) pro případ, kdy strany plechu s vrstvou slitiny Fe-Zn jsou ve styku s elektrodami. Z obrázků je zřejmé, že svařovací proudy pro plech MONOGAL musí ve srovnatelném případě být větší než pro čisté ocelové plechy a použitelný rozsah proudu k získání svařových spojů s dostatečně velkým rozměrem svaru (ale bez výstřiků) je pro plech MONOGAL menší.



a)

b)

Obr. 4.15 Použitelné rozsahy svařovacích proudů

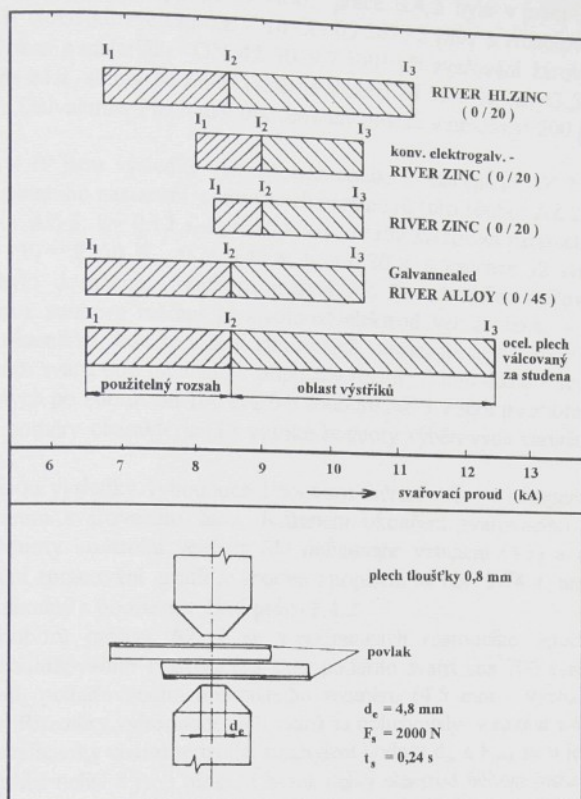
—— MONOGAL, ----- čistý ocelový plech,

- hranice pro minimální přijatelný svar
- hranice výstřiků

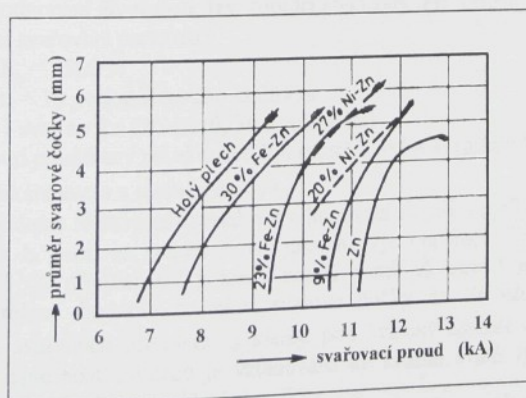
Na obr. 4.16 lze posoudit použitelné svary svařovacího proudu pro různé plechy s jednostranným povlakem ve srovnání s použitelným rozsahem svařovacího proudu pro čistý ocelový plech válcovaný za studena. Na obrázku jsou uvedeny hlavní podmínky zkoušek. Svařovací proud I_1 představuje hodnotu proudu, při kterém se vytvářejí svary s rozměrem $d_{sv} = 4,5 \sqrt{s}$. Svařovací proud I_2 tvoří hranici výstřiků tekutého kovu a při svařovacím proudu I_3 se elektrody začínají přivařovat na plech.

Nejmenší použitelný rozsah svařovacího proudu mají plechy s povlakem zinku a s rostoucí tloušťkou povlaku se rozsah použitelného proudu zmenšuje. Podstatně širší rozsah použitelného svařovacího proudu je u plechů s povlaky na bázi slitin Zn-Fe (RIVER ALLOY) a Zn-Ni (RIVER HI-ZINC). Čímž širší je použitelný rozsah svařovacího proudu, tím lepší je svařitelnost plechu [94].

Na obr. 4.17 jsou závislosti průměru svarové čocky na velikosti svařovacího proudu pro různé typy povlaků převzaté z [62]. S rostoucím obsahem Fe i Ni klesají nároky na velikost svařovacího proudu a obsah Fe má větší vliv na snížení potřebného svařovacího proudu než obsah Ni. Lze tedy konstatovat, že svařitelnost plechů s povlaky na bázi Zn se dá výrazně zlepšit přidávkou železa do povlaku. Železo zvyšuje oxidační potenciál, bod tavení, elektrický odpor a tvrdost povlaku a tím snižuje také nároky na svařovací proud. Zároveň se také zvyšuje životnost elektrod.



Obr. 4.16 Rozsahy použitelných svařovacích proudů pro ocelové plechy s různými typy povlaků



Obr. 4.17 Závislost průměru svarové čocky na velikosti svařovacího proudu pro různé typy povlaků

S využitím metodického postupu podle části práce 3.4.2 byla v práci [58] ověřována životnost kuželových elektrodových špiček C 16 ON 05 2675.2 [89] s vrcholovým úhlem 60° a dosedací plochou 5 mm z materiálu ON 42 3039.7 [90] při svařování žárově pokoveného plechu s povlakem na bázi slitiny Al-Zn-Si (směrné složení Al 55,5 %, Zn 43,5 % a Si 1,5 %) s obchodním názvem Galvalume. Plech měl oboustranný povlak v množství 200 g.m^{-2} a tloušťku 0,8 mm.

Na obr. 4.18 a 4.19 jsou výsledky vyhodnocení souborů značeného AZ 2 a AZ 3, které byly svařeny za konstantního nastavení svařovacích parametrů (pro soubor AZ 2: $t_s = 0,16 \text{ s}$, $I_{ef} = 9,9 \text{ kA}$, pro soubor AZ 3: $t_s = 0,12 \text{ s}$, $I_{ef} = 10,8 \text{ kA}$, ostatní svařovací parametry byly pro oba soubory stejné a to $F_s = 2250 \text{ N}$, $t_d = 0,42 \text{ s}$, $t_k = 0,20 \text{ s}$ a kadence 12 svarů za minutu). Lepšího výsledku bylo dosaženo v souboru měření AZ 3 s tvrdším svařovacím režimem, celkově však pro oba soubory měření je životnost elektrod velmi nízká. V testech se sice pokračovalo až do okamžiku, kde se v sérii zkušebních vzorků již nevytvářely svarové čocky, ale k poklesu rozměru svaru pod minimální přípustný rozměr 4 mm došlo v souboru AZ 2 již v sérii vzorků svařených po zhotovení 100 svarů u souboru AZ 3 v sérii po zhotovení 300 svarů. Celkově nepříznivé poměry charakterizují i vysoké hodnoty výběrových variačních koeficientů pro hodnoty d_{sv} i F_{max} .

Na obr. 4.20 jsou výsledky vyhodnocení souboru měření AZ 4 s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času. Kriteériem ukončení svařovacího procesu bylo dosažení určité hodnoty kontrolní veličiny SU definované vztahem (4.1) a určované podle vztahu (4.2). Formální zpracování grafů je shodné s popisem na obr. 3.74 a metodický postup při realizaci testu je shodný s popisem v části práce 3.4.2.

Při realizaci souborů měření AZ 4 se v podmínkách rostoucího opotřebení elektrod kompenzovaného prodlužováním svařovacího času podařilo svařit cca 700 svarů vyhovujících z hlediska únosnosti, požadovaného minimálního rozměru (4,5 mm - vyznačeno v grafu) i metalurgické kvality. Rozměry vyhodnocených svarů se pohybovaly v rozmezí 4,85 až 5,9 mm. Výběrové variační koeficienty charakterizující rozptýlení hodnot d_{sv} a F_{max} se u jednotlivých sérií zkušebních vzorků příliš neliší a jsou nízké. Úbytek délky elektrod během testu činil 0,6 mm a zvětšení průměru dosedací plochy elektrod 1,75 mm.

TAKAHASHI a SAITO v práci [95] popisují výsledky klasických zkoušek životnosti elektrod z materiálu typu Cu-Cr a slitiny Cu disperzně zpevněné oxidy Al při svařování plechu typu Galvennealed tloušťky 0,8 mm s oboustranným povlakem v množství $60/60 \text{ g.m}^{-2}$. Zároveň představují výsledky hodnocení životnosti tzv. rotující elektrody. Při testech životnosti elektrod byly použity následující svařovací parametry.

Svařovací síla: $F_s = 2500 \text{ N}$

Svařovací čas: $t_s = 10$ period síťového kmitočtu

Kadence: 1 svar za 2 s (20 svarů, 30 s přestávka)

I_A - svařovací proud používaný při zkoušce životnosti $I_A = 1,4 \cdot I_0$ (proud I_0 odpovídá

proudu pro získání svaru s rozměrem $4\sqrt{s}$)

I_B - svařovací proud pro zhotovení vzorků pro odlupovací zkoušku $I_B = 0,85 \cdot I_A$

Svařovací proudy I_A a I_B jsou na stejné úrovni jako na výrobní lince. Proud I_B v podstatě simuluje podmínky 15 % přípustného poklesu napětí v síti. Životnost elektrod je určena okamžikem, kdy průměrná hodnota rozměru svarové čocky ze tří vzorků podrobených odlupovací zkoušce a svařených proudem I_B klesne pod kritický rozměr odpovídající $4\sqrt{s}$. Vzhledem k tomu, že životnost elektrod je vztahována ke kvalitě svarů zhotovených s nižší úrovní svařovacího proudu, dojde k urychlení zkoušky.

Výsledky tří zkoušek životnosti elektrod s vypouklou pracovní částí ($\varnothing 6$, R40) z materiálu typu Cu-Cr a jedné zkoušky elektrody z materiálu disperzně zpevněného oxidy Al (stejná geometrie pracovní části) jsou na obr. 4.21.

S využitím metodického postupu podle části práce 3.4.2 byla v práci [58] ověřována životnost kuželových elektrodových špiček C 16 ON 05 2675.2 [89] s vrcholovým úhlem 60° a dosedací plochou 5 mm z materiálu ON 42 3039.7 [90] při svařování žárově pokoveného plechu s povlakem na bázi slitiny Al-Zn-Si (směrné složení Al 55,5 %, Zn 43,5 % a Si 1,5 %) s obchodním názvem Galvalume. Plech měl oboustranný povlak v množství 200 g.m^{-2} a tloušťku 0,8 mm.

Na obr. 4.18 a 4.19 jsou výsledky vyhodnocení souborů značeného AZ 2 a AZ 3, které byly svařeny za konstantního nastavení svařovacích parametrů (pro soubor AZ 2: $t_s = 0,16 \text{ s}$, $I_{ef} = 9,9 \text{ kA}$, pro soubor AZ 3: $t_s = 0,12 \text{ s}$, $I_{ef} = 10,8 \text{ kA}$, ostatní svařovací parametry byly pro oba soubory stejné a to $F_s = 2250 \text{ N}$, $t_d = 0,42 \text{ s}$, $t_k = 0,20 \text{ s}$ a kadence 12 svarů za minutu). Lepšího výsledku bylo dosaženo v souboru měření AZ 3 s tvrdším svařovacím režimem, celkově však pro oba soubory měření je životnost elektrod velmi nízká. V testech se sice pokračovalo až do okamžiku, kde se v sérii zkušebních vzorků již nevytvářely svarové čocky, ale k poklesu rozměru svaru pod minimální přípustný rozměr 4 mm došlo v souboru AZ 2 již v sérii vzorků svařených po zhotovení 100 svarů u souboru AZ 3 v sérii po zhotovení 300 svarů. Celkově nepříznivé poměry charakterizují i vysoké hodnoty výběrových variačních koeficientů pro hodnoty d_{sv} i F_{max} .

Na obr. 4.20 jsou výsledky vyhodnocení souboru měření AZ 4 s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času. Kriteériem ukončení svařovacího procesu bylo dosažení určité hodnoty kontrolní veličiny SU definované vztahem (4.1) a určované podle vztahu (4.2). Formální zpracování grafů je shodné s popisem na obr. 3.74 a metodický postup při realizaci testu je shodný s popisem v části práce 3.4.2.

Při realizaci souborů měření AZ 4 se v podmínkách rostoucího opotřebení elektrod kompenzovaného prodlužováním svařovacího času podařilo svařit cca 700 svarů vyhovujících z hlediska únosnosti, požadovaného minimálního rozměru (4,5 mm - vyznačeno v grafu) i metalurgické kvality. Rozměry vyhodnocených svarů se pohybovaly v rozmezí 4,85 až 5,9 mm. Výběrové variační koeficienty charakterizující rozptýlení hodnot d_{sv} a F_{max} se u jednotlivých sérii zkušebních vzorků příliš neliší a jsou nízké. Úbytek délky elektrod během testu činil 0,6 mm a zvětšení průměru dosedací plochy elektrod 1,75 mm.

TAKAHASHI a SAITO v práci [95] popisují výsledky klasických zkoušek životnosti elektrod z materiálu typu Cu-Cr a slitiny Cu disperzně zpevněné oxidy Al při svařování plechu typu Galvennealed tloušťky 0,8 mm s oboustranným povlakem v množství $60/60 \text{ g.m}^{-2}$. Zároveň představují výsledky hodnocení životnosti tzv. rotující elektrody. Při testech životnosti elektrod byly použity následující svařovací parametry.

Svařovací síla: $F_s = 2500 \text{ N}$

Svařovací čas: $t_s = 10$ period síťového kmitočtu

Kadence: 1 svar za 2 s (20 svarů, 30 s přestávka)

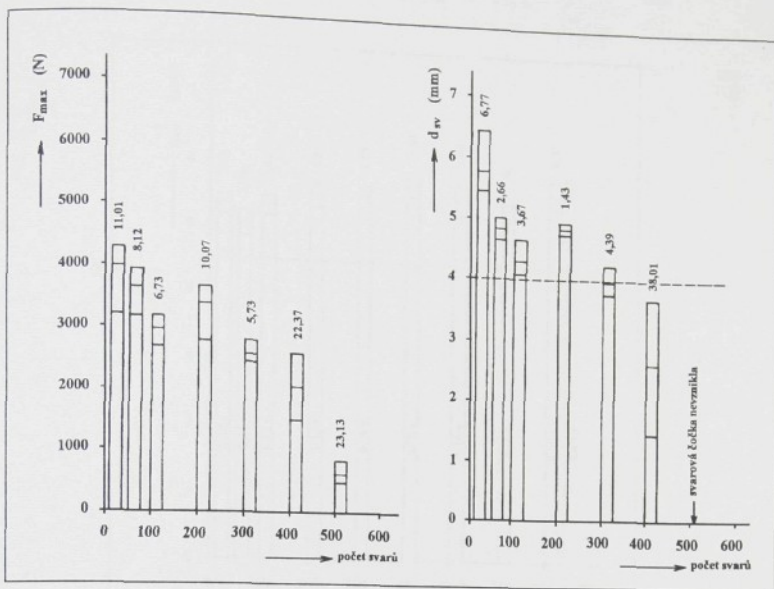
I_A - svařovací proud používaný při zkoušce životnosti $I_A = 1,4 \cdot I_0$ (proud I_0 odpovídá

proudu pro získání svaru s rozměrem $4\sqrt{s}$)

I_B - svařovací proud pro zhotovení vzorků pro odlupovací zkoušku $I_B = 0,85 \cdot I_A$

Svařovací proudy I_A a I_B jsou na stejné úrovni jako na výrobní lince. Proud I_B v podstatě simuluje podmínky 15 % přípustného poklesu napětí v síti. Životnost elektrod je určena okamžikem, kdy průměrná hodnota rozměru svarové čocky ze tří vzorků podrobených odlupovací zkoušce a svařených proudem I_B klesne pod kritický rozměr odpovídající $4\sqrt{s}$. Vzhledem k tomu, že životnost elektrod je vztahována ke kvalitě svarů zhotovených s nižší úrovní svařovacího proudu, dojde k urychlení zkoušky.

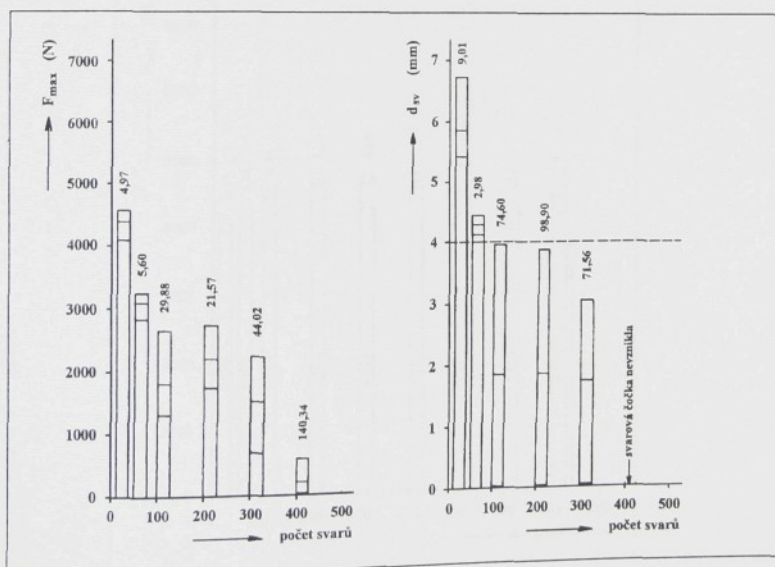
Výsledky tří zkoušek životnosti elektrod s vypouklou pracovní částí ($\varnothing 6$, R40) z materiálu typu Cu-Cr a jedné zkoušky elektrody z materiálu disperzně zpevněného oxidy Al (stejná geometrie pracovní části) jsou na obr. 4.21.



a)

b)

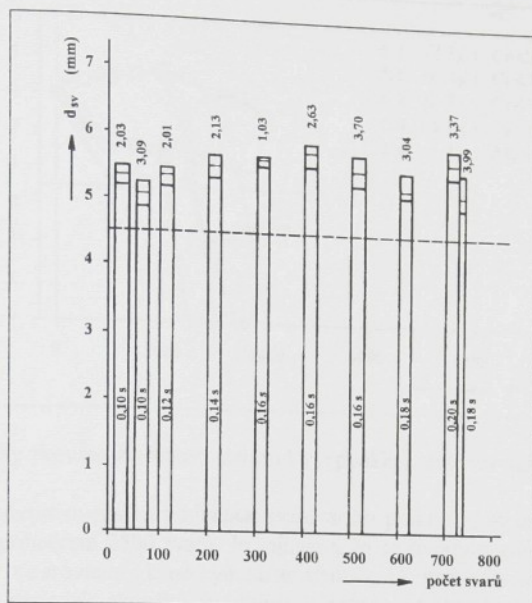
Obr. 4.18 Závislosti únosnosti svarů (a) a rozměru svarů (b) na počtu zhotovených svarů



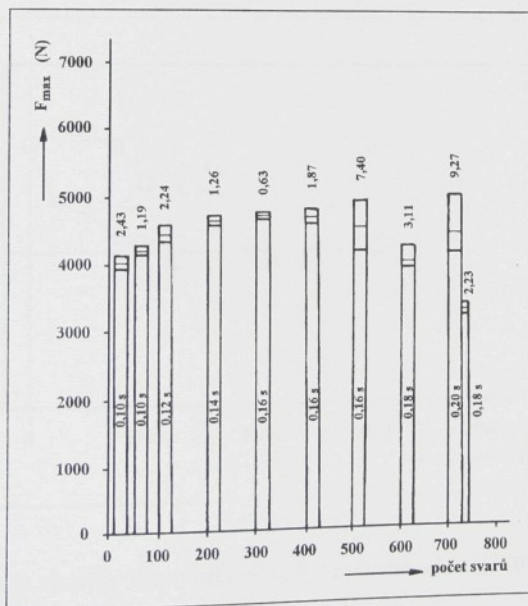
a)

b)

Obr. 4.19 Závislosti únosnosti svarů (a) a rozměru svarů (b) na počtu zhotovených svarů -soubor měření AZ 2

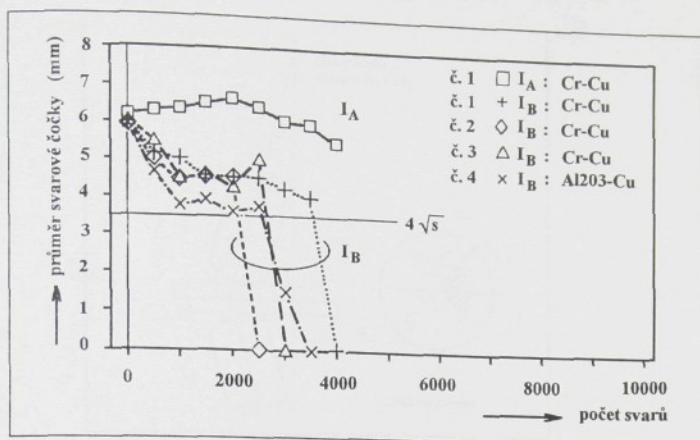


a)



b)

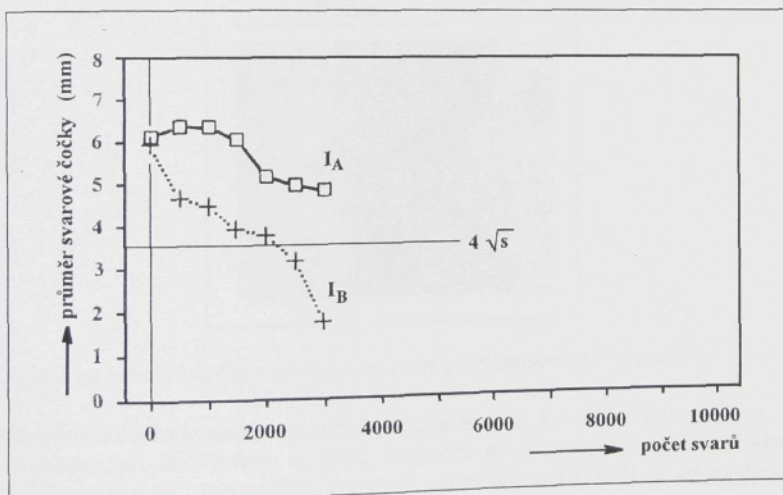
Obr. 20 Závislosti rozměru svarů (a) a únosnosti svarů (b) na počtu zhotovených svarů
- soubor měření AZ 4



Obr. 4.21 Výsledky zkoušek životnosti elektrod s vypouklou pracovní částí ($\varnothing 6$, R40)

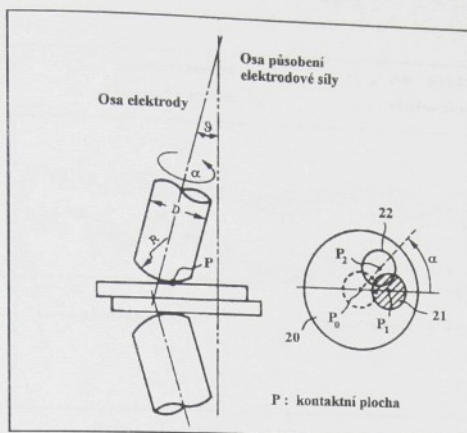
Životnost elektrod stanovená za podmínek svařovacího proudu I_B se pohybuje v rozmezí 2000 - 3500 svarů s průměrem 2500 svarů. Je zajímavé, že se životnost elektrody z disperzně zpevněného materiálu ve srovnání s klasickým materiálem Cu-Cr prakticky neliší.

Na obr. 4.22 je výsledek zkoušky životnosti elektrody z materiálu Cu-Cr se sférickou pracovní částí (15R). Aproximaci stanovená životnost odpovídá hodnotě 2000 svarů.



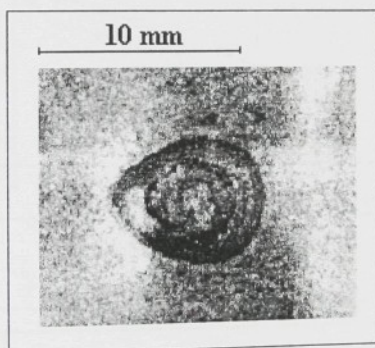
Obr. 4.22 Výsledek zkoušky životnosti elektrody se sférickou částí (15R)

Princip použití tzv. rotující elektrody je zřejmý z obr. 4.23. Elektrody se sférickou pracovní částí jsou směru kolmého na povrch plechu odkloněny o úhel ϑ a vždy po zhotovení určitého počtu svarů jsou pootočený kolem své osy o úhel α . Úhel α je určen tak, aby se po pootočení částečně překrývaly původní a nová kontaktní plocha elektrody a plechu.



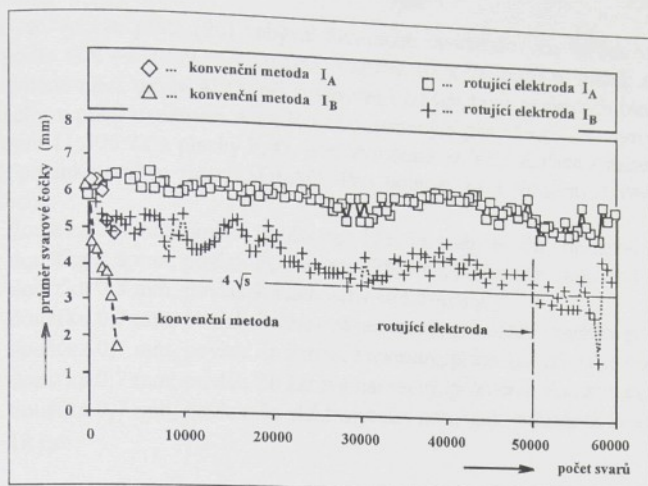
Obr. 4.23 Princip svařování s rotující elektrodou

Tento proces se stále opakuje a udržují se tak podmínky pro tzv. samočisticí proces na pracovní ploše elektrod. Vytvářené kontaktní plochy i vlastní svary mají tvar květního listku, tak jak je zřejmé z obr. 4.24, kde je pohled na svar po provedení odlupovací zkoušky u vzorku svařeného po zhotovení 50 000 svarů.

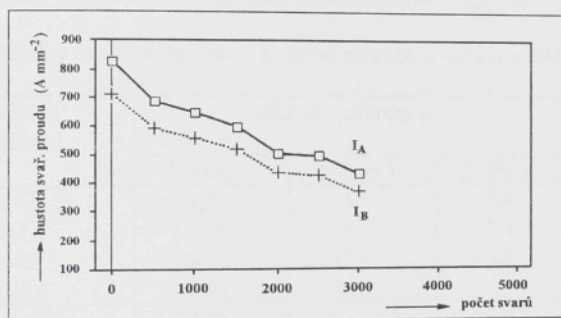


Obr. 4.24 Tvar svarové čochky a okolní zóny svaru po zhotovení 50000 svarů

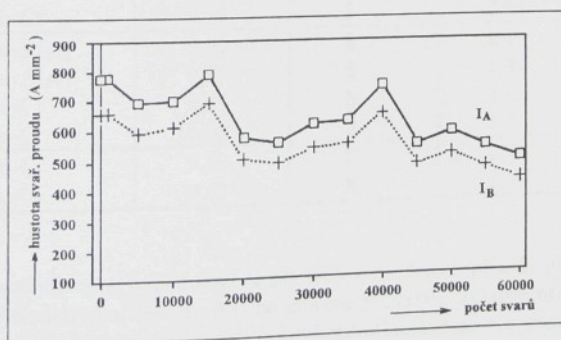
Vlastní svarová čochka je méně oválná než okolní zóna. Na obr. 4.25 je porovnání výsledků zkoušek životnosti při konvenčním způsobu svařování a při svařování rotující elektrodou (vychýlení elektrod $\vartheta = 10^\circ$, úhel pootáčení $\alpha = 60^\circ$, pootáčení se provádělo vždy po zhotovení 100 svarů). Zkoušky životnosti jsou provedeny elektrodami se sférickou pracovní částí (15R). Z porovnání výsledků obou postupů svařování vyplývá, že s rotující elektrodou se dosahuje 20-ti až 25-ti násobné zvýšení životnosti elektrod. Podstata tohoto významného úspěchu spočívá v tom, že se u rotující elektrody se zvětšujícím se počtem svařených bodů mnohem pomaleji zvětšuje kontaktní plocha elektrody a plechu. Podstatně déle se tím intenzita svařovacího proudu udržuje na dostatečně vysoké úrovni. Průběhy změn intenzit svařovacího proudu v obou provedených testech podle obr. 4.25 jsou na obr. 4.26.



Obr. 4.25 Porovnání výsledků zkoušky životnosti elektrod při konvenčním svařování a s použitím rotující elektrody



a)



b)

Obr. 4.26 Průběhy závislosti intenzity svařovacího proudu na počtu zhotovených svarů
a) konvenční způsob svařování, b) svařování rotující elektrodou

MATEJEC se ve své práci [96] zabýval životností elektrodových špiček vyrobených ze slitiny Cu-Cr podle ON 42 3039.71 (typ 033, rozměr 16 x 20 mm) a špiček stejného tvaru z disperzně zpevněné mědi oxidy Al_2O_3 při svařování různých typů ocelových plechů s povlakem na bázi Zn. Plechy v práci označené A až E s oboustranným povlakem jsou vyrobené ve VSŽ Košice z materiálu 11 305.21 a plechy F, G, jsou vyrobené ve VSŽ Košice z materiálu KHE 21 a oboustranně pozinkované u firmy SOLAC. Pro úplnost jsou uvedeny i další specifikace jednotlivých plechů:

- A - tloušťka 0,8 mm, povlak Fe-Zn, cca 17% Fe a zbytek Zn, množství 100 g.m⁻²
- B - tloušťka 0,8 mm, povlak Fe-Zn, cca 27% Fe a zbytek Zn, množství 100 g.m⁻²
- C - tloušťka 0,8 mm, povlak Zn nanesený elektrolyticky
- D - tloušťka 0,7 mm, povlak Zn žárově nanesený, průměrná tloušťka povlaku 25 μm
- E - tloušťka 0,7 mm, povlak Zn žárově nanesený, průměrná tloušťka povlaku 15 μm
- F - tloušťka 0,7 mm, povlak Zn žárově nanesený, průměrná tloušťka povlaku 14 μm
- G - tloušťka 0,7 mm, povlak Zn elektrolyticky nanesený, průměrná tloušťka povlaku 12 μm.

V tabulce č. 4.3 je výběr výsledků zkoušek životnosti elektrod provedených na stabilní bodové svařečce BP 40.12. Kvalita svarů se hodnotila vždy po svaření 100 svarů na vzorku se 6 svary odlupovací zkouškou. Životnost elektrod byla stanovena podle [47]. Kadence svařování byla 50 svarů za minutu a používalo se nepřímé chlazení elektrod v množství 7 l.min⁻¹.

Tabulka č. 4.3 Výsledky zkoušek životnosti elektrod na stabilní bodové svařečce

Typ plechu	materiál elektrod	svařovací parametry			počet svarů
		I _s (kA)	t _s (per.)	F _s (kN)	
typ C	Cu-Cr	9,89	8	2,4	800
	Cu-Cr	9,88	8	2,4	1000
	Cu-Cr	9,70	12	2,4	500
	Cu-Cr	9,54	12	2,4	500
typ B	Cu-Al ₂ O ₃	9,45	8	2,4	550
	Cu-Al ₂ O ₃	9,69	8	2,4	800
	Cu-Cr	9,30	8	2,4	600
	Cu-Cr	9,36	8	2,4	500
typ A	Cu-Al ₂ O ₃	9,90	8	2,4	750
	Cu-Al ₂ O ₃	9,96	8	2,4	700
	Cu-Cr	9,87	8	2,4	550
	Cu-Cr	10,02	8	2,4	650
typ D	Cu-Cr	9,52	8	2,4	500
	Cu-Cr	9,63	8	2,4	300

Nejnižší životnost elektrod byla dosažena při svařování žárově pozinkovaného plechu typu D. Při porovnání výsledku zkoušek pro oba hodnocené materiály elektrod nebyl zjištěn výrazný rozdíl ve stanovených hodnotách životnosti, i když materiál na bázi Cu zpevněný oxidy Al_2O_3 vykazuje podle předpokladu lepší výsledky.

V tabulce č. 4.4 jsou výsledky zkoušek životnosti pro dva vybrané typy plechů, realizované s krokovým systémem BOSCH E 81 DYD na svařovacích kleštích ARO Typ L 4251. Po svaření předem nastaveného počtu svarů došlo vždy ke zvýšení svařovacího proudu. Test byl

ukončen, pokud ani po zvýšení svařovacího proudu na hranici výstřiků nebylo po svaření dalších 100 svarů dosaženo minimálního rozměru svaru. V tabulce č. 4.4 jsou uvedeny hodnoty proudu, naměřené měřičem WPM 200 a systémem BOSCH, počet kroků zvýšení svařovacího proudu a velikost kroku. Ostatní podmínky testu životnosti jsou shodné se zkouškami na stabilní svařečce.

Tabulka č. 4.4 Výsledky zkoušek životnosti elektrod na svařovacích kleštích s krokovým systémem ($t_s = 8$ period, $F_s = 2\,400$ N)

typ plechu	materiál elektrod	svařovací proud I (kA)		krok		počet svarů
		WPM 200	BOSCH	počet	(kA)	
typ A	Cu-Al $2O_3$	9,57	9,3	8	0,2	1400
	Cu-Cr	8,97	8,8	3	0,4	600 - 700
	Cu-Cr	9,30	9,0	3	0,4	500
	Cu- Al $2O_3$	9,57	9,2	6	0,3	800
typ C	Cu-Cr	8,67	8,4	5	0,4	800
	Cu-Cr	9,18	8,9	3	0,4	600

Stanovené hodnoty životnosti elektrod jsou srovnatelné s hodnotami životnosti elektrod na stabilní bodové svařečce bez použití krokového systému především pro materiál elektrod Cu-Cr. Elektrody z mědi zpevněné oxidy Al_2O_3 jsou tvarově stálejší a umožňují vyšší počet kroků zvýšení proudu a jejich životnost je vyšší.

MATEJEC prováděl také testy životnosti elektrod s periodickým opracováním pracovní části elektrod (kromě dosedací plochy) ořezávačem RIA firmy ROTECH TOOLING AB vždy po svaření 25-ti svarů v přestávce trvající 30 s. Při svařování byla kadence 50 svarů za minutu a kvalita svarů byla vyhodnocena vždy po zhotovení 200 svarů a u porovnávacích testů bez opracování elektrod vždy po 100 svarech. Výsledky 4 testů s opracováním elektrod (č. 1 - 4) a dvou porovnávacích testů (č. 5 a 6) realizovaných opět na svařovacích kleštích s krokováním svařovacího proudu jsou v tabulce č. 4.5. Z uvedených výsledků plyne, že bez použití krokování svařovacího proudu nelze při použití nepřímého chlazení zvýšit životnost elektrod ani jejich periodickým opracováním.

Tabulka č. 4.5 Výsledky zkoušek životnosti elektrod s periodickým opracováním pracovní části (testy č. 1 - 4) a bez úpravy pracovní části (testy č. 5 a 6).

Číslo testu	Typ pokrytí	Svařovací síla (kN)	Svařovací čas (periody)	Svařovací proud (kA)	Počet svarů
1	F + F	1,8	8	7,5 - 8,6	800
2	F + F	2,2	8	8,8 - 9,7	2200
3	G + G	2,2	8	7,9 - 9,1	1600
4	G + G	2,2	8	8,0 - 8,8	1400
5	G + G	2,2	8	7,8 - 8,7	400
6	G + G	2,2	8	8,0 - 8,5	300

Na základě předchozích zkoušek životnosti elektrod a jejich výsledků realizoval MATEJEC způsob svařování s přímým chlazením čepičkových elektrod. Bez použití krokování svařovacího proudu a s využitím periodické úpravy geometrie pracovní části elektrody dosáhl s elektrodami ze slitiny Cu-Cr při svařování plechů typu G životnosti 31 200 svarů. Při testu byly použity

svařovací parametry, se kterými se u předchozích testů dosáhly nejlepší výsledky. Další podrobnosti jsou uvedeny v [96, 97].

Podle mého názoru lze při zkouškách životnosti elektrod s periodickou úpravou geometrie pracovní části očekávat výrazné zvýšení životnosti pouze v tom případě, kdy proces tvorby a současné probíhající proces rozrušování ovlivněné vrstvy na elektrodě dosáhne kvazistacionárního stavu. Tzn., že se na pracovní ploše elektrody bude během celého testu udržovat ovlivněná vrstva určité tloušťky a „kvality“ a tím i stejné podmínky průchodu svařovacího proudu.

Procesy tvorby i rozrušování ovlivněné vrstvy na elektrodě závisí samozřejmě na mnoha dílčích faktorech, ale za rozhodující lze pokládat druh a vlastnosti elektrod, svařovací parametry a teplotní procesy v pracovní části elektrod.

4.2 Praktická doporučení pro bodové odporové svařování různých typů plechů

Doc. IIW III - 1005-93 [98] specifikuje požadavky a postupy pro odporové bodové svařování nízkouhlikových ocelových plechů s povlaky i bez povlaku při svařování dvou a tři plechů s maximální jednotlivou tloušťkou 3 mm. Uváděné postupy a doporučení platí pro plechy v rozmezí tloušťek 0,4 - 3 mm a následující sortiment plechů:

- Ocelové plechy bez povlaku s chemickým složením v souladu s normou ISO 3574. Za tepla válcované oceli musejí splňovat požadavky norem ISO 3573 a ISO 4950 část 1, 2.
- Ocelové plechy žárově pokovené s povlakem na bázi Zn, nebo slitiny Fe-Zn (Galvannealed) v kvalitě podle norem ISO 3575 a ISO 4998.
- Ocelové plechy elektrolyticky pokovené s povlakem na bázi Zn nebo slitiny Zn-Ni. Plechy s povlakem Zn musí splňovat požadavky normy ISO 5002 a maximální tloušťka povlaku je 15 μm (povlak v množství 107 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) a plechy s povlakem na bázi Zn-Ni (nebo Zn-Fe) mají tloušťku povlaku limitovanou na 7 μm (množství 51 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) na každé straně plechu.
- Ocelové plechy s povlakem na bázi Pb a 10 % Sn (typ Terne) musejí odpovídat normě ISO 4999. Maximální množství povlaku je 150 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ na obou stranách plechu.
- Ocelové plechy žárově pokovené s povlaky na bázi Al + 5 až 11 % Si musejí odpovídat normě ISO 5000 a mají povlak do množství 150 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ oboustranně. Plechy s povlaky na bázi Zn a 55 % Al (typ Galvalume) mají povlak v maximálním množství 185 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ oboustranně a musejí odpovídat normě ISO 9364. Plechy s povlakem na bázi Zn a 5 % Al (Galfan) mají povlak v množství maximálně do 180 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$.

Povrchy plechů musejí být bez okují, rzi, mastnot, barev a nečistot. Nepokovené plechy válcované za tepla budou mořené. Aplikace předběžných úprav povrchu plechu (např. ochrana proti korozi) je možná za podmínek blíže specifikovaných v [98].

Před svařováním se u plechů musejí odstranit otřepy na střížných hranách, aby nebyly ovlivněny kontaktní odpory a svařovací síla. Při svařování má být vzdálenost svarů od okraje plechů (měřeno na střed svaru) alespoň 1,25.d, kde d je počáteční průměr svaru odpovídající $5\sqrt{s}$. Menší vzdálenost zapříčiní zhoršení kvality svaru. Vzdálenosti mezi svary měřeno od středu svaru nemá být menší než 16.s a doporučuje se větší. Při svařování plechů do jednotlivé tloušťky 1,5 mm má být vzdálenost mezi svary (měřeno od okrajů svarů, ne na střed) 3.d, přičemž tolerance vzdálenosti mezi středy nesmí být větší než $\pm 10\%$. Po zhotovení prvního svaru má být provedena kompenzace svařovacího proudu s ohledem na odbočování.

Materiál elektrod je volen v souladu s normou ISO 5182 a dimenzování elektrod se provádí v souladu s normami ISO 5184 (pro přímé elektrody a ISO 5830 a 5821 (pro čepičky).

Při svařování dvou plechů do tloušťky 3 mm a při použití kuželové pracovní části elektrod je počáteční rozměr pracovní části elektrody určen podle vztahu (4.3), přičemž počáteční rozměr svaru bude odpovídat stejnému vztahu.

$$d_e = 5 \sqrt{s} \quad (4.3)$$

Pokud se budou svařovat dva plechy s různou tloušťkou, potom by rozměry elektrody a počáteční velikost svaru měly být specifikovány podle tloušťky tenčího plechu. Je-li počáteční velikost svaru větší nebo menší podle vztahu $5\sqrt{s}$, potom počáteční rozměr elektrody má odpovídat tomuto určenému rozměru. Vztah (4.3) nelze aplikovat pro vypouklý tvar pracovní části elektrod a v tomto případě by parametry (elektroda - svařovací podmínky) měly být nastaveny tak, aby počáteční rozměr svaru odpovídal $5\sqrt{s}$.

V důsledku opotřebování elektrod dochází ke zvětšování pracovní plochy elektrody. Průměr alespoň jednoho z konců elektrod nesmí vzrůst nad hodnotu, která má během výroby za následek pokles rozměru svaru o 30 %. To odpovídá zvětšení rozměru pracovní části elektrody na 1,3 d_e. Pokud je tohoto stavu dosaženo musí být elektroda znovu opracována či vyměněna (jedná se o kritérium životnosti elektrod). Jsou-li elektrody různého průměru, pak se uvedený postup aplikuje na menší z nich. Větší nárůst průměru konce elektrody je přípustný pouze po ověření, že tento nárůst nepovede k poklesu pevnosti svaru pod požadované hodnoty a to vždy pouze po dohodě dodavatele a odběratele. V případě, že vliv opotřebení elektrod je kompenzován automatickým nárůstem svařovacího proudu (tzv. stepper), může být nárůst rozměru konce elektrod větší. Přijatelné zvětšení rozměru může být určeno empiricky tak, aby rozměr svarů nepoklesl pod hodnotu $5\sqrt{s}$, pokud není dohodou stanoveno jinak.

Značnou pozornost je nutno věnovat chlazení elektrod. Rozměry chladicích kanálů a přírodní trubky jsou předmětem norem ISO 5184, ISO 5830 a ISO 5821. Je doporučován průtok vody minimálně 4 l.min⁻¹ při svařování plechů až do tloušťky 3 mm včetně.

Při svařování plechů s povlaky má být průtok vody větší. Teplota vody na vstupu nemá být větší než 20 °C a na výstupu větší než 30 °C. Chlazení elektrického systému stroje má být odděleno od chlazení elektrod. Je vhodné oddělit i systém chlazení spodní a horní elektrody.

Hodnocení kvality svaru by mělo být provedeno pro každý svařovací stroj, tloušťku a druh materiálu a jejich kombinace v souladu s přílohou D [98]. Hodnocení kvality svarů je založeno na provedení následujících testů:

- zkouška svařitelnosti
- procedurální kvalifikační testy
- pravidelné testy

Zkouška svařitelnosti je zaměřena na určení smyček svařitelnosti, tj. stanovení vhodných svařovacích parametrů. Tento postup může být použit i pro určení vhodnosti určitého svařovacího stroje pro danou součást. Pro určení rozsahu vhodných svařovacích podmínek může být v některých případech nutné determinovat konzistenci kvality svarů či životnost elektrod.

V tabulkách 4.6 až 4.9 jsou základní doporučené svařovací parametry pro ocelové plechy bez povlaku a plechy s různými typy povlaků. Tyto podmínky je nutno korigovat v závislosti na typu svařovacího stroje, dynamických vlastnostech stroje, charakteristice pneumatického systému, charakteristice sekundárního okruhu a tvaru a materiálu elektrod. Uvedené podmínky jsou aplikovatelné pro kuželové elektrody z materiálu A 2/2 podle ISO 5182.

Tabulka 4.6 Doporučené svařovací parametry pro bodové svařování nízkouhlikových ocelových plechů tl. 0,4 - 3 mm

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

Tabulka 4.7 Doporučené svařovací parametry pro ocelové plechy s povlakem zinku - tloušťka plechů 0,4 - 3 mm

Tloušťka plechu		Průměr pracovní části elektrody (mm)	Svařovací parametry					
nad (mm)	až do včetně (mm)		Žárově pozinkovaný plech			Elektrolyticky pozink. plech		
			F _s (kN)	t _s (per.)	I _c (kA)	F _s (kN)	t _s (per.)	I _s (kA)
0,4	0,6	4	1,5-2,0	6-8	7-9	1,5-2,0	6-8	6-8
0,6	0,8	4	1,9-2,2	8-10	8-10	1,9-2,2	8-10	7-9
0,8	1,0	5	2,2-2,9	9-12	9-11	2,2-2,9	9-12	8-10
1,0	1,2	5	2,8-3,6	10-13	10-13	2,8-3,6	10-13	9-13
1,2	1,6	6	3,4-4,5	11-15	14-16	3,4-4,5	11-15	12-15
1,6	2,0	7	4,4-5,5	12-16	18-21	4,4-5,5	12-16	14-17
2,0	2,5	8	5,4-6,8	14-18	22-26	5,4-6,8	14-18	17-22
2,5	3,0	9	6,6-8,0	17-21	26-30	6,6-8,0	17-21	19-24

Poznámka: Podmínky jsou aplikovatelné pro žárově pozinkované plechy s tloušťkou povlaku 20 μm (jedna strana) a elektrolyticky pozinkované plechy s tloušťkou povlaku 7 μm (jedna strana).

Tabulka 4.8 Doporučené svařovací parametry pro ocelové plechy tloušťky 0,4 - 3 mm s oboustranným povlakem slitiny Fe-Zn a Zn-Ni

Tloušťka plechu		Průměr pracovní části elektrody (mm)	Svařovací parametry		
nad	až do včetně		F _s (kN)	t _s (per.)	I _s (kA)
(mm)	(mm)				
0,4	0,6	4	1,4-1,9	4-6	6,0-8,5
0,6	0,8	4	1,8-2,1	6-8	7,0-9,5
0,8	1,0	5	2,1-2,8	7-10	8,0-10,5
1,0	1,2	5	2,7-3,4	8-12	9,0-12,0
1,2	1,6	6	3,2-4,3	9-13	11,0-14,0
1,6	2,0	7	4,2-5,3	10-14	13,0-16,5
2,0	2,5	8	5,2-6,5	12-16	16,0-21,0
2,5	3,0	9	6,4-7,8	15-20	18,0-23,0

Poznámka: Podmínky jsou aplikovatelné pro povlaky tloušťky 5 až 15 μm (na jedné straně)

Tabulka 4.9 Doporučené svařovací podmínky pro ocelové plechy tloušťky 0,4 - 3 mm s povlakem na bázi Al

Tloušťka plechu		Průměr pracovní části elektrody (mm)	Svařovací parametry		
nad (mm)	až do včetně (mm)		F _s (kN)	I _s (per.)	I _s (kA)
0,4	0,6	4	1,5-2,0	8-10	8-10
0,6	0,8	4	1,0-2,2	10-12	9-11
0,8	1,0	5	2,2-2,9	12-14	10-12
1,0	1,2	5	2,8-3,6	14-16	11-13
1,2	1,6	6	3,4-4,5	18-22	12-15
1,6	2,0	7	4,4-5,5	22-26	14-17

Poznámka: Pro hliníkové plechy se doporučuje vrcholový úhel elektrody 90°.

Při provádění procedurálních kvalifikačních testů se vykonávají následující typy zkoušek:

- * smyková zkouška, nebo zkouška sekáčem (ručně nebo mechanicky)
- * vizuální kontrola a metalografické hodnocení

Na základě dohody smluvních stran lze volit také:

- * křížovou zkoušku
- * stanovení tvrdosti
- * rázové zkoušky nebo zkoušky únavové

Všechny zmíněné zkoušky se provádějí v souladu s požadavky norem ISO.

Pravidelné testy se provádějí pro zajištění kvality svarů v provozních podmínkách. Za tímto účelem se používá:

- ♦ vizuální kontrola
- ♦ odlupovací zkouška nebo zkouška sekáčem (ručně nebo mechanicky).

Tam, kde to lze zkoušky se provádějí u skutečných součástí. Jinak se musí zhotovit vzorky ke zkouškám ze stejného materiálu, odpovídající šířkou lemu a vzorek při svařování musí zasahovat do smyčky ramen stroje jako při svařování součástí.

Pravidelné zkoušky se musejí provádět:

- a) pokud to je možné na začátku a při každé změně směny
- b) bezprostředně před a po výměně elektrod, nebo jejich opracování
- c) vždy po provedení servisu na stroji a jakýchkoliv změnách na stroji
- d) bezprostředně při změně druhu svařované součásti a změně druhu materiálu
- e) na konci každé směny

Výrobu nelze zahájit, pokud na začátku směny není při zkouškách dosaženo uspokojivých výsledků. Pokud na konci směny při testu nevyhoví 2 % či 10 ks, musí být z produkce vyřazeny z dávky realizované po provedení předchozího testu a bude následovat test zaměřený na kvalitu svarů. Pokud taková situace nastane pokládá se celá dávka za nevyhovující.

Před provedením vizuální kontroly zóny svaru nejsou přípustné jakékoliv operace, které by mohly ovlivnit výsledek hodnocení (např. obrobení, nátěr apod.)

Počet typů zkoušek musí být smluvně stanoven tak, aby byly v každém případě získány kvantitativní výsledky.

při jednotlivých zkouškách zaměřených na hodnocení kvality svarů se provádí konfrontace výsledků se stanovenými kritérii kvalitního svaru. Jsou to:

- rozměry svaru
- způsoby porušení svaru
- pevnost svaru
- vzhled svaru

Průměr svarů pro plnou šířku lemu má odpovídat $5\sqrt{s}$ a nemá poklesnout pod $3,5\sqrt{s}$, pokud to nějaká jiná norma nepřipouští. Jestliže lem je menší než $1,25d$ musí se specifikovat i menší počáteční rozměr svaru. Svary však mají sníženou pevnost. Hloubka žádného z vtisků elektrod při svařování dvou plechů stejné tloušťky nesmí překročit 20 % tloušťky jednotlivého plechu. (podle požadavků kladených na součást se mohou stanovit přísnější podmínky).

Průnik svarové čocky do každého z plechů je 20 - 40 % tloušťky a odtlačení plechů nemá překročit 10 % tloušťky plechu. Při svařování dvou plechů s rozdílnou tloušťkou může hloubka vtisku do tenšího plechu překročit 20 % a podobně větší hloubka vtisku je přípustná i na opačné straně. Průnik svarové čocky bude nesymetrický a bude závislý na poměru tlouštěk plechů.

Všechny svary vyrobené na testovacích vzorcích a na součástech svařených z plechů do tloušťky 1,5 mm se musejí při odlupovací zkoušce a zkoušce sekáčem vytrhnout ze základního materiálu. Částečné vytržení či porušení na rozhraní plechů je akceptovatelné při dohodě zákazníka a výrobce. Takový způsob porušení smí být typický pro menší velikost svaru, pro měkké nízkouhlíkové oceli, nebo pro všechny velikosti svarů některých vysokopevnostních oceli. Velikost svaru se určuje změřením vytrženého svaru, nebo v případě porušení na rozhraní plechů změřením natavené zóny.

Únosnost svaru závisí na rozměru svaru, tloušťce plechu a mechanických vlastnostech plechu. Minimální přípustné hodnoty únosnosti jednoho bodu pro nízkouhlíkovou ocel při aplikaci zkoušky smykem jsou v tabulce 4.10.

V tabulce jsou uvedeny hodnoty únosnosti svaru vztahené na rozměry svaru odpovídající nominálním hodnotám $3,5\sqrt{s}$, $4\sqrt{s}$, $5\sqrt{s}$ a $6\sqrt{s}$. Pro oceli s vyšší pevností lze stanovit minimální hodnotu únosnosti ve smyslu pro danou velikost ze vztahu (4.4), kde s značí tloušťku plechu, d rozměr svaru a R_m pevnost základního materiálu v tahu. Uvedené hodnoty lze použít pro pevnostní výpočty. V praxi jsou všeobecně dosahovány vyšší hodnoty únosnosti.

$$P_s = 2,6 s d R_m \quad (4.4)$$

Tab. 4.10 Minimální hodnoty únosnosti svaru při zkoušce smykem pro nízkouhlíkové oceli

Tloušťka plechu (mm)	Nominal $\sim 3,5\sqrt{s}$		Nominal $\sim 4\sqrt{s}$		Nominal $\sim 5\sqrt{s}$		Nominal $\sim 6\sqrt{s}$	
	d_{sv} (mm)	minimální únosnost (kN)	d_{sv} (mm)	minimální únosnost (kN)	d_{sv} (mm)	minimální únosnost (kN)	d_{sv} (mm)	minimální únosnost (kN)
0,6	2,7	1,3	3,1	1,6	3,9	2,0	4,6	2,3
0,8	3,1	2,3	3,6	3,0	4,5	3,6	5,4	4,2
1,0	3,5	3,2	4,0	3,7	5,0	4,3	6,0	5,1
1,2	3,8	4,1	4,4	4,6	5,5	5,4	6,6	6,2
1,6	4,4	5,5	5,1	6,0	6,3	7,4	7,6	8,3
2,0	5,0	7,2	5,7	8,4	7,1	10,8	8,5	13,5
2,5	5,5	10,6	6,3	11,8	7,9	14,5	9,5	17,3
3,0	6,0	12,0	6,9	14,0	8,66	17,8	10,4	22,0

Při posuzování vzhledu svaru se posuzuje stav povrchu a deformace dílu. Povrch svaru má být bez jakýchkoliv trhlin a pórů. Při svařování plechů s povlaky se za nepřipustné pokládá těžké nalepování elektrod. Nepřijatelné jsou také výstřiky z povrchu plechu. Z hlediska deformací je svaz nepřijatelný pokud je rovina rozhraní v místě svaru vychýlena od roviny povrchu plechu o více než 30 %.

U řadových svarových spojů musí u jednotlivých bodů ležet v toleranci $\pm 10^\circ$ předepsané rozteče. Pokud se svary zhotovují ručně kleštěmi, potom rozteč svarů nesmí být větší o více než 30 %. U mnohobodového svařování a svařování na robotech nepřesáhne vzdálenost mezi sousedními svary průměrnou rozteč o více než 10 až 30 % při zajištění, že rozteč nepadne pod minimální specifikovanou hodnotu.

Některé svary mohou být z konstrukčního hlediska označeny jako kritické a potom musejí v plném rozsahu vyhovět požadavkům na kvalitu. U ostatních tzv. nekritických svarů jsou přípustné odchylky, ale pouze s ohledem na umístění a vzhled svarů. Požadavky na takové spoje se stanovují dohodou.

Všechny koncové svary v řadách by měly být umístěny ve vzdálenosti minimálně 10 mm a maximálně 17 mm od okraje plechu. Rohové svary se považují za koncové a za roh se pokládá jakákoliv změna vychýlení řady o více než 30° . Za koncové se pokládají svary na straně přerušení řady, ve spojení lemů nebo jedné součásti s druhou. Všechny koncové svary musejí vyhovovat plně požadavkům na kvalitu.

Obecně řečeno techniky mnohobodového svařování a svařování na robotech vyžadují větší volnost v roztečích svarů a vzdálenosti elektrod. Přípustné tolerance v umístění jednotlivého svaru od určeného místa nemají při mnohobodovém svařování překročit 10 % a u svařování na robotech 30 %. V obou případech by úhel odklonu elektrod od vertikály neměl být větší než 10° . Vychýlení elektrod vede k vytváření eliptických svarových čoček a s rostoucím úhlem vychýlení se snižuje životnost elektrod.

4.3 Současný stav a předpokládané tendence použití metod spojování ocelových plechů s povlaky

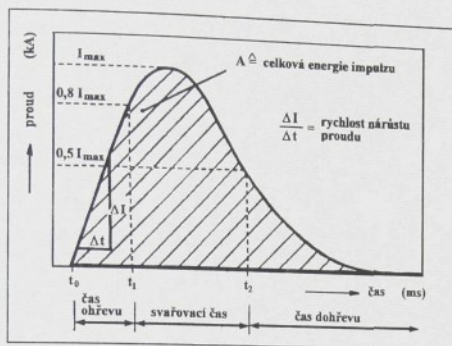
V úvodu bylo naznačeno, že značná část produkce ocelových plechů s povlaky (především s povlaky na bázi zinku) je určena pro zpracování v automobilovém průmyslu, kde pro spojování plechů je typická aplikace technologie bodového eventuelně švového odporového svařování. Specifické metalurgické podmínky tvorby svarů a s tím spojená nízká životnost elektrod vede zpracovatele plechů k řešení problémů vznikajících při svařování, ale také k hledání alternativních metod spojování plechů. Na problémy se zpracováním plechů s povlaky reagují samozřejmě i jejich výrobci vývojem a aplikací nových typů povlaků.

Současný stav teoretických a praktických poznatků a úroveň technických prostředků umožnil při výrobě karoserií plně nasazení ocelových plechů s povlaky. Vzhledem k vysokému stupni automatizace a robotizace výrobních linek je přijatelná kvalita svarových spojů zajišťována především následujícími postupy:

- svařováním s periodickou úpravou pracovních částí elektrod
- aplikací monitorovacích a řídicích systémů, především pak tzv. „timerů“.

Principiální vyřešení specifických metalurgických problémů svařovacího procesu by však vyžadovalo snížit teplotu na rozhraní elektroda - plech pod teplotu tání povlaku, nebo najít elektrodový materiál dlouhodobě odolný metalurgickému působení roztaveného kovu z povlaků. Taková řešení nelze u klasické technologie bodového odporového svařování podle současného stavu poznání očekávat.

K nežádoucímu natavení a rozsáhlému poškození povlaku v místě dosedu elektrod nedochází u impulzního svařování. Tento postup je označován také jako ultrapulzní svařování, či High-Speed Pulse Welding v [99]. Svarový spoj se vytváří extrémně vysokým svařovacím proudem získaným vybitím baterie kondenzátorů přes impulzní transformátor. Svařovací časy jsou velmi krátké, obvykle do 10 ms. Technologie impulzního svařování je vhodná především pro výstupkové svary. Časový průběh svařovacího proudu s vyznačením charakteristických období svařovacího procesu je na obr. 4.27.



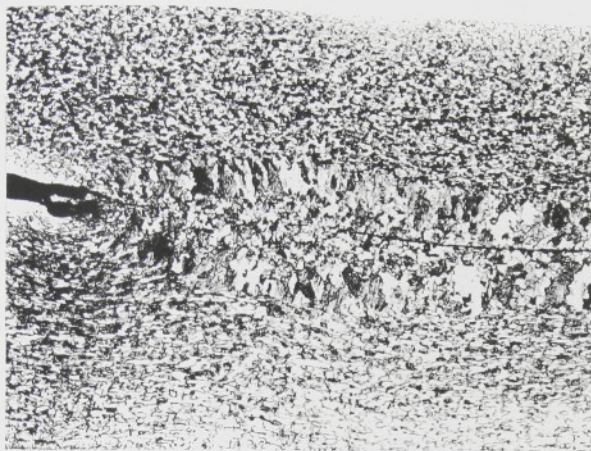
Obr. 4.27 Časový průběh svařovacího proudu u impulzního svařování

Za vlastní svařovací čas se pokládá období od dosažení 80 % hodnoty maximálního proudu do poklesu proudu na 50 % hodnoty maximálního proudu. Při svařování dojde sice k natavení svarových ploch, ale nevytváří se typická natavená oblast jako u klasického bodového švového či výstupkového svařování. Svarový spoj má především difúzní charakter a pro míšení obou základních materiálů je minimální. Podle údajů firmy HAGENUG GmbH lze uvést následující základní charakteristiky procesu:

- do místa spoje je přivedeno pouze nezbytné množství energie
- velmi úzká, teplem ovlivněná zóna základního materiálu (lze svařovat i materiály po konečném tepelném zpracování)
- svarové deformace jsou bezvýznamné a součásti lze svařovat bez dalšího opracování
- elektrody není potřebné chladit
- není nutné odmaštění svařovaných dílů
- lze svařovat díly z materiálů s vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí (Ag, Cu).
- lze svařovat díly s výrazným rozdílem tloušťky (poměr tlouštěk až 1:500)
- vysoká reprodukovatelnost výsledků (nabíjecí napětí kondenzátorové baterie je elektronickým řízením regulováno s přesností 1%)
- nízký rozptyl výsledků kvality svarů
- svar má jemnozrnnou krystalizaci a vysokou pevnost
- svary lze uplatnit i na kritických pevnostních místech
- při svařování plechů s povlaky nedochází k poškození povlaku a elektrody nejsou metalurgicky ovlivňované
- životnost elektrod při svařování plechů bez povlaků je asi 2 až 3 násobná a u plechů s povlaky mnohonásobně vyšší
- nižší spotřeba energie pro svařování
- vyšší náklady na pořízení svařovacího stroje jsou sníženy spotřebou energií kompenzovány během 1,5 roku až 2 let
- nižší nároky na připojovací výkony a rovnoměrnější zatížení sítě

- minimální nepříznivý vliv na životní prostředí
- jednoduchá obsluha a snadné nastavení svařovacích parametrů

Na obr. 4.28 je snímek struktury části ultrapulzního svaru žárově pozinkovaných ocelových plechů.



Nital 3%

50 x

Obr. 4.28 Struktura ultrapulzního svaru

V rovině styku plechů zůstala obohacená vrstva o zinek z povlaku, která se při přípravě výbrusu odleptala. V části svaru je původní rozhraní plechů nerozeznatelné a toto místo odpovídá kvalitně provedenému spoji. Na snímku je vidět i rozsah tepelného ovlivnění základního materiálu. Charakter svaru je difúzní, což dosvědčuje i snímek struktury z okraje svaru provedený při větším zvětšení na obr. 4.29.

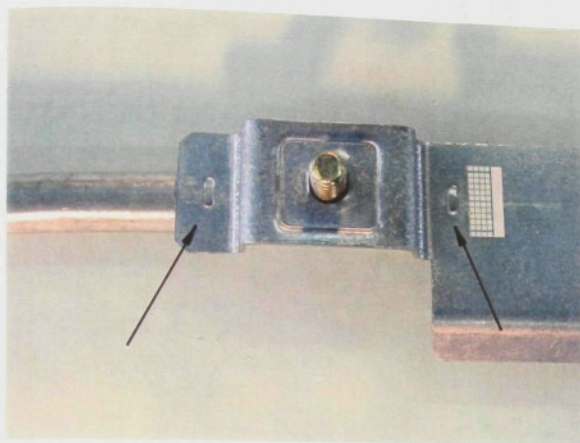


Nital 3%

200 x

Obr. 4.29 Okraj ultrapulzního svaru.

V kvalitní části svaru jsou vytvořena společná zrna, která jsou hrubší než u výchozí struktury základního materiálu. Roztavený kov z povlaku je vytlačen mimo spoj, nebo došlo k jeho částečnému odpaření. Na obr. 4.30 je snímek spoje, ze kterého byl metalografický výbrus připraven. Z obrázku lze částečně posoudit i stav povrchu plechu v místě svarového spoje.

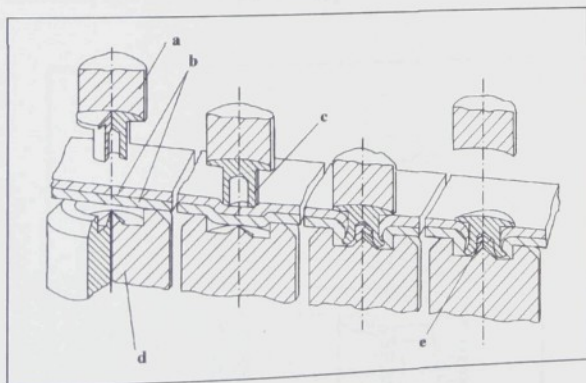


Obr. 4.30 Detail součásti s ultrapulzními svari

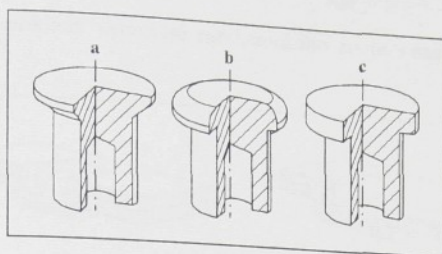
K velmi perspektivním metodám spojování tenkých plechů, a to nejenom v automobilovém průmyslu, patří různé postupy vytváření mechanických spojů lisováním [100, 101, 102, 103]. Tyto metody lze v zásadě rozlišovat podle dvou hledisek:

- = aplikace spojovacích elementů: ano či ne
- = aplikace nástřihu spojovaných materiálů: ano či ne

Na obr. 4.31 je postup vytváření spoje s využitím tzv. polovičního dutého nýtu. Postup nevyžaduje přípravu otvoru pro nýt. Nýtuje se do plného materiálu, přičemž tvar hlavy nýtu může být různý - obr. 4.32.

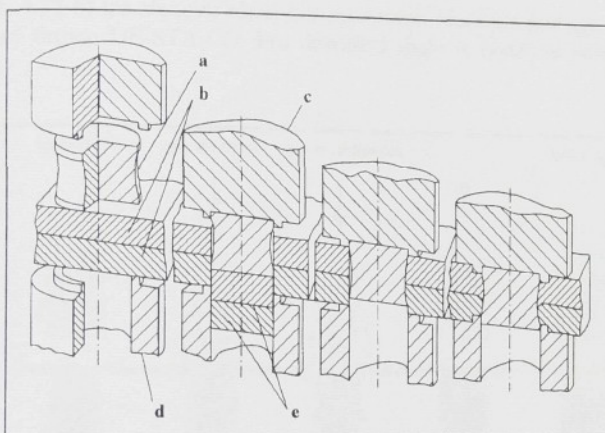


Obr. 4.31 Nýtování lisováním s použitím polovičního dutého nýtu a) lisovník, b) spojované díly, c) nýt, d) matrice, e) konečný tvar nýtu [103]

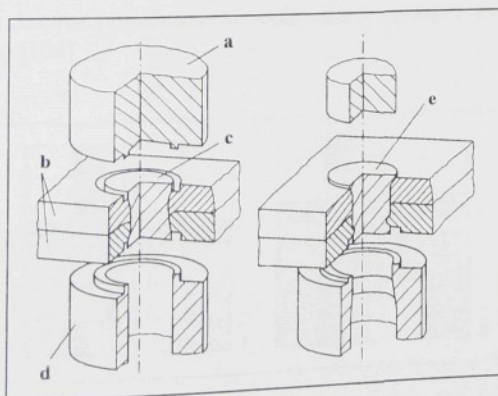


Obr. 4.32 Různé tvary hlavy nýtů [103]

Na obr. 4.33 je postup nýtování plným nýtem, který zároveň slouží pro vystřížení otvoru do spojovaných plechů..

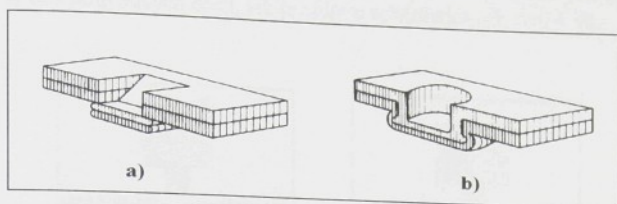


Obr. 4.33 Nýtování lisováním plným nýtem: a) plný nýt, b) spojované díly, c) lisovník, d) lisovnice, e) vystřížený plech [103]



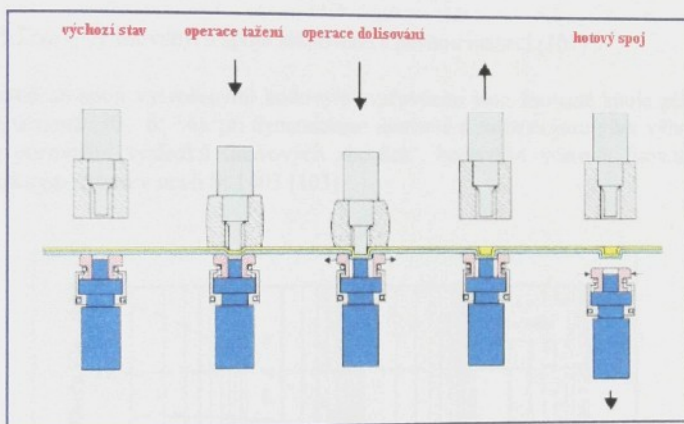
Obr. 4.34 Různé tvary plných nýtů: a) lisovník, b) plechy, c) nýt, d) lisovnice [103]

Na obr. 4.35 jsou příklady vytvoření mechanického spoje s nastřížením a bez nastřížení spojovaných materiálů.

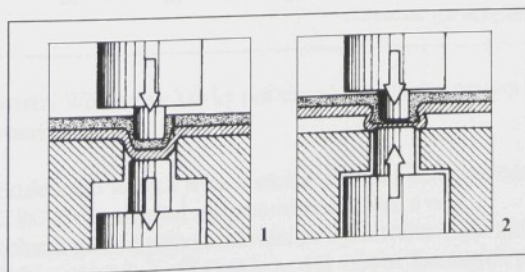


Obr. 4.35 Různá provedení mechanického spoje lisováním
a) s nastřížením spojovaných plechů
b) bez nastřížení spojovaných plechů

Spoje podle obr. 4.35 b) lze zhotovit různě koncipovanými nástroji a postupy. Na obr. 4.36 je postup používaný firmou DE-STA-CO. Pro dotváření spoje se používají pohyblivé segmenty lisovací matrice.

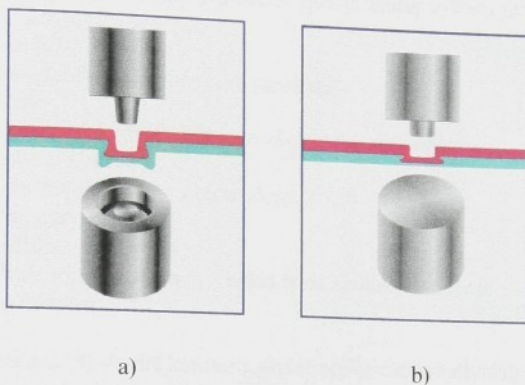


Obr. 4.36 Princip zhotovení prolisovaného spoje (nástroj s pohyblivými segmenty lisovací matrice) [104]



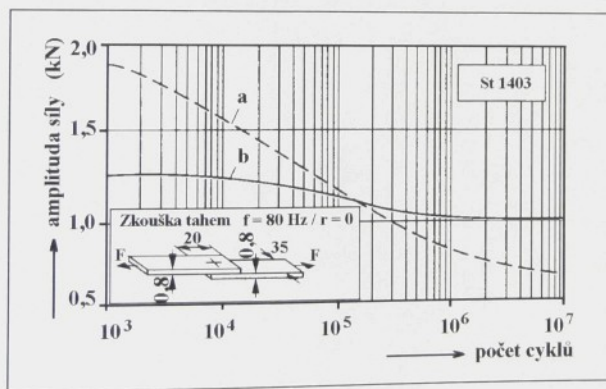
Obr. 4.37 Postup zhotovení lisovaného spoje s využitím dvou lisovníků

Firma Böllhoff & Co. používá postup zřejmý z obr. 4.37. Spoj je vytvářen ve dvou fázích s využitím řízeného pohybu dvou lisovníků. Firma TOX GmbH používá pro zhotovení spojů pevné matrice - tj. bez pohyblivých částí, jak je vidět u schématických obr. 4.38.



Obr. 4.38 Dva typy lisovaných spojů zhotovené s pevnou matricí [105]

Ve srovnání se spoji vytvořenými bodovým svařováním jsou lisované spoje při statickém zatížení méně únosné (30 - 65 %), při dynamickém únavovém zatížení jsou však výhodnější. Na obr. 4.39 je porovnání výsledků únavových zkoušek bodového svaru a lisovaného spoje s polovičním dutým nýtem v oceli St 1403 [103].



Obr. 4.39 Porovnání Wöhlerovy křivky pro vzorek s bodovým svarem (a) a vzorek s lisovým spojem

Schéma provedení zkušební vzorku je na obrázku. Zkouška byla provedena míjivým tahovým zatížením s frekvencí 80 Hz (součinitel nerovnoměrnosti cyklu $r = 0$).

Ve srovnání s technologií bodového svařování jsou pro technologie výroby lisovaných spojů charakteristické nižší investiční i výrobní náklady. Při výrobě lisovaných spojů také nevznikají žádné zdraví škodlivé zplodiny.

Pro spojování tenkých plechů existuje samozřejmě celá řada aplikovatelných technologií (např. klasické mechanické spojování, spoje šroubové, nýtové, pájené, lepené a svarové spoje). V této části práce však byly stručně popsány pouze technologie spojování, které se při stavbě karosérií mohou vhodně doplňovat s technologií bodového odporového svařování.

Při výběru nejvhodnější technologie pro určitý spoj je nutno vzít do úvahy a posoudit více dílčích faktorů:

- vnější vzhled spoje
- pevnostní kritéria (statické i dynamické namáhání)
- korozní odolnost
- charakter a rozměr struktury a vlastností základního materiálu
- reprodukovatelnost výsledků
- možnost kombinované aplikace s technologií lepení
- dodatečné nutné operace
- ekologická hlediska
- investiční náklady, výrobní náklady - náklady na zhotovení 1 spoje
- energetickou náročnost

Všeobecně se očekává při stavbě karosérií nárůst aplikací alternativních metod spojování na úkor klasické technologie bodového odporového svařování. Nejedná se však o náhradu této technologie, ale pouze o optimální uplatnění jednotlivých technologií s cílem zajistit co nejvyšší kvalitu a co nejnižší výrobní náklady. To platí jak pro výrobu karosérií z ocelových plechů s povlaky, tak pro karosérie hliníkové, resp. ze slitin hliníku.

5. ZÁVĚR

Předkládaná habilitační práce nabízí na základě širokého literárního průzkumu široké odborné veřejnosti běžně nedostupných podkladů a s využitím výsledků odborné činnosti autora ucelený pohled na problematiku bodového odporového svařování tenkých ocelových plechů s kovovými povlaky. Hlavním cílem práce je shrnout současný stav teoretických poznatků, posoudit možnosti matematického popisu a řešení složitých dějů tohoto svařovacího procesu, ale také poskytnout praktické výsledky a doporučení vhodná při zavádění technologie bodového odporového svařování plechů s povlaky do výrobní praxe.

Reálné podmínky vzniku bodového odporového svaru a dějů probíhajících na pracovních plochách elektrod jsou u plechů s povlaky podstatně složitější než při svařování „černých“ ocelových plechů. Pokud chce uživatel technologie odporového bodového svařování realizovat produkci schopnou konkurence, musí vyřešit následující základní otázky:

- **stanovit kvantitativní ukazatele kvality svarových spojů a vypracovat nebo zvolit vhodné metodické postupy pro jejich určení, (kap. 3.2)**
- **v souvislosti s předchozím bodem definovat pojem životnosti elektrod a stanovit vhodné metodické postupy pro její určení, (kap. 3.4)**
- **technologicky a technicky zajistit výrobu svarů ve smluvně stanoveném rozmezí kvality, které respektuje stochastický charakter svařovacího procesu, (kap. 4.2 a práce [54]).**

Studiu těchto otázek je na řešitelském pracovišti dlouhodobě věnována pozornost. Lze konstatovat, že využívané metodické postupy hodnocení kvality svaru a stanovení životnosti elektrod při svařování plechů s povlaky na bázi slitin Al-Si a Al-Zn-Si se plně osvědčily při porovnávacích testech elektrod i při studiu souvislosti mezi kvalitou svarů a časovými průběhy elektrických veličin svařovacího procesu [54, 58]. Předpokladem pro účelné a objektivní řešení těchto otázek je znalost vlivu metalurgických podmínek vzniku svarů a dílčích faktorů svařovacího procesu na výslednou kvalitu svaru. Stejně tak důležitá je i znalost vlivu metalurgických dějů probíhajících na pracovních plochách elektrod v průběhu svařovacího cyklu na mechanismus jejich opotřebování. Na základě v práci uvedených rozborů je zřejmé, že nezbytná teoretická a experimentální analýza mechanismu opotřebování elektrod při svařování plechů s povlaky není zatím v dostatečné míře provedena, a to nejenom ve vztahu k aplikaci numerických simulací při řešení specifických podmínek svařování plechů s povlaky.

Odporové bodové svařování plechů s povlaky přináší dva základní, vzájemně související problémy:

- **nežádoucí poškození povlaku a tím i snížení jeho ochranné funkce**
- **nízkou životnost elektrod, pokud ji budeme chápat jako počet zhotovitelných svarů se stanovenými kritérii kvality a to bez úprav svařovacích parametrů či jiných zásahů do svařovacího procesu, (kap. 4.1).**

Oba problémy vznikají především jako důsledek natavení povlaku v průběhu svařovacího procesu. Porovnáme-li pracovní teploty na kontaktních plochách elektrod a teploty tání běžně používaných typů povlaků nelze odstranění těchto fenoménů prozatím očekávat. To však neznamená, že se s tímto stavem musí technická praxe pasivně smířit.

6. LITERATURA

- [1] MOHELSKÝ, F.: Plechy v současných a nových modelech osobních vozů ŠKODA. In: Plechy pre automobilový priemysel. Slovensko - Stará Lesná, VSŽ Oceľ, spol. s r.o., Výskumný a skúšobný ústav Košice, 1997, s. 5/1-5/11.
- [2] BILLY, J. - SLÁVIK, P. - MIKOLAJ, L. - HALA, K. - ZÁBOJ, J.: Žiarovo pozinkované plechy z produkcie VSŽ pre automobilový priemysel. In: Plechy pre automobilový priemysel. Slovensko - Stará Lesná, VSŽ Oceľ, spol. s r.o., Výskumný a skúšobný ústav Košice, 1997, s. 19/1-19/8.
- [3] STEGEMANN, T. - JARONI, U. - MERTENS, A. - PRANGE, W. - WONNEBERGER, I.: Entwicklungen beim Tailored Blanking. /Doplňkový referát/. In: Plechy pre automobilový priemysel. Slovensko - Stará Lesná, VSŽ Oceľ, spol. s r.o., Výskumný a skúšobný ústav Košice, 1997, s. 1 - 16.
- [4] BUCHAR, Z. - NEUMANN, H. - MRŇA, L.: Tváriteľnosť svařovaných nástřihů z materiálu KOHAL 220 IZ. In: Plechy pre automobilový priemysel. Slovensko - Stará Lesná, VSŽ Oceľ, spol. s r.o., Výskumný a skúšobný ústav Košice, 1997, s. 16/1 - 16/7.
- [5] BUCHAR, Z. - NEUMANN, H.: Tvárné vlastnosti svařovaných nástřihů. In: XI. Vědecké sympóziu. Sborník, Technická univerzita v Liberci, 1997, s. 37 - 40.
- [6] BUCHAR, Z. - NEUMANN, H. - MRŇA, L.: Hodnocení tvárnosti svařovaných nástřihů pro stavbu karosérii. In: Moderní technologie pro spojování tenkých plechů. Praha, ČS VZP a Evropská výzkumná společnost pro zpracování plechů, 1997, s. 63 - 71.
- [7] JANOTA, M.: Procesy a riadenie odporového zvarovania. Bratislava, VÚZ 1985, 317 s.
- [8] NIKOLAJEV, G. A. - OLŠANSKIJ, N. A.: Specialnye metody svarki. Moskva, Mašinostroenie 1975, 230 s.
- [9] PLÍVA, L.: Odporové svařování. 1. vydání, Praha, SNTL 1975, 265 s.
- [10] JANOTA, M. Podobnosť procesov odporového zvarovania. /Habilitačná práca/. Bratislava 1992. 98 s. STU, Materiálovo - technologická fakulta Trnava.
- [11] HAVALDA, A.: Tepelná kinetika pri zvaraní elektrickým oblúkom. Bratislava - Praha, SVTL - SNTL 1960, 201 s.
- [12] FIALA, J. - BEBR, A. - MATOŠKA, Z.: Strojnické tabulky 1. Materiály pro strojírenskou výrobu. Praha, SNTL 1987, 877 s.
- [13] SERVÍT, R. - DRAHOŇOVSKÝ, Z. - ŠEJNOHA, J. - KUFNER, V.: Teorie pružnosti a plasticity II. Praha, SNTL 1984, 421 s.
- [14] RADAJ, D.: Finit - Element - Berechnung von Temperaturfeld, Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen. Schweißen und Schneiden, 1988, č. 6, s. 269 - 276.

- [15] YAMAMOTO, T. - OKUDA, T.: A study of spot welding of heavy gage mild steel. Doc. IIW III-389-70.
- [16] GREENWOOD, J. A.: Temperatures in spot welding. British Welding Journal, 8, 1961, č. 6, s. 316 - 322.
- [17] ZAJAC, J. - JANOTA, M.: Jednoduchý numerický model teplotného poľa při bodovom zváraní. Zváranie XXV, 1976, č. 11, s. 311 - 314.
- [18] SCHWAB, R.: Ein Rechnerprogramm zur numerischen Temperaturfeldberechnung beim Widerstandsschweißen unter besonderer Berücksichtigung von Transformatorkennlinie, Stromflußverteilung und thermoelektrischen Effekten. Schweißen und Schneiden, 38, 1986, č. 1, s. 22 - 25.
- [19] SCHWAB, R.: Numerische Berechnung von Temperaturen beim Widerstandsschweißen am Beispiel des Kollektorschweißens. Schweißen und Schneiden, 38, č. 8, s. 365 - 367.
- [20] GREITMANN, J. - KESSLER, A.: Qualitätssicherung durch Prozeßanalyse beim Widerstandspunktschweißen von Aluminium. Schweißen und Schneiden, 48, 1996, č. 1, s. 11 - 17.
- [21] BROWNE, D. J. - CHANDLER, H. W. - EVANS, J. T. - WEN, J.: Computer Simulation of Resistance Spot Welding in Aluminium. Welding Journal, č. 10, s. 339 - 344, č. 12, s. 417 - 422.
- [22] HEHL, D. - MAILE, K. - ROSS, E. - WIJARANAKULA, W.: Einflüsse auf die Temperaturverteilung und deren Berechnung beim Widerstandspunktschweißen von Aluminiumblechen mit Wechsel und Gleichstrom. Schweißen und Schneiden, 36, 1984, č. 2, s. 64 - 67.
- [23] SCHRÖDER, R. - MACHERAUCH, E.: Berechnung der Wärme und Eigenspannungen bei Widerstandspunktverbindungen unter Zugrundelegung unterschiedlicher mechanisch-thermischer Werkstoffdaten. Schweißen und Schneiden, 35, 1983, č. 6, s. 270 - 276.
- [24] NA, S. J. - PARK, W. S.: A Theoretical Study on Electrical and Thermal Response in Resistance Spot Welding. Welding Journal, 1996, č. 8, s. 233 - 241.
- [25] TSAI, C. L. - DAI, W. L. - DICKINSON, D. W. - PAPRITAN, J. C.: Analysis and Development of Real-Time Control Methodology in Resistance Spot Welding. Welding Journal, 1991, č. 121, s. 339 - 351.
- [26] WEBER, G. - PREß, H.: Übertragbarkeit wechselstromtechnischer Standardmethoden auf das Widerstandsschweißen. Schweißen und Schneiden, 1991, č. 8, S. 466 - 470.
- [27] WEBER, G. - PREß, H.: Dynamische Strom-Spannungs Kennlinien zur Beschreibung der Elektrischen Vorgänge im Sekundärkreis von Widerstandsschweißeinrichtungen. Schweißen und Schneiden, 43, 1991, č. 10, s. 600 - 604.

- [28] WEBER, G.: Zeitpunktbezogene Beschreibung der elektrischen Zusammenhänge im Sekundärkreis von Widerstandsschweißeinrichtungen. Schweißen und Schneiden, 48, č. 1., s. 21 - 26.
- [29] WEBER, G.: Zusammenhänge zwischen extremwert- und effektivwertbezogener Beschreibung elektrischer Vorgänge beim Widerstandspreßschweißen mit Wechselstrom. Schweißen und Schneiden, 47, č. 4, s. 288 - 295.
- [30] WEBER, G.: Qualität von Schweißungen und dynamisches Strom-Spannung Verhalten beim Widerstandspunktschweißen mit Wechselstrom. Schweißen und Schneiden, 47, č. 1, s. 23 - 29.
- [31] ČSN 05 1310. Zvariteľnosť kovov a jej hodnotenie. Všeobecné ustanovenia. 1988.
- [32] WANDDELL, W. - WILLIAMS, N. T.: Weldability - a definition relative to industrial requirements. Doc. IIW III-995-92.
- [33] Anonym: Procedure for determining the weldability lobe for resistance spot, projection and seam welding. Doc. IIW III-1006-93.
- [34] HAUSER, J. - JASOVSKÝ, F. - RŮŽIČKA, R.: Rozbor možnosti uplatnenia žiarovo pokovených plechov pri výrobe autobusov a skúsenosti s ich použitím u rady 730. In: Výsledky aplikovaného výskumu v praxi. Konferencie k 20. Výročí VSÚ VO VSŽ Košice 1988, s. 103 - 113.
- [35] Anonym: Electrical resistance welding. Characterisation of weldability by resistance spot welding of steel sheets, coated or not. Experimental standard. Doc. IIW III-991-93.
- [36] KRAUSE, H. J.: Definition of failure types and geometric measurements for weld quality for resistance spot, seam and projection welds. Doc. IIW III-985-92.
- [37] KRAUSE, H. J.: Untersuchungen zur Elektrodenstandzeit beim Widerstandsschweißen feueraluminierter Bleche aus Stahl. Schweißen und Schneiden, 29, 1977, č. 1, s. 5 - 9.
- [38] BRÓZDA, J.: The structure, mechanical properties and corrosion resistance of spot and seam welds made on hot dip aluminized sheet. In: Sborník přednášek. 3. Vysoké Tatry, ČSSR, VÚZ 1983, s. 15 - 19.
- [39] Merkblatt DVS 2902. Teil 3. Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke. Konstruktion und Berechnung. 1997, DVS GmbH Düsseldorf BRD, Příloha Doc. IIW III-970-71.
- [40] ČSN ISO 1047. Zváranie. Odlupovacie a sekáčové skúšanie odporových bodových, výstupkových a švových zvarov. 1993.
- [41] Anonym: The Assessment and Testing of Resistance Spot Welding Electrode Materials. Doc. IIW III-586-78.

- [42] KELLY, J. - KNOWLSON, P. M.: Spot Welding Galvanized Steel. Welding and Metal Fabrication, 1968, č. 12, s. 447 - 453.
- [43] KELLY, J. - KNOWLSON, P. M.: The BWRA Quality Monitor an Spot-Welding Galvanized Steel Sheet -An Evaluatio. Welding Research Supplement, 1967, č. 3, s. 114 - 120.
- [44] ČSN 05 1122. Skúška ťahom bodových a prievarkových zvarových spojov. 1964.
- [45] SAWHIL, J. M. - WATANABE, J. H. - MITCHEL, J. W.: Spot Wldability of Mn-Mo-Cb, V-N, and SAE 1008 Steels. Welding Journal, 1977, č. 7, s. 217 - 224.
- [46] Anonym: Practice and Results of Instrumented Peel Test. Doc. IIW III-997-92.
- [47] Anonym: Procedure for the Evaluation on the Life of Spot Welding Electrodes., Part 1 - Uncoated and Coated Steel. Doc. IIW - WG 13 92/1.
- [48] FRITZSCHE, W. - HÜTNER, H.: Widerstandschweißen Band 1. Bedingungen zum Einsatz der Widerstandschweißungen. /Technicko - vědecké zprávy/. Halle/ Saale, ZIS 1979, č. 93/1, 172 s.
- [49] BURBANK, G. E. - TAYLOR, W. D.: Ultrasonic in process inspection of resistance spot welds. Welding Journal, 44, 1965, č. 5, s. 193 - 198.
- [50] HAIN, R.: Resistivity Testing of Spot Welds Challenges Ultrasonic. Welding Journal, 1988, č. 5, s. 46 - 51.
- [51] Anonym: Spot Weld Destructive Testing Decreases Dramatically. Welding Journal, 1986, č. 5, s. 62 - 65.
- [52] POLAJNAR, I. - ELSAYED, A. E. - PROSENC, V.: Inventory of sources of acoustic emission in resistance spot welding. Doc. IIW III-937-91.
- [53] POLAJNAR, I. - PROSENC, V.: Effect of variability of welding parameters on accoustic emission activity in resistance spot welding process. Doc. IIW III-996-92.
- [54] NEUMANN, H.: Sledování a řízení svařovacího procesu při odporovém bodovém svařování žárově pohlínikovaných ocelových plechů. /Dizertační práce/. 1990. 142 s. VŠST. Fakulta strojní.
- [55] NEUMANN, H. - TMĚJ, J.: Jakost odporových svarových spojů žárově pohlínikovaných ocelových plechů. /Výzkumná zpráva/. Liberec, VŠST 1985. 42 s.
- [56] NEUMANN, H. - FORMAN, J.: Příspěvek k hodnocení kvality bodových odporových svarů žárově pohlínikovaných ocelových plechů. Zváranie, 39, č. 5, s. 134 - 138.
- [57] NEUMANN, H.: Vliv opotřebení elektrod na průběh svařovacího procesu a jakost svarových spojů u bodového odporového svařování žárově pohlínikovaného plechu. /Výzkumná zpráva/. Liberec, VŠST 1984. 62 s.

- [58] NEUMANN, H.: Bodové odporové svařování plechů s povlaky na bázi slitiny Al-Zn. /Výzkumná zpráva/. Liberec, VŠST 1990. 66 s.
- [59] Anonym: Welding Handbook. Welding processes. Section 2. American Welding Society. New York 1969.
- [60] NADKARNI, A. V. - WEBER, E. P.: A New Dimension in Resistance Welding Electrode Materials. Welding Journal, 1977, č. 11, s. 331 - 338.
- [61] SCM METAL PRODUCT, INC., USA: GLIDCOP - Copper dispersion strengthened with aluminium oxide. 1994. 12 s.
- [62] SVÍTIL, A.: Životnost elektrod při odporovém svařování pozinkovaných ocelových plechů. Zváranie, XXVI, 1997, č. 1, s. 9 - 13, č. 2, s. 48 - 55.
- [63] LUKÁČ, I. - MICHALANSKÝ, F.: Možnosť aplikácie zliatiny CuFe0,6Ag0,1 na výrobu odporových zvaracích elektród. Zváranie - Svařování, 46, 1997, č. 9, s. 202 - 203.
- [64] Bayerische Metallwerke GmbH, BRD: Triconstant®, Elektrodenwerkstoffe. 1989. 11 s.
- [65] Anonym: The Assessment and Testing of Resistance Spot Welding Electrode Materials. Doc. IIW III-586-78.
- [66] DIN ISO 5182. Schweißen. Werkstoffe für Widerstands-Schweißelektroden und Hilfseinrichtungen (identisch mit ISO 5182. 1991). 1995.
- [67] RIVET, R. M.: In-process spot weld control. Metal Construction, 1980, č. 5, s. 230 - 234.
- [68] SITTE, G.: Elektrodenstandzeit beim Widerstandspunktschweißen. /Technicko - vědecké zprávy/. Halle/Saale, ZIS 1979, č. 95/4. 44 s.
- [69] SITTE, G.: Elektrodenstandzeit beim WP-Schweißen ZIS Mitteilungen, 1975, č. 8, s. 950 - 958.
- [70] ŠIMŮNEK, M.: Technická zpráva o svařování (odporovém) hliníkových plechů. /Technická zpráva/. Ledec nad Sázavou, Kovofiníš n.p. 1979. 28 s.
- [71] TMĚJ, J. - NEUMANN, H.: Bodové odporové svařování žárově hliníkových plechů ocelových plechů řady f. Thyssen, /Výzkumná zpráva/. VŠST 1982. 95 s.
- [72] TMĚJ, J. - NEUMANN, H. - ŠOLCOVÁ, A.: Spojování tenkých plechů. /Výzkumná zpráva/. Liberec, VŠST 1983. 76 s.
- [73] DAVID, V. a kol.: Slévárenský kalendář. 1970. Brno, ČsVTS a TM. 1970, 130 s.
- [74] DYCHNO, S. L. - PUGAČEV, A. I.: Mechanizm nalipaniya legkoplavkikh pokrytij na elektrody pri kontaktnoj točečnoj svarke. Avtomatičeskaja svarka, 1975, č. 10, s. 19 - 21.

- [75] RIVETT, R. M. - WESTGATE, S. A.: Resistance welding of aluminium alloys in mass production. *Metal Construction*, 1980, č. 10, s. 510 - 517.
- [76] NAGATA, K. - NOMURA, K. - KONDO, M.: Electrode life study in resistance spot welding of aluminium sheet. In: Report of resistance welding and related welding processes studies in Japan. Doc. IIW III-989-92. Spain, 1992, s. 10.
- [77] SIMMONS, W. P.: Spot Weld in Electrode Life. *Welding Journal*, 1967, č. 11, s. 915 - 920.
- [78] IKEDA, R. - YASUDA, K. - YAMAGUCHI, T. - SHIGA, C.: Resistance spot welding of galvanized steel sheets (Report 3) - Effect of electrode tip geometry on electrode wear. In: Report of resistance welding and related welding processes studies in Japan. Doc. IIW III-989-92. Spain 1992, s. 8.
- [79] IKEDA, R. - YASUDA, K. - YAMAGUCHI, T. - SHIGA, C.: Resistance spot welding of galvanized steel sheet (Report 1) - Effect of electrode tip face configuration on weld performance. In: Report on resistance welding and related welding processes studies in Japan. Doc. IIW III-968-91. Netherlands 1991, s. 16.
- [80] DORN, L. - PING ZU: Einfluß der mechanischen Maschineneigenschaften auf das mechanische Verhalten beim Aluminiumbuckelschweißen. *Schweißen und Schneiden*, 47. 1995, č. 1, s. 14 - 20.
- [81] WILLIAMS, N. T. - CHILVERS, K.: Preliminary results on the influence of spot welding machine characteristics on electrode life.. Doc. IIW III-975-91.
- [82] MUCHA, M.: Metodika skúšok životnosti elektrod pre bodové odporové zvaranie. /Dizertační práce/. Bratislava 1985. 140 s. VÚZ.
- [83] MUCHA, M.: Evaluatio and comments on Life Testing Methods of Spot Welding Electrodes. Doc. IIW III-782-84. Bratislava 1979. 5 s.
- [84] CHANG, U. I. - MITCHELL, J. W. - YONG, L. G.: Evaluation Techniques for Electrode caps used in Resistance spot Welding. *Welding Journal*, 1972, č. 9, s. 617 - 625.
- [85] SATOH, T. - KATAYAMA, J.: Testing Method for Electrode Life Evaluation in Spot-Welding Steel Sheets. Doc. IIW III-966-91.
- [86] SCHMITZ, B. - DEFOURNY, J.: A Procedure to Appraise the Resistance Spot Weldability of Coated Steel Sheets. Doc. IIW III-992-92.
- [87] KAWASAKI Steel Corporation, Japan: KAWASAKI ZINCROMETAL. 1983. 16 s.
- [88] NEUMANN, H.: Studium životnosti elektrodových špiček při bodovém odporovém svařování žárově pohlínkovaných ocelových plechů řady f. Thyssen. /Výzkumná zpráva/. Liberec, VŠST 1982. 79 s.

- [89] ON 05 2675. Odporové svařovací stroje. Elektrodové špičky vsazované přímé. Rozměry. 1964.
- [90] ON 42 3039. Slitina mědi tvářená 42 3039. CuCr 1. 1993.
- [91] TANAKA, Y. - SAKAGUCHI, M. - SHIRASAWA, M. - MIYAHARA, M. - NOMURA, S.: Electrode life in resistance spot welding of zincplated steel sheets. International Journal of Vehicle Design, 1985, č. 6, s. 501 - 503.
- [92] GRAHLE, M.: Zur Frage des Schweißens bei der Fertigung von Kraftfahrzeugkarosserien aus feuerverzinkten Stahlblech. Schweißen und Schneiden, 28, 1976, č. 9, s. 348 - 352.
- [93] SAMSON, J. - BRUN, CH. - MATHIEU, S.: „MONOGAL“: A New Anti - corrosion Material for the Automotive Industry. In: Paper No. 820335 SAE, 1982, Detroit, Michigan.
- [94] KAWASAKI Steel Corporation, Japan: KAWASAKI RIVER HI ZINC HIGH CORROSION RESISTANT Zn-Ni ALLOY Electro Galvanized Steel Sheets. 1984, s. 13.
- [95] TAKAHASHI, Y. - SAITO, T.: Development of Spin Electrode System for Superior Electrode Tip Life in Spot Welding of Coated Steel Sheets. In: Doc. IIW III-965-91, 1991, 21 s.
- [96] MATEJEC, J.: Bodové odporové zvarovanie plechov s pokovením na báze zinku. /Dizertační práce/. Bratislava 1993, STU Bratislava, Materiálovo technologická fakulta Trnava.
- [97] MATEJEC, J. - ZELENÁK, M.: Bodové zvarovanie pozinkovaných ocelových plechov s opracovaním zvaracích elektród. Zvarovanie - Svařování, 42, 1993, č. 12, s. 269 - 274.
- [98] Anonym: Procedure for spot welding of uncoated and coated low carbon and high strength steels. Doc. IIW III-1005-93.
- [99] WENDEL, J. - JOHNSON, W. - VAN HAAREN, M.: The ABC of High - Speed Pulse Welding. Welding Journal, 1996, č. 7, s. 47 - 49.
- [100] DONHAUSER, G.: Nýtování na postupu. In. Moderní technologie pro spojování tenkých plechů. Praha, Česká společnost pro výzkum a zpracování plechů, 1997, s. 25 - 37.
- [101] BEYER, R.: Durchsetzfügen - moderní alternativní spojovací technologie. In. Moderní technologie pro spojování tenkých plechů Praha, Česká společnost pro výzkum a zpracování plechů, 1997, s. 39 a příloha.
- [102] LIEBIG, H. P. - BOBER, J. - MUTSCHLER, J.: Verbinden von Blechteilen zwischen Stempel und Gravur. VDI - Z, Entwicklung, Konstruktion, Produktion, 1989, č. 1, s. 95 - 102, Sonderdruck.
- [103] BUDDE, I. - LAPP, W.: Stanznieten ist zukunftsträchtig in der Blechverarbeitung. Bänder Bleche Rohre, 32, 1991, č. 5, Sonderdruck.

- [104] DE-STA-CO, Steinbach/Ts, BRD: Durchsetzfuge - Technik, 1993, 4 s.
- [105] TOX® - PRESSOTECHNIK, Weingarten BRD: TOX® Verbindungssysteme, 1993, 13 s.
- [106] BUCHAR, Z. - NEUMANN, H.: Tvářitelnost svařovaných nástřihů určených pro výlisky vyšších užitných vlastností. Strojírenská výroba, 1997, č. 9 - 10.
- [107] BUCHAR, Z. - NEUMANN, H.: Problematika vstupních parametrů pro numerické simulace tažení výlisků ze svařovaných nástřihů. In: Sborník celostátní konference technických univerzit a průmyslu „TRANSFER '98“, Praha, (v tisku).
- [108] BUCHAR, Z. - NEUMANN, H.: Microstructure and properties of the tailored blanks from HSLA steel sheets with lower planar anisotropy. In: Proc. of 10th Symposium on Metallography, Stará Lesná, Slovensko, April 1998.