

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

nositelka Řádu práce

fakulta strojní

katedra tváření a plastů

Ing. Heinz Neumann

SLEDOVÁNÍ A ŘÍZENÍ SVAŘOVACÍHO PROCESU
PŘI ODPOROVÉM BODOVÉM SVAŘOVÁNÍ ŽÁROVĚ
POHLINÍKOVANÝCH OCELOVÝCH PLECHŮ

Kandidátská disertační práce

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI

3146088248

Číslo a název vědního oboru
23-07-9 Strojírenská technologie

Odborné vedení: Prof. Ing. Jaroslav Iměj, CSc.

Liberec, březen 1990

O B S A H

SEZNAM HLAVNÍCH POUŽITÝCH SYMBOLŮ	5
1. ÚVOD	8
2. FYZIKÁLNÍ PODSTATA BODOVÉHO ODPOROVÉHO SVAŘOVÁNÍ	11
2.1. Teplotní a elektrické pole u bodového svařování	15
2.2. Charakteristiky svařovacího procesu	19
3. HODNOCENÍ KVALITY BODOVÝCH ODPOROVÝCH SVARŮ	25
3.1. Destruktivní zkoušky	25
3.2. Nedestruktivní zkoušky	29
4. ŽIVOTNOST ELEKTROD	31
4.1. Životnost elektrod při svařování žárově pohliníkových ocelových plechů	32
4.2. Metalurgické zvláštnosti při svařování ocelových plechů s kovovými povlaky	35
5. REGULACE A ŘÍZENÍ ODPOROVÉHO BODOVÉHO SVAŘOVÁNÍ	38
5.1. Systémy s měřením a vyhodnocováním neelek- trických veličin	40
5.2. Systémy s měřením a vyhodnocováním elek- trických veličin	45
5.3. Systémy s kombinací elektrických a neelek- trických veličin a systémy využívající statis- tické modely	51
5.4. Metodika návrhu kontrolních a řídicích systémů	56
5.4.1. Kvantitativní vyhodnocení kontrolní proměnné	60

5.4.2. Kvalitativní vyhodnocení kontrolní proměnné	60
6. STANOVENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	63
7. METODICKÉ POSTUPY ZPRACOVÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	65
7.1. Volba a zhodnocení vlastností základního materiálu	65
7.2. Svařovací pracoviště a metody měření fyzikál- ních veličin svařovacího procesu	70
7.3. Návrh programu experimentálních prací	73
7.4. Metodický postup pro stanovení a vyhodno- cení kontrolních veličin svařovacího procesu	75
7.5. Metodický postup realizace experimentů	80
7.6. Metodický postup vyhodnocení experimentů	82
7.7. Metodický postup při hodnocení kvality svarů	86
8. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ A VÝSLEDKY PRÁCE	90
8.1. Vyhodnocení souborů měření č. 1-6	90
8.1.1. Metalografické hodnocení svarových spojů	96
8.2. Návrh kontrolních veličin svařovacího procesu a metodický postup pro jejich stanovení	101
8.3. Vyhodnocení souborů měření č. 7-9	103
8.4. Statistické vyhodnocení závislostí kon- trolních veličin svařovacího procesu a jakosti svarů	109

8.5. Ideový návrh řídicího systému a návrh vývo- jového diagramu řízení svařovacího procesu ...	120
9. ZÁVĚR	127
10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	133

SEZNAM HLAVNÍCH POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Q	- celkové množství tepla vyvinuté při průchodu svařovacího proudu	$ J $
I	- elektrický proud	$ A $
I_{ef}	- efektivní hodnota svařovacího proudu	$ kA $
I_s	- svařovací proud	$ kA $
R	- elektrický odpor	$ \Omega $
t	- čas	$ s $
t_s	- svařovací čas	$ s $
J	- hustota svařovacího proudu	$ A.m^{-2} $
q_v	- intenzita objemového zdroje tepla	$ J.m^{-3}.s^{-1} $
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	- součinitel tepelné vodivosti	$ W.m^{-1}.K^{-1} $
a	- součinitel teplotní vodivosti	$ m^2.s^{-1} $
E	- intenzita elektrického pole	$ V.m^{-1} $
φ	- elektrický potenciál	$ V $
T	- teplota	$ K $
W	- celková tepelná energie na jednotku objemu na zvýšení teploty a tavení materiálu	$ J.m^{-3} $
l	- měrné skupenské teplo tání	$ J.kg^{-1} $
$\eta(T)$	- poměrná část taveniny v jednotce objemu	$ l $
F_{max}	- maximální únosnost svaru	$ N $
d_{sv}	- rozměr svaru	$ mm $
d_c	- rozměr svarové čočky	$ mm $
h_c	- výška svarové čočky	$ mm $
$ Fo$	- Fourierovo kritérium	
∇^2	- Laplaceův operátor	
θ	- bezrozměrná teplota	
τ, τ_s	- bezrozměrný čas	

ρ	- bezrozměrný poloměr
ζ	- bezrozměrné souřadnice z
μ	- energetické kritérium svařovacího procesu
K_F	- kritérium podobnosti pro působení svařovací síly
K_{geom}	- kritérium geometrické podobnosti
$E(\eta x)$	- podmíněná střední hodnota veličiny η pro hodnotu x náhodné veličiny ξ
$E(\xi y)$	- podmíněná střední hodnota veličiny ξ pro hodnotu y náhodné veličiny η
$n_{i.}$	- četnost prvků v i -tém řádku korelační tabulky
$n_{.j}$	- četnost prvků v j -tém sloupci korelační tabulky
$\eta_{y x}$	- korelační poměr
p_{ij}	- pravděpodobnost, že hodnota náhodné veličiny ξ padne do i -té třídy a současně hodnota náhodné veličiny η do j -té třídy
$f(z_{1i}, z_{2j})$	- sdružená hodnota pravděpodobnosti v bodě s třídními znaky z_{1i} a z_{2j}
$\bar{x}, \bar{y}$	- výběrový průměr
s	- výběrová směrodatná odchylka
s_R	- reziduální směrodatná odchylka
v	- variační koeficient
s_x^2, s_y^2	- výběrový rozptyl
s_R^2	- reziduální rozptyl
s_{xy}	- výběrová kovariance
r_{xy}	- výběrový koeficient korelace
S	- výběrová kovarianční matice
b_0, b_1, b'_0, b'_1	- výběrové koeficienty regrese
$s_{b_0}^2, s_{b_1}^2$	- výběrové rozptyly výběrových koeficientů regrese b_0 a b_1
$s_y(x)$	- výběrová směrodatná odchylka pořadnice y skutečné regresní přímky
$s^2(\eta x)$	- podmíněný rozptyl - bodový odhad rozptylu podmíněného rozdělení

χ^2	- testová charakteristika	
$1 - \alpha$	- konfidenční interval	
U	- napětí mezi elektrodami	[V]
TE	- tepelná expanze svaru	[mm]
SU, SR, SP, SU_v	- kontrolní veličiny svařovacího procesu	
D	- průměr dosedací plochy elektrody	[mm]

1. ÚVOD

Z porovnání současného stavu strojírenské výroby v Československu a v nejvyspělejších zemích světa jsou zřejmé vývojové trendy, které budou muset být respektovány při rozvoji naší ekonomiky a ve snaze o aktivní zapojení do nových integračních procesů probíhajících v Evropě. K rychlému zajištění obnovy konkurenční schopnosti našeho hospodářství je nutné klást trvalý důraz na efektivní využívání všech surovin, materiálů, energií a na aplikaci nových progresivních konstrukčních materiálů i technologií.

K progresivním konstrukčním materiálům se řadí tenké ocelové plechy s různými povlaky se zvýšenou odolností proti korozi nebo se zvláštními funkčními vlastnostmi. Ve světové produkci ocelových plechů s kovovými povlaky převládají plechy s povlaky na bázi Zn a slitin Zn, používají se však i povlaky na bázi jiných kovů a slitin (např. Al, Al-Si, Al-Zn, Sn, Pb, Cd atd.) a povlaky organické.

Značná část spotřeby tenkých ocelových plechů s kovovými povlaky připadá v celosvětovém měřítku na automobilový průmysl. Všechny významné automobilky v Evropě, Japonsku a Severní Americe používají při výrobě karoserií a některých dílů podvozkových částí ocelové plechy s povlaky na bázi Zn. Na celkové hmotnosti karoserií se tyto plechy podílí z 50 - 60 %. Stále širší uplatnění mají především plechy s vícevrstevnými povlaky vytvořenými elektrolyticky. Plechy s vícevrstevnými povlaky s různým složením jednotlivých vrstev jsou přínosem pro komplexní řešení korozní odolnosti a zpracovatelnosti.

Účelnou aplikací ocelových plechů s kovovými povlaky zajišťují výrobci automobilů zvýšenou odolnost karoserií proti kosmetické i perforační korozi v náročných provozních podmínkách (celoroční provoz, exhalace, chemické posypové materiály) a zvýšení průměrné životnosti automobilu bez ztráty estetických a funkčních vlastností. Automobilky, které uvede-

ný trend včas nezachytily, budou mít stále větší potíže s prodejností svých výrobků na zahraničním trhu.

V automobilovém průmyslu v ČSSR byl používán pouze žárově pozinkovaný plech a to při výrobě autobusů řady 730 v n.p. Karosa Vysoké Mýto [1]. Aplikace pozinkovaných plechů znamenala významný ekonomický přínos. Při provozu asi 30 000 autobusů v ČSSR činily roční úspory na opravách karosérií 75 mil. Kčs a roční úspora plechu více než 1000 tun [2]. Vzhledem k problémům při povrchové úpravě však vznikl požadavek na změnu typu povlaku.

V souladu se světovým trendem výroby a spotřeby ocelových plechů s kovovými povlaky došlo na přelomu roků 1988 a 1989 k významným změnám v inovačních záměrech VSŽ Košice [2] i v přístupech automobilového průmyslu. Ve VSŽ se řeší výroba žárově pozinkovaného plechu s následným žiháním v poklopových pecích pro získání povlaku na bázi Zn-Fe a v automobilovém koncernu ŠKODA se urychleně řeší problémy související se zpracováním tohoto plechu (tvářitelnost, odporová svařitelnost, lakovatelnost). Ocelový plech s povlakem na bázi Zn-Fe (označení Ferozink) se používá místo klasických pozinkovaných plechů při výrobě karosérií autobusů [3].

V naší strojírenské výrobě nejsou se zpracováním ocelových plechů s kovovými povlaky dostatečné zkušenosti, neboť jejich tuzemská výroba se teprve začíná rozvíjet. Podle dostupných údajů je zřejmé, že se zpracováním plechů s povlaky souvisí specifické problémy při tváření, svařování, povrchové úpravě apod. Pro jednotlivé zpracovatelské technologie se potenciální odběratelé plechů s povlaky snaží získat předběžné podklady z dostupné odborné literatury a ověřovacími zkouškami na plechu z dovozu.

Typickou technologií svařování používanou v automobilovém průmyslu především při výrobě samonosných karosérií je odporové bodové svařování. Bodové svařování ocelových plechů s povlaky má specifické rysy z hlediska metalurgických dějů při tvorbě svaru i dějů probíhajících mezi pracovní částí elektrody a povrchem svařovaných plechů. Vážným problémem

zejména při svařování klasických žárově pokovených plechů, je nízká životnost elektrod, projevující se v rychlém poklesu kvality svarových spojů s rostoucím počtem provedených svarů.

Kvalita bodového svaru je závislá na použitých svařovacích parametrech a na celé řadě rušivých vlivů působících nahodile (např. změny síťového napětí, změny v kvalitě výchozího materiálu, změny vzdáleností svarů a vzdálenosti svaru od okraje plechu atd.) nebo soustavně (např. rostoucí opotřebení elektrod).

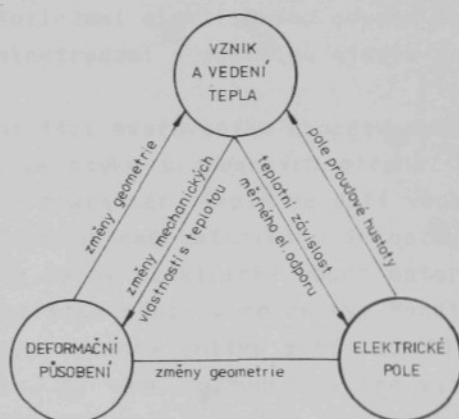
Komplexní působení svařovacích parametrů a rušivých vlivů na výslednou kvalitu svarů znemožňuje získávat svarové spoje v libovolně úzkém, předem stanoveném, tolerančním pásmu kvality. Působením rušivých vlivů může u jednotlivých svarů dojít k nepřijatelnému zhoršení kvality i když nastavené svařovací parametry dávají předpoklad pro vytvoření kvalitních svarů. K zajištění rovnoměrné kvality bodových svarů se stále častěji aplikují systémy automatického sledování a řízení jakosti, které mohou do různé míry eliminovat negativně působící rušivé vlivy. Monitorovací a korekční systémy mají rozhodující význam pro návrh automatizovaných a robotizovaných pracovišť. Záruka, že vysoký procentuální podíl svarů bude zhotoven kvalitně, je předpokladem pro efektivní konstrukci svarku bez zbytečně předimenzovaného počtu svarů a efektivní výrobu svarku z hlediska spotřeby energie. Při svařování ocelových plechů s kovovými povlaky je nasazení monitorovacích a korekčních systémů předpokladem pro zajištění rovnoměrné kvality svarů a pro dosažení životnosti elektrod přijatelné z technologických i ekonomických hledisek.

Předložená práce je zaměřena na návrh systému monitorování a řízení svařovacího procesu u bodového odporového svařování žárově pohlíníkováného plechu. Vznikla postupně na základě spolupráce při řešení úkolů RVT č. CPT-172 a RVT č. CP-T 3/6 "Ověřování nových technologií ve svařování" s AZNP Mladá Boleslav a při řešení fakultních úkolů F 2421-040 [4,5] a F 2421-053 [6]. Práce byla dokončena v rámci státního úkolu III-1-6/2-3 "Mezní stavy při zpracování povrchově upravených tenkých ocelových plechů".

2. FYZIKÁLNÍ PODSTATA ODPOROVÉHO BODOVÉHO SVAŘOVÁNÍ

Odporové bodové svařování je nerovnovážný děj, během kterého vzniká svarový spoj působením rozličných mechanismů. Hnací silou svařovacího procesu je existence teplotních, deformačních i koncentračních gradientů. Dominantní je působení teplotních gradientů a spojení svařovaných částí vzniká krystalizací natavené oblasti, tzv. svarové čočky. Svarový kov spoje tvoří přetavený základní materiál. Přítlačná síla zajišťuje přiblížení povrchu svařovaných částí, zabezpečuje průchod svařovacího proudu, udržuje natavený obsah svarové čočky v místě spoje, působí plastické deformace chladnoucího spoje (prokování svaru) a zabezpečuje odvod tepla ze spoje do elektrod. V oblasti vytváření svaru a v oblasti styku elektrody s plechem probíhají difúzní děje, které mají význam pro výslednou kvalitu svaru i pro životnost elektrod především při svařování ocelových plechů s různými typy kovových povlaků (např. žárově pokovené plechy, elektrolyticky pokovené plechy, plátované plechy).

Hlavní fyzikální děje a jejich vzájemné vazby u bodového svařování jsou zřejmé ze schematického obr. 1 [7].

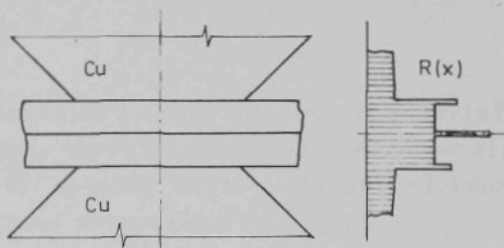


Obr. 1. Hlavní fyzikální děje při bodovém odporovém svařování a jejich vzájemné vazby

Obrázek samozřejmě nevystihuje dynamiku vztahů fyzikálních dějů v plné míře.

Pro vznik odporového bodového svaru je důležité lokální zvýšení elektrického odporu v místě styku svařovaných plechů, neboť téměř homogenní rozložení elektrického odporu v objemu svařovaných materiálů by samo o sobě nezajistilo ostře ohraňčený lokální ohřev.

Počáteční nespojitosti v rozložení odporu mezi elektrodami tvoří přechodové odpory ve styku svařovaných plechů a ve styku elektrod s plechy. Zvýšení odporu v místech dosedu elektrod je v zásadě nežádoucí a vhodnou volbou elektrodového materiálu se snažíme tyto přechodové odpory snížit. Charakter rozložení elektrického odporu mezi elektrodami v okamžiku startu svařovacího procesu je na obr. 2 [7].



Obr. 2. Rozložení elektrického odporu mezi elektrodami v okamžiku startu

V počáteční fázi svařovacího procesu dominuje intenzivní vývoj tepla ve styku svařovaných plechů. Zdroj tepla má prakticky plošný charakter. Teplo se šíří vedením do bezprostředně přilehlých objemů materiálů. S rostoucí teplotou se postupně zvyšuje měrný elektrický odpor materiálu a původně plošný zdroj tepla se mění na objemový. Počáteční fáze trvá u oceli s nízkým obsahem uhlíku méně než 10 % z celkového svařovacího času, je však rozhodující 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.

Během svařovacího cyklu se mění elektrický odpor mezi elektrodami a mění se také svařovací proud (R a I jsou funkce času). Celkové množství tepla vyvinuté při průchodu svařovacího proudu svařovanými díly vyjadřuje rovnice (1).

$$Q = \int_0^{t_s} R I^2 dt \quad (1)$$

Intenzita objemového zdroje tepla, tj. množství tepla vyvinuté v jednotce objemu materiálu za sekundu při průchodu svařovacího proudu o hustotě J , se určí ze vztahu (2).

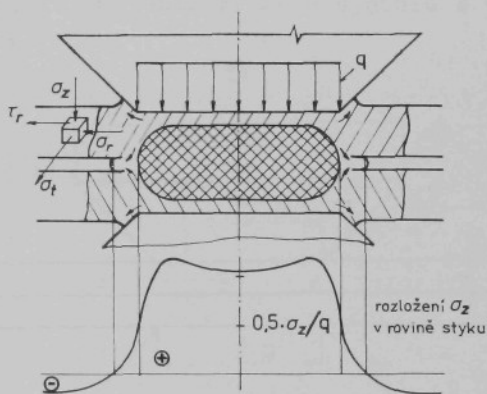
$$q_v = \rho J^2 = \frac{J^2}{\sigma} \quad (2)$$

Měrný elektrický odpor ρ výrazně závisí na teplotě. Na obr. P-1 jsou teplotní závislosti měrného elektrického odporu pro čistý hliník, slitinu AlMg6, nízkouhlíkovou ocel a vysokolegovanou chromniklovou ocel.

Pro průběh svařovacího procesu je významná i teplotní závislost teplotní vodivosti materiálu. Teplotní závislost měrné teplotní vodivosti pro ocel s nízkým obsahem uhlíku je na obr. P-2. S rostoucí teplotou měrná teplotní vodivost klesá, a to s ohledem na průběh teplotní závislosti měrného elektrického odporu vede k výrazné nerovnováznosti odporového ohřevu.

Termální stránka u bodového svařování je sice dominantní, nevystihuje však v plné míře celou šířku a složitost probíhajících fyzikálních dějů. Největší potíže při popisu dějů spjatých se vznikem svaru působí deformační stránka svařovacího procesu. Dostatečně přesná analýza silově-deformačních poměrů u bodového svařování ještě nebyla provedena. Při tvorbě modelů bodového svařování lze však deformační děje obejít s poměrně malou ztrátou na použitelnosti modelu [7].

Deformace v oblasti pracovní části elektrody a v základním materiálu v oblasti tvorby svaru vznikají během celého svařovacího cyklu. Nejrozsáhlejší deformace vznikají v období průchodu svařovacího proudu, tj. při ohřevu a místním tavení svařovaných materiálů. Na obr. 3 je schematicky znázorněno působící namáhání (q zde značí měrný tlak) a rozložení normálového napětí ve směru osy z v rovině styku plechů a šipkami jsou vyznačena místa maximálních plastických deformací.



Obr. 3. Charakter zatížení a rozložení normálového napětí při bodovém svařování [7]

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 čochy spolu s jeho stlačováním elektrodami vede nakonec k odtlačení plechů v okolí svarového spoje. Vzniklá mezera i hluboké vtisky po elektrodách do jisté míry zhoršují užité vlastnosti svarového spoje.

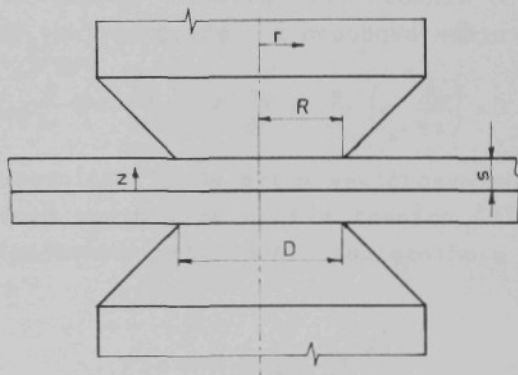
Deformace vznikající během svařovacího cyklu v oblasti pracovní části elektrod vedou k postupnému zvětšování doseďací plochy, k vytváření otřepů a nežádoucímu ovlivnění svařovacích podmínek.

2.1. Teplotní a elektrické pole u bodového svařování

Při formulaci modelových rovnic bodového odporového svařování se obvykle vychází ze zjednodušené rovnice teplotního pole (3).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{c \cdot \gamma} \quad (3)$$

Vzhledem k rotační symetrii běžného uspořádání bodového svařování je výhodné použít cylindrický systém souřadnic. Význam dále použitých geometrických symbolů a uspořádání jsou zřejmé z obr. 4.



Obr. 4. Geometrické uspořádání bodového svařování a označení hlavních rozměrů

Rovnice teplotního pole pro bodové svařování s geometrií podle obr. 4 bude mít tvar (4).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c \cdot \gamma} \quad (4)$$

Po dosazení za objemový zdroj tepla q_v z rovnice (2) do rovnice (4) získáme konečný tvar rovnice teplotního pole (5).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{J^2}{\sigma \cdot c \cdot \gamma} \quad (5)$$

Termofyzikální vlastnosti svařovaného materiálu jsou funkcemi teploty a tedy i souřadnic a času. Proudová hustota je také funkcí souřadnic a času. Rozložení proudové hustoty získáme řešením rovnice elektrického pole.

Rozložení potenciálu φ v bezdrojové oblasti popisuje rovnice (6), ze které lze řešením získat rovnici (7) pro elektrické pole.

$$\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} \varphi) = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi \quad (7)$$

V cylindrických souřadnicích a za podmínky osové symetrie se rovnice (6) dá napsat ve tvaru (8). Řešením rovnice (8) se získají složky vektoru $\operatorname{grad} \varphi$ a proudová hustota $\mathbf{J}$ ze zdro-

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\sigma}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0 \quad (8)$$

jového členu rovnice (5) je potom vektorovým součtem těchto složek. Proudová hustota se určí z rovnice (9), která charakterizuje vzájemnou vazbu rovnic teplotního a elektrického pole.

$$\mathbf{J}^2 = \sigma^2 \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Pro praktické výpočty se diferenciální rovnice teplotního a elektrického pole musí doplnit popisem geometrie a okrajových podmínek. Vzhledem k tomu, že termofyzikální vlastnosti materiálu jsou funkcemi teploty, musí se teplotní a elektrické pole řešit simultánně.

Analytický výpočet teplotních polí u bodového svařování je obtížný a nelze se obejít bez určité idealizace okrajových podmínek. Úloha se dále komplikuje, chceme-li při výpočtu postihnout existenci kapalně a tuhé fáze a proměnné hranice mezi nimi v období tvorby svaru. Při řešení se přitom vychází z rovnice (10) pro intenzitu objemového zdroje tepla, která se upraví pro oblasti s fázovým rozhraním na

tvár (11). W představuje celkovou tepelnou energii spotřebovanou na zvýšení teploty a tavení materiálu jednotkového objemu a určí se z rovnice (12).

$$q_v = c \cdot \gamma \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div} \{ -\lambda \cdot \operatorname{grad} T \} \quad (10)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \operatorname{div} \{ -\lambda \cdot \operatorname{grad} T \} + q_v \quad (11)$$

$$W = \int_0^T c \gamma dT + l \cdot \gamma \cdot \eta(T) \quad (12)$$

V cylindrickém systému souřadnic se rovnice pro výpočet teplotního pole (11) vyjádří rovnicí (13). Objemový zdroj tepla

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v(r, z) \quad (13)$$

$q_v(r, z)$ je nenulový jenom během průchodu svařovacího proudu a získá se řešením rovnice (8). V souladu s již uvedenými vztahy (2) a (9) je objemový zdroj tepla určen vztahem (14).

$$q_v(r, z) = \sigma \cdot \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Modelové rovnice se řeší numericky diferenční metodou. Používá-li se při výpočtu teplotních polí zjednodušeného válcového modelu elektrody, tj. uvažuje se konstantní kontaktní plocha mezi elektrodou a plechem v čase, vznikají mezi vypočítanými a experimentálně zjištěnými hodnotami značné odchylky. Zavede-li se při výpočtu proměnná kontaktní plocha elektrody, tj. závislá na svařovacím proudu, svařovací síle a tloušťce svařovaného plechu, jsou výsledky výpočtů a experimentů v dobré shodě. Aby bylo možno ve výpočtech zahrnout i deformace povrchu plechu a zvětšování kontaktní plochy při vnikání elektrody do svařovaného materiálu, zjemňuje se v oblasti elektrodové špičky diferenční síť. Změna kontakt-

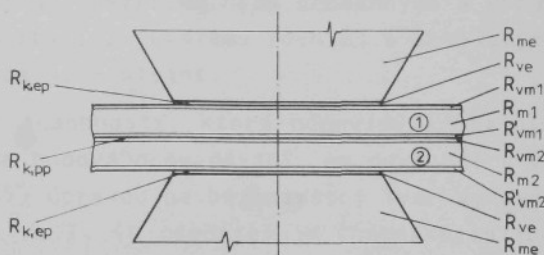
ních ploch se modeluje časově závislým posunem diferenční sítě. Generování sítě i její zjemnění se provádí automaticky, takže pro vstup je při výpočtech nutno zadat pouze obrysy plechu a elektrody [8].

Simulace svařovacího procesu výpočtovými programy se používá k náhradě a doplnění experimentálních programů, např. pro hodnocení vlivu programového průběhu svařovacího proudu na tvorbu svaru, nebo pro stanovení teplotních polí v elektrodách při studiu vlivu geometrie elektrody a podmínek chlazení elektrod. Výpočet teplotních polí při bodovém svařování je též nezbytným předpokladem pro výpočet svarových napětí. Výpočtem tepelných a zbytkových napětí v oblasti bodového svaru při svařování oceli X4CrNiMo1913 se zabývá práce [9]. Výpočet teplotních polí je vhodný také při modelování podmínek určujících změny v průběhu elektrických veličin při svařování, např. při návrhu kontrolních a řídicích systémů.

Výpočet teplotních a elektrických polí pro svařování pokovených ocelových plechů nebyl dosud proveden, neboť výpočet značně komplikuje uvažování reálného charakteru přechodových odporů a dějů probíhajících během svařovacího cyklu v oblastech styku elektrod s plechem a v oblasti styku obou plechů. Na schematickém obr. 5 jsou vyznačeny jednotlivé dílčí odpory, které by při výpočtu bylo nutno uvažovat. Stejně tak by se muselo uvažovat i roztavení povlaků a vytlačování kovu z povlaku během svařovacího procesu a to jak v místě dosedu elektrod, tak ve styku obou plechů. Při svařování zároveň pokovených ocelových plechů je nutno uvážit, že dílčí odpor povrchové vrstvy je složen z odporu vlastního povlaku a odporu difúzní vrstvy.

Matematické řešení ztěžuje i vytváření metalurgicky ovlivněné vrstvy na povrchu elektrody, která ve srovnání s výchozím stavem materiálu elektrody má výrazně jiné vlastnosti. O změnách, ke kterým dochází v povrchové vrstvě elektrody při svařování zároveň pohliníkováných plechů, se stručně pojednává v části 4.2.

S ohledem na uvedené skutečnosti a vzhledem k hlavním



Obr. 5. Složky elektrického odporu při svařování pokovených ocelových plechů

R_{me} - odpor materiálu elektrody, R_{ve} - odpor vrstev vytvořených na elektrodách, R_{vm} - odpor vrstvy nanesené 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

cílům disertační práce, bylo od matematického řešení teplotních a elektrických polí upuštěno a pozornost byla zaměřena na experimentální stanovení průběhu elektrických veličin během svařování.

2.2. Charakteristiky svařovacího procesu

Modelové rovnice uvedené v předcházející části mají významné využití při teoretickém rozboru bodového svařování a slouží k odvození kritérií podobnosti svařovacích procesů. V technologické praxi lze tohoto kritéria použít pro orientační přepočet parametrů svařování při změně vstupních podmínek (např. změna tloušťky plechu).

Z Buckinghamova teorému podobnosti vyplývá, že dva jevy jsou fyzikálně podobné pokud:

- a) jsou popsány stejnou diferenciální rovnicí (systémem rovnic) v kritériálním stavu,

b) číselné hodnoty bezrozměrných proměnných a konstant vystupujících v rovnici (systému rovnic) a okrajových podmínek jsou pro oba jevy stejné.

Kritéria podobnosti, která odpovídají hlavním svařovacími parametřům bodového svařování, se odvozují z rovnice vedení tepla (5) úpravou na bezrozměrný tvar vynásobením rovnice členem $L^2/a \cdot T_T$ (L představuje charakteristický délkový rozměr vzhledem ke geometrii spoje a T_T je teplota tání svařovaného materiálu). V případě bodového svařování se za charakteristický rozměr obvykle pokládá rozměr dosedací plochy elektrody D (s ohledem na převládající směr odvodu tepla). Rovnice (5) se po vynásobení vztahem $D^2/a \cdot T_T$ přepíše do tvaru (15) s novými proměnnými ϑ , τ , ρ , ζ .

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \rho^2} + \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \zeta^2} + \frac{J^2 D^2}{\sigma c \gamma c T_T} \quad (15)$$

Nové proměnné představují v rovnici vedení tepla následující kritéria:

$$\vartheta = \frac{T}{T_T} \quad - \text{bezrozměrná teplota}$$

$$\tau = \frac{a \cdot t}{D^2} \quad - \text{bezrozměrný čas (Fourierovo kritérium)}$$

$$\rho = \frac{r}{D} \quad - \text{bezrozměrný poloměr } r$$

$$\zeta = \frac{z}{D} \quad - \text{bezrozměrná souřadnice } z$$

Za předpokladu rovnoměrného rozdělení svařovacího proudu na ploše styku elektrody a svařovacího plechu se proudová hustota určí ze vztahu (16).

$$J = \frac{4 I}{\pi D^2} \quad (16)$$

Poslední člen rovnice (15) bude po dosazení J z rovnice (16) vyjadřovat energetické kritérium charakterizující účinek svařovacího proudu. Energetické kritérium je vyjádřeno rovnicí (17).

$$\mu^2 = \frac{l^2}{\sigma c \gamma D^2 a \tau_T} \quad (17)$$

Rovnice (5) přepsaná s novými bezrozměrnými proměnnými bude mít konečný tvar (18).

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \rho^2} + \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \zeta^2} + \mu^2 \quad (18)$$

Pro všechny fyzikálně podobné procesy bodového svařování budou mít proměnné z rovnice (18) stejnou hodnotu.

Obdobným postupem jak bylo uvedeno výše, lze upravit i počáteční a okrajové podmínky rovnice vedení tepla (5). Vzhledem k tomu, že zdroj ohřevu q_v , resp. μ^2 , je nenulový pouze během průchodu svařovacího proudu (tj. během svařovacího času t_s), dá se analogicky zavést i bezrozměrný svařovací čas vztahem (19). Platí, že pro $\tau > \tau_s$ je $\mu^2 = 0$.

$$\tau_s = \frac{a t_s}{D^2} \quad (19)$$

Z hlediska podobnosti deformačního působení je možné zavést také kritérium podobnosti pro působení svařovací síly F_s vztahem (20), kde σ_D představuje deformační odpor svařovaného materiálu během svařování.

$$K_F = \frac{4 F_s}{\sigma_D \pi D^2} \quad (20)$$

Vztahy (17), (19) a (20) jsou bezrozměrným vyjádřením tří hlavních svařovacích parametrů bodového svařování.

Pokud mají být svařovací děje podobné v celém rozsahu, je nutné formulovat i další podmínky podobnosti. Nejdůležitější z nich je geometrická podobnost, která je pro bodové svařování s uspořádáním geometrie podle obr. 4 vyjádřena kritériem ve vztahu (21). V praxi se však tento lineární

$$K_{geom} = \frac{s}{D} \quad (21)$$

vztah hodnot tloušťky plechu a průměru elektrody nepoužívá, neboť při svařování tlustých plechů by vedl k nutnosti použít příliš vysoký svařovací proud. V praxi se u nás i v zahraničí pro stanovení průměru elektrody používá vztah (22), který

$$D = 5 \sqrt{s} \quad (22)$$

je vhodným kompromisem mezi nutností s rostoucí tloušťkou plechu zvětšovat i průměr svaru a výkonovými možnostmi svařovacích strojů a energetické sítě. O dalších podmínkách podobnosti elektrických a mechanických dějů pojednává práce [7].

Systém uvedených kritérií podobnosti svařovacích procesů platí přesně jenom pro lineární soustavy, pro svařování však mají zásadní význam nelinearity systému způsobené teplotní závislostí vlastností svařovaných materiálů. V praktických podmínkách nelze dokonalou podobnost svařovacích procesů zajistit. Svařuje se na různých strojích s různými elektrodami, výchozí materiál má různý tvar a rozměry, z hlediska startu svařovacího procesu je velmi důležitá i otázka stavu povrchu plechu. Zvlášť vážným porušením podmínek podobnosti je nedodržení geometrické podobnosti, tj. konstantního poměru s/D . Používá-li se pro stanovení rozměru elektrody vztah (22), je nutno podmínky podobnosti pro hlavní svařovací parametry korigovat.

Budeme-li předpokládat, že při svařování se termofyzikální vlastnosti γ , c , a , ρ v procesu svařování nebudou měnit a za charakteristický rozměr L opět použijeme průměr elektrody D (v případě, že lze zajistit geometrickou podobnost), potom jsou výrazy pro energetické kritérium a svařovací čas definovány rovnicemi (23) a (24).

$$\mu = \text{konst.} \cdot \frac{I_s}{D} \quad (23)$$

$$\tau_s = \text{konst.} \cdot \frac{t_s}{D^2} \quad (24)$$

V energetickém kritériu je nositelem proměnlivosti výraz I_s/D nazývaný intenzita svařovacího procesu [10].

Pro určení kritéria svařovacího času se může do vztahu (24) zahrnout i vliv tloušťky plechu na průchod elektrického proudu svařovaným materiálem. Skutečný odpor materiálu R je menší než odpor válcové části R_0 ležící pod kontaktní plochou elektrody vlivem rozšiřování oblasti průchodu proudu. S rostoucí tloušťkou plechu je rozšíření oblasti průchodu proudu větší. Pokles napětí se vyjádří vztahem (25)

$$\alpha = \frac{R}{R_0} \quad (25)$$

a při zahrnutí do vztahu pro výpočet kritéria svařovacího času získáme vztah (26)

$$\tau_s = \text{konst.} \cdot \frac{t_s \alpha^2}{D^2} \quad (26)$$

Součinitel α se stanovuje jako funkce poměru D/s .

Požadavky na změny svařovacích parametrů při změnách vstupních podmínek vystihují reálně kritéria určená vztahy (23) a (26). Z kritérií určených vztahy (23), (26) a (20) vyplývá, jakými zásahy lze efektivně kompenzovat příčiny změn kvality svarových spojů. Přehled nejčastějších příčin změn kvality svarů a veličin vhodných pro jejich kompenzaci je v tabulce 1.

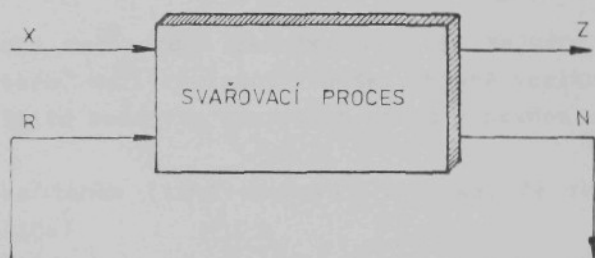
I když svařovací proud a svařovací čas jsou spolu vázané ve vztahu (1) pro odporový ohřev, nestačí pro vyrovnání vnějších poruch řídicím systémem v dostatečně širokém rozmezí kompenzace rušivých vlivů pouze jedním z obou parametrů. Pokud má řídicí systém pracovat bez závažného porušování podmínek podobnosti svařovacích procesů, musí se současně řídit svařovací proud i svařovací čas.

Tabulka 1. Přehled nejčastějších příčin změn kvality bodových odporových svarů a veličiny vhodné pro jejich kompenzaci [7]

Zdroje změny kvality	Řízené veličiny
kolísání síťového napětí	svařovací proud
kolísání přitlačné síly	svařovací proud
odbočování proudu	svařovací proud
svařování na okraji plechu	svařovací čas
znečištěný povrch plechu	svařovací proud
změna tloušťky plechu	svařovací čas
změna počtu plechů	svařovací čas
špatný dosed plechů	svařovací čas
opotřebení elektrod	svařovací proud a čas
změna materiálu	svařovací proud a čas

3. HODNOCENÍ KVALITY ODPOROVÝCH BODOVÝCH SVARŮ

Kvalita svarového spoje je určena souborem užitkových vlastností umožňujících jeho provozní využití. Je to jedna ze složek výstupu svařovacího procesu a s ohledem na řadu kritérií hodnocení ji lze vyjádřit jako vícesložkový vektor $Z_1 = (d_{sv}, d_c, h_c, F_{max} \dots)$. Výstupní veličiny se rozdělují na podstatné pro funkci systému (Z) a na vedlejší účinky (N) a obdobné rozdělení je účelné i pro vstupní veličiny, podstatné pro funkci systému jsou označeny (X) a rušivé vlivy (R). Při představě svařovacího procesu jako černé schránky je uvedený přístup na obr. 6.



Obr. 6. Představa svařovacího procesu jako černé schránky

Kvalitu svarových spojů je nutno posuzovat komplexně v souladu s požadovanými vlastnostmi svarků. Pro hodnocení kvality se musí stanovit vhodná kritéria a pro jejich zjištění vhodné metodické postupy. Kritéria kvality svarových spojů mají umožnit jejich jednoznačnou klasifikaci na vyhovující a nevyhovující.

Kvalita bodových svarů se hodnotí různými destruktivními i nedestruktivními zkouškami, které více či méně objektivně postihují výsledný efekt svařovacího procesu. Vhodný rozsah a způsob hodnocení kvality závisí především na účelu prováděných zkoušek a na podmínkách provozu svarků.

3.1. Destruktivní zkoušky

Destruktivní zkoušky bodových svarových spojů se obvykle dělí na:

- mechanické,
- technologické,
- metalografické hodnocení.

Mechanickými zkouškami se získávají základní údaje o únosnosti svarových spojů, které slouží především pro pevnostní výpočet. Podle charakteru působení zátěžových sil se mechanické zkoušky dělí na statické a dynamické. V praxi se používají hlavně statické zkoušky, neboť dynamické zkoušky jsou časově náročné a zařízení pro jejich realizaci jsou hůře dostupná.

Statické mechanické zkoušky se liší zejména ve způsobu namáhání svaru. Mezi základní zkoušky, které vcelku objektivně hodnotí kvalitu bodových svarových spojů 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 tahem je nejčastěji používanou zkouškou pro hodnocení jakosti bodových i švových přeplátovaných spojů. Jak již bylo uvedeno, je označována různými názvy. Princip zkoušky je zřejmý z obr. P-3 [11]. 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 se u nás používá normalizovaná zkouška podle ČSN 05 1122 [12].

Zkouška tahem na vytržení svaru může mít různé provedení tak, jak je vidět na obr. P-4 [11]. Při zkoušce se opět vyhodnocuje maximální únosnost svaru, po provedení zkoušky se posoudí vzhled lomu a stanoví rozměr svaru. Deformace

plechu v okolí svaru mohou u velmi tenkých plechů při použití tělesa tvaru U zkreslit výsledky zkoušky. Tato nevýhoda se částečně odstraní použitím miskového tvaru zkušební tělesa.

Na vytržení je svarový spoj namáhán i při křížové zkoušce. Provedení křížové zkoušky je schematicky znázorněno na obr. P-5 |13|. 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 zkušební tělesa.

Zkouška kroucením je schematicky znázorněna na obr. P-6 |11|. Používá se málo, neboť reprodukovatelnost výsledků zkoušky je obtížná. Při zkoušce se stanovuje krouťící moment potřebný na porušení spoje. Po porušení vzorku se posuzuje vzhled lomu, orientačně se určuje průměr svaru a protavení spoje. Zkouškou kroucením se zabývají dva dokumenty IIW z roku 1984, a to doc. III-771-84 "Vyhodnocení zkoušky kroutem pro odporové bodové svary" a doc. III-797-84 "Zkušební metody pro zkoušky bodových svarů v kroucení a rozptyl výsledků".

Technologické zkoušky zatím u nás nejsou normalizované. Používají se hlavně pro periodickou a namátkovou kontrolu svarů ve výrobním procesu a při seřizování svařovacího stroje. Předností těchto zkoušek je jednoduchost provedení, aplikace běžných dílenských prostředků, zařízení a jednoduchých přípravků. K nejdůležitějším technologickým zkouškám patří dílenská zkouška sekáčem a odlupovací zkoušky.

Zkouška sekáčem je nejběžnější technologickou zkouškou a její provedení je na obr. P-7. Zkouška velmi rychle a snadno umožní identifikaci tzv. difúzních spojů a nadměrnou křehkost svarů.

Odlupovací zkoušky mohou poskytnout cenné informace o chování svarových spojů v podmínkách blízkých provozním. Jejich princip je obdobný jako u dílenské zkoušky sekáčem. Odlupovací zkoušky jsou však objektivnější. Základní způsoby provedení odlupovací zkoušky jsou na obr. P-8 |11|. Podle do-

kumentu IIW [14] se rozměr svaru určuje odlupovací zkouškou, jejíž provedení je na obr. P-9. Na obrázku je také zkušební vzorek s vyznačením postupu svařování.

Rozměry vzorků a umístění svarů pro odlupovací zkoušku podle předpisu Ford Motor Company BA 13-4 "Zkoušky odporové bodové svažitelnosti pro vysokopevnostní nízkolegované oceli" uvádí obr. P-10 [13].

V rámci práce [15] se ověřovala odlupovací zkouška pro hodnocení kvality svarů v souvislosti s hodnocením životnosti elektrod při svařování pohliníkováných ocelových plechů. Zkouška se prováděla na trhacím stroji u vzorku s tvarem podle obr. P-11. Při zkoušce se hodnotil především charakter porušení vzorku, tj. zda se poruší svar nebo základní materiál v oblasti kolem svaru.

Odlupovací zkoušky mají výhodu v tom, že umožní odhalit studené spoje a lze při nich posoudit i vlastnosti teplem ovlivněné oblasti. Tato skutečnost je důležitá pro hodnocení svarových spojů pokovených ocelových plechů. Při zkoušce tahem mohou totiž svarové spoje u těchto plechů vykazovat dobré výsledky, ale při odlupovací zkoušce se zjistí nevyhovující výsledky [16, 17]. Především u malých svarů vzniká kolem svarové čocky oblast, ve které dojde ke spojení "pájením" pájkou z roztavené povrchové ochranné vrstvy. Takové svary jsou nevyhovující a mohou se porušit i v případě náhodného nárazu výrobku.

Metalografické zkoušky odporových bodových svarových spojů doplňují v odůvodněných případech obvyklé mechanické a technologické zkoušky. Metalografické výbrusy se připravují běžnými postupy.

Při metalografickém hodnocení se posuzuje makrostruktura i mikrostruktura spoje a hodnocení poskytuje přehled o:

- strukturní stavbě svarového spoje,
- strukturní stavbě teplem ovlivněné oblasti,
- charakteru okolní zóny svarové čocky ve styku svařovaných plechů,
- homogenitě a celistvosti svaru (trhliny, plynové dutiny, staženiny apod.).

- rozměrech a tvaru svarové čochky,
- velikosti vtisku elektrod.

Metalografický rozbor svarových spojů se provádí především při vývoji technologie bodového odporového svařování nových materiálů a pro posouzení příčin vzniku vad svarových spojů.

3.2. Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkušební metody umožňují posoudit kvalitu svarových spojů bez porušení spoje. Jsou vhodné pro namátkovou i 100 % kontrolu svarových spojů při výrobě značně namáhaných a důležitých dílců v automobilovém, leteckém a raketovém průmyslu.

Nedestruktivní zkoušky svarových spojů slouží na zjišťování vnějších i vnitřních vad svarů a obvykle se dělí na:

- vizuální - tj. optickou kontrolu povrchu svaru a metody kapilární,
- fyzikální - magnetoinduktivní, elektroinduktivní, akustické a magnetoakustické, radiografické, ultrazvukové, metodu vířivých proudů.

Při optické kontrole povrchu bodových odporových svarů lze posoudit velikost a hloubku vtisku elektrody a vady povrchu svaru (tj. natavení povrchu materiálu, výstřik z povrchu materiálu apod.).

Z dalších uvedených nedestruktivních zkoušek se pro hodnocení bodových svarů používá ve větším rozsahu především ultrazvuková kontrola. Čelní ultrazvukové sondy se používají v případě, kdy svařované plechy mají tloušťku větší než 3 mm. Sondy mají průměr srovnatelný s rozměry svarové čochky a při hodnocení lze rozlišit svary kvalitní a svary s vnitřními vadami (trhliny, staženiny). Úhlové sondy umožňují kontrolu bodových

svarů plechů s tloušťkou od 1 mm. Ke zkouškám se používají dvě úhlové sondy, z nichž jedna pracuje jako vysílací a druhá jako přijímací, nebo obě sondy současně plní obě funkce. Pro kontrolu bodových svarů se používá i průchodová metoda prováděná ve svařovacím stroji. Vysílací a přijímací sondy jsou umístěny přímo v elektrodách. Schéma průchodové metody je na obr. P-12 [18]. Ultrazvuková kontrola svaru je součástí svařovacího cyklu a může být spojena s optickou a akustickou signalizací. Nevyhovující svary se mohou ve stroji ihned opravit.

Poměrně novou metodou zkoušení svarů je metoda založená na principu měření elektrického odporu v místě svaru [19,20]. Odporová sonda s individuálně odpruženými snímacími hroty se přitiskne na povrch vtisku po elektrodách a do svaru se vyšlou impulsy stejnosměrného proudu. Výsledný pokles napětí ve svaru 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 zkoušeného svaru (V_w) je na obr. P-13 a na obr. P-14 je graf závislosti únosnosti svaru stanovené smykovou zkouškou na poměru V_w/V_m [19].

Podle údajů, které uvádí HAIN [20] je použití odporové 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 postupné rozšíření její praktické aplikace.

Zvláštní postavení mezi metodami nedestruktivního hodnocení bodových odporových svarů mají metody monitorování kvality svaru na základě sledování a vyhodnocování charakteristického průběhu veličin svařovacího procesu. O těchto metodách pojednává část práce 5.

4. ŽIVOTNOST ELEKTROD

V průběhu svařování se postupně opotřebovává pracovní část elektrod, a tím se mění podmínky pro vytváření svarových spojů i jejich kvalita. V důsledku elektrického, tepelného, metalurgického a mechanického namáhání se mění vlastnosti (fyzikální i mechanické) a geometrie pracovní části elektrod i celkový stav povrchu pracovní plochy elektrod.

Definovat jednoznačně pojem životnosti elektrod předpokládá stanovit i jednoznačná kritéria hodnocení kvality svaru. Pro praxi je důležitým údajem při vytváření nosných svarů počet svarů, u kterých dosáhneme vytvoření pravidelné svarové čocky určité minimální velikosti a s dostatečnou únosností. Problematická zde zůstává právě otázka minimální přípustné velikosti svarové čocky. Velikost svarové čocky souvisí s průměrem pracovní plochy elektrody a tak SVÍTIL v [21] doporučuje definovat použitelnou životnost jako počet bodů, které mají pravidelnou svarovou čocku o průměru větším nebo rovném dosedacímu průměru pracovní plochy elektrody. Podle IIW doc. III-536-78 se za konec životnosti elektrod pokládá pokles průměru svaru pod 80 % počátečního průměru, přičemž počáteční průměr svaru se má rovnat průměru pracovních ploch nových elektrod. Za přijatelnou velikost svaru se při vyhodnocování kontrolních systémů bodového svařování pokládal v práci [22] rozměr svaru v rozmezí $(3-5) \cdot \sqrt{s}$ (s je tloušťka plechu v mm). S uvedeným přístupem k hodnocení životnosti elektrody je v souladu i definice, kterou uvádí SITTE [23]. SITTE definuje životnost jako počet bodů, které lze elektrodou svařit bez úpravy pracovní části elektrody a změn svařovacích parametrů, aniž by se znatelně zhoršila kvalita svaru.

Pokud hlavním účelem bodového svaru bude 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. SVÍTIL [21] označuje tento počet svarů jako celkovou životnost.

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

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

Přehled jednotlivých faktorů ovlivňujících životnost elektrod je na obr. P-15 [24]. Výrazný vliv na životnost elektrod mají samozřejmě také hlavní svařovací parametry bodového svařování. Svařovací čas a proud ovlivňují elektrické, tepelné a také metalurgické namáhání elektrody. Svařovací síla, tlumení dosedu elektrod a doba dotlaku ovlivňují především mechanické namáhání. Tyto skutečnosti nejsou v převzatém obr. P-15 zachyceny. Pro uživatele elektrodových materiálů je znalost dílčích faktorů, kterými může ovlivňovat životnost elektrod, z technologického i technicko-ekonomického hlediska velmi důležitá.

Vzhledem ke skutečnosti, že životnost elektrod závisí na mnoha faktorech, lze poměrně obtížně porovnávat práce různých autorů, neboť ne vždy se uvádějí všechny podmínky provedených experimentů. Rovněž přístup k hodnocení životnosti elektrod může být různý. Metodikou hodnocení životnosti elektrod se zabývá MUCHA [25, 26].

4.1. Životnost elektrod při svařování žárově pohliníkových ocelových plechů

O bodovém odporovém svařování žárově pohliníkových ocelových plechů existuje v odborné literatuře málo údajů. V naší odborné literatuře uvádí některé základní údaje o svařování plechů typu fal od fy Thyssen ŠIMŮNEK [27].

KRAUSE [28] se zabýval hodnocením životnosti elektrod při svařování oboustranně pohliníkových ocelových plechů tl. 0,8 mm. Technologické parametry zkušebních sérií jsou na obr. P-16 a v tabulce P-1. Při experimentech se používaly dva svařovací stroje označené A a B (parametry stroje A: $F_s = 1$ až 30 kN, $I_{\max} = 44$ kA, napětí naprázdno $U_0 = 5, 10$ V ; para-

metry stroje B: $F_s = 0,5$ až $3,5$ kN, $I_{\max} = 14$ kA, napětí na-prázdkno $U_0 = 1-4$ V). Svařovací proud byl na začátku experimentů nastaven těsně pod hranicí výstřiků roztaveného kovu a kadence se pohybovala v rozmezí 10 až 50 svarů za minutu. U V. zkušební série byl po poklesu průměru svarů (včetně adhezní oblasti) na 80 % původní hodnoty obnoven průměr dosedací plochy elektrody na 5,8 mm soustružením boku kuželů.

Výsledky experimentů jsou graficky zpracované na obr. P-17. Za konce životnosti elektrod se u zkušebních sérií I. až VII. pokládal pokles jednoho z následujících kritérií o 30% proti výchozím hodnotám:

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

U čepových elektrod se svařovalo až do opotřebené čepu, i když byly mezní hodnoty podle uvedených kritérií překročeny.

Podle krouticího momentu a úhlu krutu jsou svary 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. Z uvedených výsledků je zřejmé, že nejvyšší životnost měly elektrody čepové. U čepových elektrod se využívá efektu postupného obnovování pracovní plochy elektrody odtlačením ovlivněného materiálu elektrody do otřepu. Za závažnou okolnost lze pokládat údaj o použité svařovací kadenci v rozmezí 10 až 50 svarů za minutu. Svařovací kadence totiž výrazně ovlivňuje životnost elektrod a na základě literárních údajů např. v práci [21] lze takto uvedené rozmezí pokládat za okolnost snižující porovnatelnost výsledků.

Hodnocením činnosti elektrod a posouzením různých kritérií hodnocení životnosti elektrod se zabývají také práce [4, 5, 15]. V rámci těchto prací byla provedena řada zkušebních sérií pro orientační ověření životnosti přímých vsazovaných elektrodových špiček C 16 ON 05 2675.2 [29] z materiálu podle ON 42 3039.71 [30] s různou geometrií pracovní části při svařování oboustranně pohliníkováného plechu tloušťky 0,8 mm.

Přehled výsledků provedených experimentů je v tabulce P-2. Výsledky jsou v dobrém souladu s experimenty, které provedl KRAUSE [28]. Nejvyšší celkovou životnost měly čepové elektrody v souboru označeném č. 16, kde se podařilo vhodnou volbou svařovacích parametrů a geometrie pracovní části elektrod vytvořit podmínky pro samočinnou obnovu pracovní plochy elektrod. Pro takový stav je nezbytné, aby svařovací parametry byly na hranici výstřiku tekutého kovu.

Z výsledků experimentálních prací vyplývá, že životnost elektrod z klasického elektrodového materiálu na bázi slitiny Cu-Cr je při bodovém svařování žárově pohliníkových plechů nízká a výrazně závislá na použitých svařovacích parametrech. U čepových elektrod lze dosáhnout nejvyšší životnosti, je však nutno uvážit i použití většího průměru pracovní části elektrod ve srovnání s doporučeným průměrem pro příslušnou tloušťku plechu (vznikají svary s větším průměrem). Zároveň se musí počítat s velkým počtem výstřiků, pokud chceme udržet podmínky pro samočinnou obnovu pracovní plochy elektrod.

Zvýšená pozornost se věnuje elektrodovým materiálům na bázi mědi zpevněné jemně dispergovanými částicemi oxidu Al_2O_3 (nebo Zr, Th). Tyto materiály mají dobrou elektrickou vodivost, pevnost a tvrdost. Při zkouškách životnosti, resp. opotřebení elektrod, vykazují v porovnání s klasickými materiály pozoruhodné výsledky [31, 32, 33]. V novějších publikacích se však další údaje o těchto materiálech neuvádějí.

Příznivé výsledky se dosahují také při použití molybdenové slitiny označované TZM (0,05 Ti, 0,08 % Zr, zbytek Mo), která se ve formě špičky připájí na elektrodu ze slitiny mědi [21].

4.2. Metalurgické zvláštnosti při svařování ocelových plechů s kovovými povlaky

Při bodovém odporovém svařování pokovených ocelových plechů (např. Zn, Al, Pb, Cd, Al+Si, Al+Zn atd.) se setkáváme s určitými metalurgickými zvláštnostmi, které je nutno respektovat při návrhu metodiky hodnocení jakosti svarových spojů i při hodnocení životnosti elektrodových špiček.

V místě dosedu elektrod dochází během svařování k natavení povlaku a k vytlačování roztaveného kovu na obvod vtisku. Probíhá intenzivní metalurgické ovlivňování pracovní plochy elektrody, mění se elektrické i mechanické vlastnosti elektrody a nastává mechanické poškození pracovní části elektrod vlivem "nalepování" na svařovaný materiál a jejich následného odtržení od svařovaného materiálu po skončení svařovacího procesu.

Metalurgicky ovlivněná vrstva na pracovní ploše elektrod se vytváří velmi rychle a již po svaření několika svarů se změni podmínky pro průchod elektrického proudu. KRAUSE [28] uvádí, že při svařování pohliníkových ocelových plechů se ustálí podmínky průchodu proudu po svaření 3 až 10 svarů. O mechanismu vytváření ovlivněné vrstvy na pracovní ploše elektrody při svařování ocelových plechů s kovovými povlaky pojednávají DYCHNO a PUGAČEV v práci [34].

Na obr. P-18 jsou výsledky kvantitativní mikroanalýzy vrstvy na pracovní ploše elektrody po svaření cca 5000 svarů ocelového plechu s povlakem Al+ 8 až 10 % Si. Na povrchu pracovní plochy byl obsah Al 58 %, Fe 33 %, Si 2,8 % a obsah Cu pouze 5 %. Výrazné změny chemického složení v pracovní části elektrod vedou samozřejmě k změnám mechanických vlastností. Na obr. P-19 je průběh tvrdosti v oblasti pracovní části elektrod po svaření cca 5000 svarů plechů žárově pozinkovaných, žárově pohliníkových a elektrolyticky pozinkovaných. V metalurgicky ovlivněné vrstvě výrazně stoupá tvrdost a v teplem ovlivněné části tvrdost klesá ze 130 až na 80 HV. Vzhledem k uvedeným skutečnostem se doporučuje při obnově pra-

covní části elektrod upravit pouze průměr pracovní plochy opracováním boku kužele elektrody [35].

Metalurgicky ovlivněná vrstva má tloušťku přibližně 0,02 až 0,03 mm a s rostoucím počtem svařených bodů se nezvětšuje, neboť vlivem pracovních podmínek se stále narušuje a postupně 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 [4, 5, 36].

RIVET a WESTGATE [37] uvádějí jako hlavní mechanismus opotřebení elektrod erozi mědi hliníkem lpícím na povrchu elektrody.

V důsledku specifických pracovních podmínek se elektrody při svařování ocelových plechů s kovovými povlaky intenzivně opotřebovávají i při nízké kadenci. Pokud se svařuje s pevně nastavenými svařovacími parametry, potom se s rostoucím počtem vytvořených svarů poměrně rychle zhoršuje jakost svarů [6]. S rostoucím opotřebením pracovní části elektrod se mění také rozsah i charakter poškození povlaku v místě dosedu elektrod. Při svařování novými elektrodami vzniká ostře ohraničený vtisk a z místa vtisku je kov z povlaku prakticky vytlačen a vytváří kolem vtisku 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 vytvářejí otřepy. V místech odpovídajícím poloze kráterů na pracovní ploše elektrod se na ploše vtisku vyskytují vyvýšená místa vytlačeného kovu z povlaku. Porovnání vtisků při svařování novou a opotřebovanou elektrodou je na obr. P-20. Charakter a rozsah poškození povlaku má význam z hlediska snížení jeho ochranné funkce. BRÚZDA [38] uvádí, že poškození povlaku z čistého hliníku je při svařování menší než poškození povlaku na bázi slitiny Al+ 8 až 10 % Si. V uvedené práci není tato otázka blíže diskutována, je však zřejmé, že výrazný vliv zde

bude mít rozdílná teplota tání povlaku.

Při svařování ocelových plechů s kovovými povlaky má bodový svar dvě charakteristické oblasti:

- svarovou čočku (tj. oblast ocelového plechu natavenou v průběhu svařovacího procesu)
- oblast přilnutí plechů, tzv. adhezní oblast, kterou KRAUSE [28] označuje termínem "Haftzone".

V adhezní oblasti svaru se při svařování nataví pouze povlak a roztavený kov je účinkem svařovací síly z větší části vytlačen. Charakter svaru je schematicky nakreslen na obr. P-21.

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

Uvedené metalurgické jevy mají vliv na celkové vlastnosti svarového spoje. Rozhodující vliv má velikost a tvar svarové čočky i charakter okolní zóny svarové čočky v místě styku svařených plechů. Charakter a vlastnosti okolní zóny svarové čočky jsou závislé na svařovacích parametrech a na stavu opotřebení pracovní části elektrody [6]. Z hlediska únavových vlastností svarových spojů a korozní odolnosti svarů budou velmi důležité plastické vlastnosti adhezní oblasti.

5. REGULACE A ŘÍZENÍ ODPOROVÉHO BODOVÉHO SVAŘOVÁNÍ

Kvalita bodového svaru je závislá na velkém počtu faktorů a svařovací proces má stochastický charakter. U jednotlivých svarů, nebo série svarů, může působením různých rušivých vlivů a pozvolných změn parametrů svařovacího procesu vzniknout nepřípustné zhoršení kvality, i když podle nastavených svařovacích parametrů lze očekávat vytvoření svarů kvalitních.

Pro odporové bodové svařování je specifické, že za obvyklých provozních podmínek je prakticky nemožné zajistit průběžnou kontrolu jakosti vznikajících svarů. Systémy sledování a řízení jakosti svaru mají proto pro odporové bodové svařování vzhledem k současným trendům rozvoje automatizace i robotizace svařovacích pracovišť velký význam.

Klasifikaci automatizační úrovně svařovacích procesů navrhl HOULDCROFT [39] v deseti stupních a JANOTA [40] navrhl modifikaci tří nejvyšších stupňů takto:

- automatické svařování s monitorováním kvality,
- automatické svařování s monitorováním kvality a s adaptivní úpravou parametrů následující operace podle výsledků operace časově předcházející,
- automatické svařování s plně automatickou kontrolou kvality, řízením procesu se zpětnou vazbou od kontroly kvality a se samooptimalizujícím (adaptivním) výběrem svařovacích podmínek

Technický vývoj potvrdil správnost takto modifikované klasifikace.

Dokument IIW [41] definuje kontrolní (monitorovací) a řídicí (korekční) systémy následujícím způsobem:

"Monitor kvality" - je zařízení, které sleduje jeden nebo více kritických parametrů během svařovacího cyklu a po automatickém vyhodnocení těchto parametrů indikuje kvalitu svaru.

"Automatický systém korekce kvality" - je zařízení, které sleduje jeden nebo více kritických parametrů během svařo-

vacího cyklu, vyhodnocuje tyto parametry a výstup vyhodnocení využívá na udržování kvality svaru za proměnlivých vnějších podmínek.

Blokové schéma hlavních částí monitorů (nemají výkonové členy) a korekčních systémů je na obr. P-22 [7].

Z uvedeného obrázku je zřejmé, že pro oba typy zařízení je rozhodující stanovení a měření veličin svařovacího procesu, které jsou schopny poskytnout informace o vytvářeném svaru. Měřitelné veličiny, tzv. parametry procesu, rozdělil COOK [42] do tří skupin. Pro případ odporového svařování rozlišuje JANOTA [7]:

- a) Přímé parametry svaru - jsou to veličiny, popisující vlastnosti hotového svaru tj. jeho geometrii, pevnost, tvrdost, výskyt trhlin, porozitu apod. Přímé parametry určují kvalitu svaru.
- b) Nepřímé parametry svaru - zahrnují konvenční svařovací parametry, jako jsou svařovací proud, svařovací čas, svařovací síla, materiál a geometrie elektrod, teplota a průtok chladicí vody apod.
- c) Přechodné nepřímé parametry svaru - představují obecně reakci systému na průběh svařovacího procesu a jsou zdrojem informací o tvorbě svaru. Jedná se např. o rozměry natavené oblasti, útlum ultrazvukového signálu procházejícího svarem, infračervené záření svaru, akustická emise svaru, teplota v různých místech spoje apod.

Veličiny, které jsou zdrojem informací o vytváření svařového spoje se podle charakteru rozdělují na mechanické a fyzikální (elektrické a ostatní fyzikální). V souladu s tímto členěním je účelné rozdělit systémy sledování a řízení bodového odporového svařování na:

1. Systémy využívající měření a vyhodnocování mechanických veličin a neelektrických fyzikálních veličin,
2. Systémy využívající měření a vyhodnocování elektrických veličin,

3. Systémy využívající různé kombinace elektrických a neelektrických veličin a systémy využívající statistické modely.

5.1. Systémy s měřením a vyhodnocováním neelektrických veličin

Při bodovém odporovém svařování nastávají v důsledku ohřevu materiálu objemové změny, které se projeví změnou tloušťky materiálu mezi elektrodami. Tento jev se obvykle nazývá tepelná expanze svaru. Tepelná expanze svaru způsobuje relativní pohyb elektrod a ten lze měřit, registrovat a vyhodnocovat. Relativní pohyb elektrod se ve skutečnosti skládá z vlastní tepelné expanze svaru (s rostoucí teplotou roste) a ze zatlačování elektrod do ohřátého svařovaného materiálu (opačný pohyb než průběh vlastní tepelné expanze svaru). Vlastní tepelná expanze je výsledným projevem lineární tepelné roztažnosti materiálu ve směru osy elektrod, přírůstků tloušťky způsobené objemovou expanzí materiálu, jež se nemůže realizovat v rovině plechu (působí proto ve směru osy elektrod) a přírůstků tloušťky ve směru kolmém na plech od přírůstku objemu ve fázi tavení materiálu [7, 43]. Charakter dílčích složek tepelné expanze svaru a měřitelného relativního pohybu elektrod je na obr. P-23 [7].

Řada experimentálních prací potvrdila, že tepelná expanze svaru poskytuje závažné informace o průběhu svařování a velikosti svarové čočky. Na principu sledování maximální hodnoty tepelné expanze svaru, nebo rychlosti růstu tepelné expanze, již bylo vyvinuto mnoho různých kontrolních a řídicích systémů. Souvislost mezi tvorbou svarové čočky a tepelnou expanzí svaru využil při návrhu kontroly a řízení bodového svařování PAČENCEV [44] a pro kontrolu a řízení švového svařování BABKIN a GORSKIJ [45]. První sériově vyráběné zařízení pracující na principu vyhodnocování tepelné expanze svaru byl monitor BWRA (British Welding Research Association), který byl

úspěšně použit při indikaci kvality bodových svarů nízkouhlíkové oceli, nerezavějící oceli a hliníku. Systém využívá pro hodnocení kvality svaru času (impuls monitoru), za který se dosáhne určitá velikost tepelné expanze. Obvykle se vyhodnocuje doba, za kterou se dosáhne 30 % z maximální možné hodnoty roztažnosti [46]. Čím větší je impuls monitoru, tím menší je svar. KELLY a KNOWLSON v [17] popisují úspěšné nasazení monitoru BWRA při svařování ocelových plechů pozinkovaných ponorem v lázni i pozinkovaných elektrolyticky. RODEN v [47] porovnává tento systém s dalšími monitory při svařování nerezavějících ocelí typu 301 a 321. RODEN v [47] a JOHNSON v [46] uvádějí i řadu nedostatků, které systém BWRA vykazuje.

KRAUSE a LEHMKUHL [48] popisují řídicí systém založený na principu vyhodnocování průběhu amplitudy rychlosti nárůstu tepelné expanze svaru při svařování střídavým proudem. Na základě kontinuálního měření amplitud rychlosti se řídí velikost svařovacího proudu změnou fázového posunu. Zásah se provádí se zpožděním 20 ms, pokud se svarová čočka nevyvíjí podle předpokladu. Citovaná práce neuvádí, zda systém byl ověřen i pro svařování ocelových plechů s povlaky.

Hlavním nedostatkem kontrolních a řídicích systémů pracujících na principu sledování absolutní hodnoty určitého parametru z časového průběhu tepelné expanze svaru (např. maximální hodnota tepelné expanze, časový interval mezi dvěma hodnotami tepelné expanze, tj. hodnota úměrná rychlosti tepelné expanze) je příliš velká citlivost na změnu vnějších podmínek např. tloušťka materiálu, geometrie elektrod, kvalita materiálu.

Pro řízení bodového odporového svařování poskytuje však sledování tepelné expanze svaru přesto značné potenciální možnosti, pokud se posuzují kvalitativní znaky průběhu měřené veličiny a ne její absolutní hodnoty. Výzkum při sledování průběhu tepelné expanze svarů prokázal, že nejvýhodnější okamžik na přerušení svařovacího proudu je indikován dosažením maxima na křivce tepelné expanze svaru. Průměrná strmost průběhu tepelné expanze svaru charakterizuje použitý svařo-

vací proud vzhledem k podmínkám vzniku konkrétního bodového svaru [43].

Na principu sledování teplotní expanze svaru byl ve VÚZ v Bratislavě vyvinut systém s označením VÚZ-AUTOSET TE [7, 49, 50, 51]. Schéma funkce tohoto systému je na obr. P-24 [7]. Svařovací proud má v počáteční fázi řízený svahový nárůst až do okamžiku, kdy rychlost tepelné expanze (dTE/dt) dosáhne předem nastavenou hodnotu, nebo do okamžiku, kdy se dosáhne na křivce tepelné expanze inflexního bodu (první derivace tepelné expanze dosahuje maxima, druhá derivace prochází nulou). Tím se dosáhne odpovídající intenzita svařovacího procesu a další nárůst svařovacího proudu se přeruší. Ve fázi svahového nárůstu proudu je dorazem blokována maximální dosažitelná hodnota svařovacího proudu (I_m).

Po přerušení svahového nárůstu proudu se svařuje dál za konstantního nastavení svařovacího proudu až do okamžiku, kdy se dosáhne maxima na křivce tepelné expanze svaru. Ukončení svařovacího procesu je navíc blokováno maximálním svařovacím časem (t_m).

Volba a nastavení hodnoty rychlosti tepelné expanze svaru (dTE/dt), při které dojde k přerušení nárůstu svařovacího proudu rozhoduje o tvrdosti svařovacího režimu. Tvrdost svařovacího režimu lze měnit různým nastavením počáteční hodnoty proudu na začátku svahového nárůstu a nastavením strmosti svahového nárůstu. Vzhledem k tvrdosti svařovacího režimu musí být odpovídajícím způsobem stanovena i svařovací síla.

Měření tepelné expanze svarů se s úspěchem realizuje zejména na stabilních bodových svařovacích strojích. U svařovacích kleští nelze mechanické veličiny snímat vzhledem k malé tuhosti ramen a často i omezenému pracovnímu prostoru. Ověřováním technologických vlastností systému VÚZ-AUTOSET TE při svařování ocelových plechů se prokázalo, že systém úspěšně koriguje kolísání napětí sítě, změnu přítlačné síly, odbočování proudu sousedním svarem, změnu tloušťky a počtu svařovaných plechů, změnu průměru elektrod a špatný dosed plechů. Při svařování rzi znečištěných plechů se zvyšuje rozptyl únosnosti svarových spojů [7, 52].

Pro svařování pozinkovaných plechů se používá upravená varianta s označením VÚZ-AUTOSET TE-Zn [7, 50, 51]. Schéma funkce tohoto systému je na obr. P-25 [7]. Od systému VÚZ AUTOSET TE určeného pro čistý ocelový plech, se liší ve dvou funkcích. V počáteční fázi svařovacího procesu se musí přeblokovat první maximum na křivce tepelné expanze vznikající v důsledku roztavení a vytlačování kovu povlaku v místech dosedu elektrod a styku svařovaných plechů. Tato fáze svařovacího cyklu probíhá za konstantně nastaveného proudu I_1 . Po dosažení prvního maxima (y) a uplynutí času T_3 (kombinované blokování) se řídí průběh svařovacího proudu i jeho vypnutí stejně jako u systému VÚZ-AUTOSET TE. Původně nastavený doraz svařovacího času se během životnosti elektrod postupně posouvá až o hodnotu Δt (tzv. klouzavý doraz). Použití klouzavého dorazu eliminuje náhodné vlivy. Pro posunutí časového dorazu musí být dorazu dosaženo bezprostředně za sebou několikrát (počet opakovaných dorazů se předem nastaví). Ojedinělé dosažení dorazu je vynulováno prvním následujícím svarem, který je zhotoven kratším svařovacím časem než činí okamžitá nastavená hodnota klouzavého dorazu. Svařovací parametry dané použitím klouzavého dorazu jsou přizpůsobené systematickému vlivu opotřebování elektrod. Po dosažení konečné hodnoty časového dorazu t_m se signalizuje nutnost obnovy pracovní části elektrod nebo výměna elektrod.

BURBANK a TAYLOR [18] využili pro monitorování bodového svařování ultrazvukový systém, o kterém je zmínka již v části 3.2. Ve svařovacích elektrodách jsou ultrazvukové sondy (obr. P-12) a monitor sleduje změny průchodu signálu během tvorby svarové čočky a jejího tuhnutí. Výstupní signál umožňuje hodnocení velikosti svarové čočky. RODEN [47] uvádí porovnání systému ultrazvukové kontroly fy Karl Deutsch Co a fy Automation Industries se systémy založenými na principu sledování tepelné expanze svaru a omezením dodané energie do svaru při svařování nerezavějící oceli typu 301. Hodnocené systémy umožnily indikaci vadných svarů, ale pro rozlišení druhu vady bylo nutné použít záznamu z oscilografu.

TARASOV A VARUCHA [53] použili systém ultrazvukové kontroly pracujícího na principu odrazu ultrazvukového signálu od roztavené oblasti svaru. Schéma kontrolního systému je na obr. P-26. Ultrazvukový signál prochází horním plechem - 4, odráží se od hranice roztavené oblasti svarové čočky d_1 . Na obrazovce defektoskopu se kromě vstupního impulzu B objeví i odražený signál A. S růstem svarové čočky se signál A posouvá k signálu B a při zvětšení svarové čočky na rozměr d_2 zaujme polohu C. Signál o dosažení požadovaného rozměru svarové čočky vznikne v okamžiku, kdy odražený signál dosáhne polohu stroboimpulzu D. Obdobný systém popisují také TARASOV a KARTAŠOV [54].

Pro sledování a řízení bodového svařování se využívá také infračervené vyzařování z povrchu svařovaných plechů. Povrchová teplota v okolí hrotu elektrody souvisí s teplotou v jádru svarové čočky a tím i velikostí svarové čočky. SNEE a TAYLOR [55] rozvinuli techniku použitou GUBENKOVEM. Obr. P-27 dokumentuje princip použité metody. Vyzařování z oblasti kolem hrotu elektrody se snímá vyleštěnou mosaznou trubicí, jejíž konec se nachází asi 6 mm od povrchu plechu. Infračervené záření se přes křemíkový filtr vede na fotočlánek PbS schopný měřit v intervalu teplot 100 - 500°C. Autoři zjistili závislosti pevnosti svarů (smyková zkouška) na amplitudě záření při dvou polohách nastavení snímací trubky (poloha A a poloha B) a prokázali, že infračervené záření z povrchu plechu v okolí hrotu elektrody indikuje vývoj a kvalitu svaru.

POPOV a SUCHOVERCHOV [56] popisují aplikaci vyhodnocování infračerveného záření z povrchu plechu v místě svaru přístrojem "Termoprofil" k efektivní kontrole výskytu staženin ve svarové čočce a výskytu výstřiků tekutého kovu mezi svařované plechy.

Aplikace metody využívající infračervené záření z povrchu plechu v místě svaru nebo z okolí hrotu elektrody je podmíněna zabezpečením rovnoměrné kvality povrchu plechu.

Pro bodové svařování se používají i monitorovací a korekční systémy založené na principu vyhodnocování akustické emise z oblasti tvorby svaru. S tvorbou svarové čočky souvisí mnoho

dějů (plastická deformace, rekrystalizace, překrystalizace, tavení, krystalizace atd.) doprovázených vytvářením napětových vln, které se projevují akustickými signály. Signály se snímají z povrchu plechu nebo elektrody piezoelektrickými snímači. Hodnocení kvality svaru s využitím akustické emise vypracoval JOLLY, který porovnával průměr svarové čochy s celkovou akustickou emisí ze tří charakteristických období (dosed elektrod, tavení a tečení materiálu, odtržení elektrod od plechu) [51]. Firma Trodyne Corporation vyvinula monitorovací a korekční systém na principu měření počtu a amplitud napětových vln v jednotlivých fázích vzniku svaru. Kvalita svaru se hodnotila podle průměru svarové čochy, množství trhlin a výstřiků roztaveného kovu. Korekční systém upravuje svařovací čas tak, aby počet vln akustické emise odpovídal svarové čochce s požadovaným rozměrem [57, 58].

5.2. Systémy s měřením a vyhodnocováním elektrických veličin

Pod pojmem elektrické veličiny u bodového svařování se rozumí svařovací proud, napětí mezi elektrodami, odpor svaru, výkon, různé kombinace uvedených veličin a jejich integrály v čase. Rozborem aplikovatelnosti různých elektrických veličin pro hodnocení kvality bodových svarů se zabývá práce [59]. Systémy sledování a řízení založené na principu vyhodnocování elektrických veličin se používají mnohem častěji než jiné systémy vzhledem k poměrně jednoduchému snímání a zpracování těchto veličin. Zvláště vhodné jsou pro svařovací kleště, kde nelze použít systémy s vyhodnocováním mechanických veličin (např. tepelnou expanzi svaru).

MASING [60] na základě statistického zpracování výsledků experimentů zjistil souvislost mezi pevností svaru a časovým integrálem svařovacího proudu. Měření svařovacího proudu však nepřináší o průběhu svařovacího procesu významné informace a pro korekční systémy se nevyužívá.

GANOWSKI [61] navrhnul korekční systém NDT 500 pracující na principu vyhodnocování časového integrálu napětí (tzv.

system pro standardní bodové svařování). Elektronická regulace umožňuje měnit velikost proudu a svařovací čas. Svařovací proud se zvyšuje nebo snižuje podle hodnoty integrálu napětí předchozího svaru automaticky o předem nastavený krok.

Vzhledem k tomu, že zařízení koriguje svařovací parametry až pro následující svar, je vhodné především pro kompenzaci systematických vlivů jako je např. rostoucí opotřebení elektrod při svařování pokovených ocelových plechů. GANOWSKI uvádí, že životnost elektrody lze takto zvýšit bez obtíží z 500 až 1000 svarů na 7000 až 10000 svarů při svařování pozinkovaných plechů. Životnost je omezena vytvořením kráterů ve střední části elektrod a vytvářením svarů ve tvaru mezikruží. Zde je třeba upozornit, že životnost elektrody je pojem smluvní a souvisí s přípustnou kvalitou svaru.

JOHNSON [62] vyvinul korekční systém, který pracuje na principu vyhodnocování poklesu napětí na elektrodách při tvorbě svaru. Při výstřiku signál náhle poklesne o 10 až 20 % a systém automaticky ukončí průchod proudu. Ukončení svařovacího procesu se dá dosáhnout ještě před výstřikem tak, že se nastaví požadovaný pokles napětí a regulační zařízení ovládá svařovací čas. Korekční systém lze použít pro svařování plechů z měkké uhlíkové oceli, nerezavějící oceli, titanu a pro ocelové plechy elektrolyticky pozinkované. Systém nelze použít pro svařování hliníku a ocelových plechů pozinkovaných ponorem. Korekční systém vyvinutý Johnsonem kompenzuje kolísání síťového napětí a opotřebení elektrody.

RIVET [22] popisuje korekční systém Spotrite 2030 pracující na principu vyvinutém Johnsonem. Systém automaticky prodlužuje svařovací čas až do doby, kdy dojde k předem nastavenému poklesu napětí. Experimentálně bylo potvrzeno, že tuto jednotku nelze použít pro svařování ocelových plechů pozinkovaných, pocínovaných a pohliníkových ponorem. Příznivé výsledky se dosáhly při aplikaci u ocelových plechů s povlaky na bázi slitin Pb-Sn a Fe-Zn. Při svařování plechu Zintec bylo pro úspěšnou funkci systému nutno udržet proud ve velmi úzkém rozmezí. Systém Spotrite má více komerčních verzí, jejich bližší specifikace je uvedena v [63].

ANDREWS, DUNN a BROMHEAD [64] navrhli a odzkoušeli monitor pracující na principu vyhodnocování tzv. dynamické odchylky získané zpracováním signálů z měření napětí mezi elektrodami a svařovacího proudu. Studovali souvislosti mezi velikostí dynamické odchylky a rozměrem svarové čočky pro různé stavy povrchu plechu, imitovaný nekvalitní dosed elektrod, imitované opotřebení elektrod a pro různá nastavení hlavních svařovacích parametrů. Ve většině případů byla mezi dynamickou odchylkou a rozměrem svaru zjištěna lineární závislost (obdobně i pro pevnost svaru).

PETZOLD [65] popisuje korekční systém pro svařování žárově pozinkovaných ocelových plechů založený na principu vyhodnocování rozdílů časových integrálů napětí ve fázi svařovacího procesu charakterizované poklesem odporu a ve fázi nárůstu odporu (časové integrály napětí v rozmezí 2 až 4 půlvlny a 5 až 14 půlvlny). Zjištěný rozdíl se porovnává s předem nastavenou hodnotou a korekční systém provádí korekci svařovacího proudu pro následující svar změnou fázového posunu. Svařovací čas je nastaven na konstantní hodnotu. Na obr. P-28 je vidět, jak se mění průběh odporu u svarů provedených za různého stavu opotřebení elektrod s využitím korekčního systému. S rostoucím počtem svařených spojů se průběh odporu svaru výrazně mění. Charakteristický průběh odporu (s počáteční fází poklesu odporu a s další fází nárůstu odporu) se po provedení 4000 svarů ztrácí a křivka odporu získává prakticky tvar zrcadlového obrazu. Aplikací korekčního systému se životnost elektrod zvýšila na 8000 svarů, což je v souladu s údaji, které uvádí GANOWSKI [61]. Životnost byla omezena vytvářením kráteru ve střední části elektrody a tvorbou svarů ve tvaru mezikružích. Kvalita svarů byla hodnocena smykovou zkouškou. Při experimentech k ověření funkce systému se používal oboustranně žárově pozinkovaný plech s povlakem 400 g.m^{-2} a elektrody z klasického elektrodového materiálu Cu-Cr.

SAVAGE, NIPPES a WASSEL [66] se zabývali měřením statického přechodového elektrického odporu v místě svaru před svařováním a po vytvoření svaru. Zjistili, že podle statického

přechodového odporu svaru nebylo možno spolehlivě posoudit jeho kvalitu. Často používanou elektrickou veličinou využívanou pro sledování a řízení svařovacího procesu je odpor svaru. Měřením průběhu odporu svaru a zkoumáním souvislostí mezi průběhem odporu svaru a tvorbou svarové čočky se věnovalo již mnoho autorů [57, 65, 67, 68, 69, 70, 71]. ANDREWS, WALLS a LO [72] se zabývali měřením křivek dynamického elektrického odporu u výstupkového svařování.

Experimentální práce potvrdily, že děje probíhající při tvorbě bodového svaru jsou ve vztahu s průběhem tzv. dynamického elektrického odporu. Výpočet hodnot dynamického odporu (dále jen odpor) se provádí u střídavého proudu z okamžitých hodnot proudu a napětí ve vrcholcích každé půlvlny proudu (tj. v časových okamžicích, kdy $dI/dt = 0$). Na obr. P-29 je typický průběh křivky odporu při svařování čistých ocelových plechů se schematickým vyznačením jednotlivých stádií tvorby svaru [71].

BHATTACHARYA a ANDREWS [69] studovali průběh odporu svaru a vliv svařovacích parametrů na průběh odporu svaru u nízkouhlíkové oceli, nerezavějící oceli a technicky čistého hliníku. Vysvětlují odlišnosti v průběhu odporu při svařování hliníku a nerezavějící oceli ve srovnání s typickým průběhem odporu při svařování nízkouhlíkové oceli. Výsledky experimentů použili BHATTACHARYA a ANDREWS pro návrh monitorovacího systému založeného na principu porovnávání naměřené křivky odporu s referenčním vzorovým průběhem nebo pásmem, ve kterém se může pohybovat křivka odporu pro vyhovující bodový svar. Pokud naměřená křivka leží mimo vymezené pásmo, signalizuje se provedení nekvalitního svaru.

TOWEY a ANDREWS [67] se zabývali měřením křivek odporu u měkké uhlíkové oceli, titanu, nerezavějící oceli a hliníku při různých podmínkách svařování (svařovací proud, svařovací síla). Stanovili, že pro měkkou uhlíkovou ocel a nerezavějící ocel existuje lineární vztah mezi průměrnou změnou odporu v posledním časovém úseku svařování a pevností svaru ve smyku až do okamžiku, kdy se pevnost svaru blíží pevnosti plechu.

U uhlíkové oceli byla průměrná změna měřena od vrcholu křivky do konce svařovacího procesu. U nerezavějící oceli má křivka odporu klesající tendenci a pro hodnocení se použily hodnoty posledních 10 cyklů z celkového svařovacího času 15 cyklů. Strmost křivky odporu v poslední fázi tvorby svaru doporučili pro automatickou regulaci bodového svařování.

MILCKE [68] navrhl korekční systém založený na principu vyhodnocování poklesu odporu za maximem průběhu odporu podle vztahu (27).

$$R_p = \frac{R_{\max} - R_k}{R_{\max}} \quad (27)$$

$R_{\max}$ - maximální odpor na vzestupné fázi křivky odporu
 R_k - konečný odpor

Řídicí systém vypíná svařovací proud v okamžiku, kdy hodnota R_p klesne pod předepsanou hodnotu. Uvedený systém úspěšně kompenzoval změny napětí sítě, změny tloušťky plechů a znečištění povrchu plechů. JOHNSON [46] uvádí, že pro svařování měkké uhlíkové oceli má být hodnota R_p asi 25 %. Systém se nedoporučuje pro ocelové plechy s povlakem a nelze ho použít pro nerezavějící oceli.

KUBÁN [57] na základě rozboru průběhu odporu svaru a měření souvislostí tvarových charakteristik průběhu odporu s vývojovými fázemi tvorby svaru provedl návrh a odzkoušení systému řízení pro svařovací kleště VÚZ - AUTASET R. Funkci systému vysvětluje obr. P-30. V počáteční fázi svařovacího procesu je během nastavitelné doby T_3 svařovací proud nízký, postupně se snižují přechodové odpory a průběh odporu svaru se ustálí. Po uplynutí doby T_3 se odblokuje vyhodnocovací zařízení. Nízká hodnota proudu se udržuje až do okamžiku dosažení minima na křivce odporu. V další fázi se svařovací proud svařovitě zvyšuje až do okamžiku dosažení maxima na křivce odporu. Nastavení proudu potom již zůstává konstantní až do ukončení svařovacího procesu. Pro řízení svařovacího času

se využívá experimentálně zjištěné skutečnosti, že při konstantní intenzitě svařovacího procesu je plocha P (vztah pro výpočet je uveden na obr. P-30) nad koncovou částí křivky odporu přibližně konstantní při svařování různých tloušťek a kombinací plechů a také při dalších změnách technologických podmínek. Plocha P je určitou mírou energie dodané do místa svaru po dosažení maxima na křivce odporu. K doplnění údajů o funkci systému je nutno ještě uvést, že ve fázi nárůstu svařovacího proudu je omezena maximálně dosažitelná hodnota na I_m a omezen je také maximální svařovací čas. Korekční systém velmi dobře kompenzuje vliv změn síťového napětí, odbočování proudu sousedním svarem, změny tloušťky a počtu svařovaných plechů, zvětšení dosedacího průměru elektrod a vliv špatného dosedu plechů. Podrobnější informace o systému VÚZ - AUTOSET R jsou uvedeny v [7, 51, 57, 74, 75].

JANOTA [51] popisuje krokový systém pro svařování pozinkovaných ocelových plechů odvozený od systému AUTOSET R. Zvláštnosti spojené se svařováním pokovených plechů se řeší použitím klouzavých dorazů svařovacího proudu a času. Funkce klouzavého dorazu byla vysvětlena v části 5.1.

Pro svařovací pracoviště vybavená průmyslovými roboty bylo ve VÚZ v Bratislavě vyvinuto zařízení VÚZ-M3 určené pro řízení a ovládání pracoviště s maximálně třemi svařovacími roboty. Systém je schopen zabezpečovat svařování s pevně nastavenými parametry a jeho hlavní funkční schopností je řízení podle algoritmu systému AUTOSET R. Při svařování pokovených ocelových plechů zabezpečuje krokové řízení. Zařízení VÚZ-M3 je první příklad aplikace mikropočítače k řízení bodového odporového svařování vyvinuté v Československu [50, 75].

Na základě zkušeností s aplikací mikropočítačového řízení byl vyvinut systém VÚZ-M1. Systém je řešený jako stavebnice mikropočítačů pro řízení technologických procesů vyvíjené v k.p. BEZ Bratislava. Zajišťuje řízení svařovacího procesu s pevně nastavenými parametry, řízení podle algoritmu AUTOSET R a různé varianty krokového řízení na robotizovaném pracovišti. Systém lze připojit k nadřízenému informačnímu nebo řídicímu systému. Podrobnější údaje o systému VÚZ-M1 uvádějí KUBÁN,

ŠTEFÁNEK a DRÁBEK v [76].

KRAUSE [77] se zabývá aplikací mikroprocesorů v řízení odporových svařovacích zařízení a vývojovými trendy v řízení svařovacích procesů. Tento přístup vede k vývoji svařovacího modulu používaném ve spojení s programovatelným řízením stroje. Vzhledem k tomu, že se na svařovaném dílu obecně provádí více svarů současně nebo postupně, je účelné do řídicího systému zahrnout více modulů programovatelných z jednoho centra. KRAUSE předpokládá vývoj k centrálně programovatelné regulaci svařovacích strojů.

SLEE a MOORE [78] vyvinuli monitor pracující na principu vyhodnocování množství energie dodané do svaru. Monitor omezující energii dodávanou do svaru popisuje i RODEN [47] a provádí jeho porovnání s dalšími typy monitorů při svařování nerezavějící oceli. Vznik kvalitního svaru však není podmíněn pouze dodáním určitého množství energie do oblasti tvorby svaru. Korekční systémy založené na tomto principu mohou sice kompenzovat změny síťového napětí a přítlačné síly, nemohou ale kompenzovat opotřebení elektrod, vliv umístění svaru k okraji plechu, odbočování proudu sousedním svarem, změnu tloušťky plechu apod. Pro svařování ocelových plechů s kovovými povlaky nejsou vhodné.

5.3. Systémy s kombinací elektrických a neelektrických veličin a systémy využívající statistické modely

EICHHORN, SINGH, EMONTS a LEUSCHEN [70] navrhli a odzkoušeli třístupňový systém řízení bodového svařování, který v počáteční fázi svařovacího procesu pracuje na principu vyhodnocování průběhu elektrického odporu mezi elektrodami a v další fázi vyhodnocuje průběh tepelné expanze svaru. Princip řízení je na schematickém obr. P-31.

První stupeň regulace přepíná předeřhřivací proud na svařovací. Za kritérium pro ukončení předeřhřivací fáze se používá určitá hodnota odporu (R_G) nebo určitá rychlost poklesu od-

poru (dR/dt). Přepnutí na svařovací proud je navíc zajištěno předem nastavenou maximální dobou trvání přehřívací fáze. První stupeň účelně ovlivňuje přechodové odpory mezi elektrodami a plechem.

Ve druhém stupni regulace se využívá tepelná expanze svaru pro regulaci času průchodu svařovacího proudu tak, aby se u všech svarů dosáhla stejná hodnota tepelné expanze. Měření tepelné expanze začíná v okamžiku přepnutí na svařovací proud. Svařovací proud je v období funkce druhého stupně regulace nastaven na konstantní hodnotu.

Ve třetím stupni regulace se podle průběhu tepelné expanze svaru reguluje velikost svařovacího proudu. Skutečná tepelná expanze svaru se porovnává s požadovaným (ideálním) průběhem a podle výsledku porovnání se fázovým posunem ovládá velikost proudu. Doba průchodu svařovacího proudu zůstává pevně nastavena. Pokud se při porovnávání hodnot skutečné a požadované tepelné expanze zjistí velká negativní odchylka (výstřik tekutého kovu), regulační zařízení přepne svařovací proud na hodnotu přehřívacího proudu.

Při ověřovacích zkouškách regulačního zařízení se zjišťovalo, do jaké míry jsou různé stupně regulace, nasazované jednotlivě nebo v kombinaci, schopné kompenzovat různé rušivé vlivy. K posouzení vlivu zvýšeného přechodového odporu na povrchu plechu na únosnost svaru zjišťovanou smykovou zkouškou, byly ocelové plechy za definovaných podmínek zkušeny. Na obr. P-32 jsou výsledky, kterých se dosáhlo nasazením regulace, ve srovnání s neregulovaným svařovacím procesem. Nasazením prvního regulačního stupně se podstatně snížil variační koeficient pro únosnost svaru a únosnost svarů se zvýšila.

Regulační systém se ověřoval rovněž pro svařování poolovených a pozinkovaných ocelových plechů. Výsledky provedených experimentů uvádí obr. P-33. Nasazením regulace se únosnost svarů příliš nezměnila, snížila se však hodnota variačního koeficientu pro únosnost svarů. K ucelenému posouzení regulačního systému pro svařování ocelových plechů s povlakem chybí

údaje , v jakém stádiu opotřebení elektrod se zkoušky prováděly.

K sestavení systému prognózy kvality svarů se používají matematické modely svařovacího procesu, které musí postihnout vzájemné působení podstatných parametrů na vytváření svarového spoje. Vzhledem k tomu, že kvalita bodového svaru závisí především na velikosti a tvaru natavené oblasti, je účelné, aby matematické modely vyjadřovaly vliv různých parametrů na rozměry svarové čocky. Experimentální statistické metody umožňují získat matematické modely prakticky použitelné na řízení svařovacího procesu, neboť jsou poměrně jednoduché a výpočet lze provádět v reálném čase během svařování. Korelační závislosti kritéria kvality svaru a parametrů matematického modelu popisují regresní funkce.

Svařovací proces může být vyjádřen více modely, které odráží jeho různorodé stránky. Není účelné snažit se vytvořit matematický model vystihující co nejvěrněji mnohotvárné skutečnosti svařovacího procesu včetně jeho zvláštností a různých detailů. To nakonec vede k velmi složitým vztahům, jejichž vyčíslení je zdoluhavé. Cílem musí být vytvoření jednoduchého modelu, který odráží nejpodstatnější stránky tvorby svaru [80].

PODOLA, KVAČEV a URSATĚV [81] se zabývali studiem vlivu parametrů svařování na rozměr svarové čocky při svařování slitiny hliníku AMr6M a nerezavějící oceli 1Ch18N9T. Hodnotili vliv svařovacího proudu, střední hodnoty poklesu napětí mezi elektrodami, relativní změny odporu svaru za poslední periodu svařovacího cyklu, střední hodnoty výkonu a energie spotřebované na vytvoření svaru. Došli k závěru, že systémy automatické kontroly a řízení bodového svařování na základě modelu využívající informace pouze o jednom z uvedených parametrů nedovolují s dostatečnou přesností plnit svou funkci. Autoři v práci doporučují použití mnohafaktorového modelu.

PODOLA, MEČNIKOV, URSATĚV, KVAČEV a NIKULIN [82] studovali vliv svařovacího proudu, svařovací síly, vzdálenosti

svarů a poloměru zaoblení pracovní části elektrody na rozměry svarové čochky při svařování slitiny D16AT. Výsledky provedených změn lze shrnout do následujících závěrů:

- změna svařovacího proudu se projevuje výrazněji na průměru svarové čochky než na její výšce (obdobné výsledky se zjistily při sledování vlivu svařovací síly),
- změna poloměru pracovní části elektrody v rozmezí 75-150 mm neměla na rozměr svarové čochky znatelný vliv,
- změna vzdálenosti sousedního svaru o ± 25 % z optimální hodnoty 20 mm nemá na rozměr svarové čochky prakticky vliv.

Experimenty se prováděly s cílem zjistit, jaké parametry není nutné zahrnout při vytváření matematických modelů svařovacího procesu.

PODOLA, POPOVIČ, URSATĚV [83] popisují zařízení na kontrolu parametrů svařování a kvality svarů, které na základě matematického modelu vyhodnocuje průměr svarové čochky a její výšku. Pro stanovení průměru svarové čochky byly použity modelové rovnice (28) a (29), získané statistickým vyhodnocením výsledků experimentů pro dva rozsahy studovaných parametrů.

$$d_c = -b_0 - b_1 X_1 + b_2 X_2 - b_{12} X_2^2 \quad (28)$$

$$d_c = b_0 - b_{11} X_1^2 - b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (29)$$

V rovnicích (28) a (29) představuje X_1 svařovací sílu, X_2 energii dodanou do svaru a hodnoty b_0 , b_1 , b_2 , b_{11} , b_{12} , b_{22} jsou odhady parametrů regresní funkce z experimentálně získaných údajů při svařování slitiny D16AT tloušťky 1+1 mm a materiálu O1420 tloušťky 1,5+1,5 mm. Střední relativní chyba vypočítaného průměru svarové čochky činila u materiálu D16AT 3,7 % a u slitiny O1420 3,4 % při změnách svařovacího proudu o ± 5 % a svařovací síly o ± 10 % vzhledem k optimálnímu režimu svařování. Analýza výsledků potvrdila, že modelové rovnice lze použít pro stanovení předpokládaného rozměru svarové čochky

v rozmezí rozsahu změn svařovacího proudu o + 10 až - 15 % a svařovací síly o ± 25 % vzhledem k optimálnímu režimu svařování.

VASILÉV, BĚLACHOV, PETROV, STREĽNIKOV, ČE EN UN a BELOV [84] vypracovali statistický matematický model pro svařování nerezavějící oceli 1Ch18N9T stejnosměrným a střídavým proudem. Za nezávislé parametry svařovacího procesu pokládali svařovací sílu, svařovací čas, množství energie dodané do svaru, průměr elektrody a tloušťku svařovaných částí. Na základě výsledků experimentálních prací získali modelovou rovnici pro výpočet průměru svarové čochy (30).

$$d_c = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 Q + b_4 d_{el} \quad (30)$$

V rovnici (30) představuje t svařovací čas, Q množství energie dodané do svaru, d_{el} rozměr pracovní části elektrody a koeficienty b jsou odhady parametrů regresní funkce. Vzhledem ke skutečnosti, že během svařovacího procesu nejsou k dispozici hodnoty rozměrů dosedací části elektrody, kontroloval se rozměr elektrody podle počáteční elektrické vodivosti na základě empirického vztahu (31). Hodnota g_{ee} je počáteční elektrická vodivost stanovená z amplitudy svařovacího

$$d_{el} = 1,095 g_{ee} \sqrt{\delta} \quad (31)$$

proudu v první půlperiodě a δ značí tloušťku svařovaného materiálu.

Pro posouzení přesnosti, s jakou lze na základě modelové rovnice stanovit průměr svarové čochy, byly provedeny experimenty se změnou svařovacího proudu o ± 15 %, svařovací síly o + 20 % vzhledem k optimálnímu režimu a se zvětšením rozměru elektrod o 20 až 40 %. Střední relativní chyba prognózy rozměru svarové čochy nepřekračovala 6 %. Modelová rovnice se ověřovala i pro korekční systém určený ke kompenzaci změn napětí sítě (o ± 15 %), změn svařovací síly (o ± 20 %) a zvětšení rozměru elektrody (o 20 až 40%). Řízenou veličinou byl svařovací

čas. Relativní chyba průměru svarové čocky při svařování nere-
zavějící oceli tloušťky 0,5 mm nepřekračovala 6 až 10 % a při
svařování tlouštěk 1 a 1,5 mm 4 až 7 %. Matematický model
byl s ohledem na dosažené výsledky aplikovatelný v rozmezí
tlouštěk 0,5 až 1,5 mm.

Modelové rovnice popisující korelační závislost kritéria
kvality svaru na vybraných parametrech jsou formální a bez
experimentálních údajů nemají souvislost s teoretickými mo-
dely odvozenými na základě fyzikálních zákonitostí svařova-
cího procesu. Úkolem statistických experimentálních metod je
vypracování modelů, u kterých náhodné chyby při možných od-
chykách sledovaných parametrů nepřesahují přípustné toleran-
ce stanovené pro kritérium kvality svaru.

5.4. Metodika návrhu kontrolních a řídicích systémů

Kvalita svárového spoje je při systémovém přístupu ke
svařovacímu procesu jeho výstupem. Při aplikaci kontrolních
systémů je tento výstup předmětem sledování a při aplikaci
řídicích systémů konečným cílem.

JANOTA [85, 86] provedl návrh metodiky výběru technolo-
gického principu kontrolních a řídicích systémů následující-
cím způsobem:

- a) Formulace zadání - zahrnuje především ujasnění požadavků
tj. specifikaci materiálu, výrobku a výrobní technologie.
Kontrolní nebo řídicí systém představuje záruku určité de-
finované úrovně kvality svarových spojů a jejich zavádění
do praxe předpokládá odpovídající úroveň výrobní techniky
a technologie. Kontrolní a řídicí systémy nelze považovat
za náhradu fungující technologie.
- b) Určení kritérií pro hodnocení kvality svarů předpokládá
ve spolupráci se zákazníkem stanovit podle požadovaných
užitných vlastností výrobku požadavky na svarové spoje.
Pro hodnocení kvality svaru se musí stanovit kvantitativně
měřitelná kritéria, metodické postupy při volbě vzorků,

měření a vyhodnocování určených kritérií. Stanovená kritéria mají umožnit jednoznačnou klasifikaci svarů na vyhovující a nevyhovující.

- c) Výběr charakteristických proměnných svařovacího procesu se provádí na základě výsledků předchozích etap a na základě analýzy fyzikální podstaty svařovacího procesu. Proměnné musí být měřitelné během svařovacího cyklu a dobře korelovat s předem stanoveným kritériem nebo kritérii kvality svaru. Zvolené proměnné musí reagovat na závady a rušivé vlivy, které se v praxi běžně vyskytují a ovlivňují svařovací proces. Podle zvolených proměnných se provede výběr a vývoj odpovídajících měřicích metod a vybavení.
- d) Stanovení účinku vnějších poruch na vybrané charakteristické proměnné a kritéria kvality se provádí na základě simulace typických poruch u skutečných svařovacích procesů. Hodnoty vybraných charakteristických proměnných se měří a zaznamenávají při plánovitých změnách vstupních svařovacích podmínek a u zhotovených svarů se zjistí a vyhodnocují předem navržená kritéria určující jejich kvalitu.
- e) Výběr kontrolní proměnné se při návrhu systému monitoru provádí na základě analýzy kvantitativních vztahů mezi hodnotami proměnných a příslušných kritérií hodnocení kvality svaru při působení poruch a procesových změn. Stejný postup platí i pro konvenční řídicí systémy, kde se předpokládá existence jednoznačného vztahu mezi hodnotami kontrolní proměnné a kritériem kvality svaru. Pokud je řídicí systém vybaven určitou schopností optimalizace nebo samočinné kompenzace některých rušivých vlivů, analyzuje se celý tvar tzv. vln kontrolních proměnných během svařování.
- f) Návrh principu systému. S přihlédnutím k zadání problému a po případném zpětném ovlivnění zadání se posoudí realizovatelnost systému na základě vybrané kontrolní veličiny nebo kontrolních veličin. Posuzuje se technická reálnost předpokládaného řešení (např. dostupnost snímačů, složitost elektronické části, odolnost proti rušení, mechanické

a elektrické vlastnosti stroje, energetické podmínky pracoviště apod.), uvažují se různé varianty řešení a výsledkem je přesné a podrobné zadání konstruktérovi systému.

Z uvedeného přehledu vyplývá, že podkladem pro řešení celého problému musí být účelné stanovení požadované jakosti bodových svarů, odpovídající metodika kvantitativního hodnocení kvality svaru a kvantitativní i kvalitativní vyhodnocení kontrolní proměnné.

5.4.1. Kvantitativní vyhodnocení kontrolní proměnné

Pro kvantitativní vyhodnocení vhodnosti kontrolní proměnné se musí stanovit určitá kritéria např. co nejmenší rozptyl, linearita, strmost. Pro praxi je výhodné mít raději méně kritérií, ale kritéria přesná.

Předpokládejme, že x_1 je charakteristická proměnná veličina měřená během svařovacího procesu a y je kritérium kvality jeho výsledku. Z obr. P-34 je zřejmé, že při porovnání např. křivek 1 a 2 je výhodnější křivka s menší strmostí (tj. křivka 2), neboť pro $\Delta x_1 < \Delta x_2$ při stejné změně kvality Δy platí $\Delta y / \Delta x_1 > \Delta y / \Delta x_2$. Stejná změna kvality svaru je tedy signalizována výraznější změnou kontrolní proměnné. Tento závěr však sám o sobě nepostačuje, nebere totiž do úvahy skutečný rozsah změn obou veličin ve srovnávaných případech, rozptyl veličiny x_1 kolem regresní čáry a také sklon závislosti nelze snižovat neomezeně [7].

Závislost veličin x_1 a y má vždy stochastický charakter a lze si ji představit jako pásmo šířky δx_1 v určitém intervalu hodnot x_1 a y , které zkoumaný proces ve skutečnosti nabývá. Na obr. P-35 je porovnání průběhu dvou kontrolních proměnných se stejnou šířkou rozptylového pásma a různou strmostí, tj. s různým rozpětím $x_{\max} - x_{\min}$. Při srovnání dvou veličin x_1 a x_2 ve stejném intervalu hodnot y je podle obr. P-35 zřejmé, že pro účely kontroly bude výhodnější ta, která má menší necitlivost podle vztahu (32).

$$\frac{\delta x_i}{x_{1\max} - x_{1\min}} < \frac{\delta x_i}{x_{2\max} - x_{2\min}} \quad (32)$$

V praxi se pro porovnávání dvou veličin x_1 a x_2 používá tzv. citlivost definovaná vztahem (33), který zahrnuje šířku rozptylového pásma δx_i , šířku intervalu $x_{i\max} - x_{i\min}$ i vliv str-

$$s_{ci} = 1 - \frac{\delta x_i}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (33)$$

mosti závislosti $y = f(x_i)$. Předpokladem pro použití vztahu (33) k porovnání dvou veličin x_i je měření těchto hodnot ve stejném intervalu hodnot y , který pokrývá praktické možnosti zkoumaného procesu.

Šířku rozptylového pásma lze odhadnout jako vzdálenost hranic rovnoběžných s regresní čarou $y = f(x_i)$ proložených nejkrajnějšími body měření ve směru osy x . Správné však je stanovit oboustranné toleranční meze, které zahrnou se zvolenou vysokou pravděpodobností určitý podíl základního souboru. Tento přístup platí i pro nelineární regresní závislost.

Stochastický charakter závislosti kvality svaru y na měřené veličině x_i má za následek skutečnost, že v praxi nelze dosáhnout šířky pásma $\delta x_i = 0$. Nelze proto požadovat libovolně malou toleranci kvality svaru Δy (např. průměru svarové čočky). Z obr. P-36 je vidět, jaká nejmenší možná šířka tolerance kvality se dá dosáhnout s řízením, které ukončí svařovací proces po dosažení určité hodnoty x_i (tj. pro $\Delta x \rightarrow 0$). Bude-li se v praxi požadovat menší tolerance kvality, musí se najít jiná veličina x_i s těsnější korelační závislostí a menším rozptylovým pásmem δx_i .

Kontrolní veličiny vybírané a vyhodnocované z kvantitativního hlediska se používají u monitorů a korekčních systémů klasické koncepce. Kvalita svarů se hodnotí na základě naměřených hodnot kontrolní veličiny. Nevýhodou systému klasické koncepce je jejich úzká účelovost, neboť konkrétní číselné kritérium platí pouze pro určité technologické podmínky (např. tloušťku plechu).

5.4.2. Kvalitativní vyhodnocení kontrolní proměnné

Hlavní nevýhodu úzké účelovosti klasických kontrolních a řídicích systémů lze odstranit, pokud budeme vycházet z kvalitativního hodnocení časových průběhů kontrolních veličin.

Proměnné veličiny mají během svařování charakteristický časový průběh. Tato skutečnost je znázorněna na schematickém obr. P-37. Časové průběhy veličin mají obvykle na začátku a na konci procesu náhlé změny i nespojitosti. Výjimku tvoří svařovací síla.

Mezi nejdůležitější proměnné patří takové, které mají vztah k tepelným dějům a odrážejí intenzitu fyzikálních dějů při svařování. Před svařovacím procesem mají určitou stabilizovanou hodnotu, během procesu jejich průběh charakterizuje intenzitu různých fyzikálních dějů a po jeho skončení zaujmou určitou rychlostí opět ustálený stav.

Každý reálný proces má určitou intenzitu a trvá určitý čas. U bodového svařování lze intenzitu definovat proměnnými, které popisují intenzitu dílčích fyzikálních jevů během svařování - např. svařovací proud, napětí, odpor svaru, výkon. Obvykle postačuje sledovat pouze jednu proměnnou, musí však těsně souviset s dominujícím aspektem skutečného procesu. Je velmi výhodné pokud sledovaná proměnná má charakter kritéria podobnosti. O kritériích podobnosti pro řízení bodového svařování pojednává např. JANOTA [7, 10].

Analyzujeme-li dva tvary průběhu kontrolní proměnné $Y(t)$ podle obr. P-38 pro dva podobné procesy, potom geometrická podobnost průběhu křivek $Y(t)$ bude jednou z podmínek fyzikální podobnosti. Jsou-li oba průběhy geometricky podobné, potom hodnoty derivací dY/dt budou v odpovídajících bodech obou křivek identické. Hodnoty první derivace dY/dt pro dva časové průběhy kontrolní proměnné v odpovídajících bodech obou křivek představují první typ kritéria tvarové podobnosti. Derivace dY/dt není z fyzikálního hlediska bezrozměrnou veličinou, ale z geo-

metrické analýzy průběhu křivek $Y(t)$ lze formálně definovat jejich strmost.

Formulace odpovídajících si bodů časového průběhu obou křivek vede k druhému typu kritéria tvarové podobnosti. Rovnice tvořící matematický model svařovacího procesu se dá vhodnou úpravou převést na bezrozměrný tvar tak, jak se popisuje v části práce 2.2. Při popisu dějů spojených se vznikem a vedením tepla se bezrozměrný čas obvykle vyjadřuje ve formě Fourierova kritéria Fo . Transformací na novou nezávisle proměnnou Fo se sjednotí časová měřítká obou procesů tak, jak uvádí obr. P-39. Pro praktické využití při kontrole a řízení bodového svařování je výhodné využívat význačné body v průběhu veličin, které se snadno identifikují. Jsou to všechny singulární body (lokální extrémy, inflexní body), které budou mít u podobných průběhů veličin stejnou hodnotu Fourierova kritéria. Mají významné postavení, neboť jejich dosažení souvisí s jednotlivými fázemi tvorby svaru. Dosažení důležitých bodů na křivce $Y = f(Fo)$ daného hodnotou Fo představuje druhý typ tvarového kritéria časového průběhu kontrolních veličin.

Stejně jako v předešlém případě lze standardizovat i stupnici veličin Y . Transformace na tzv. normovanou proměnnou $N.Y$ je znázorněna na obr. P-40, musí respektovat podobnost v rozsahu dané třídy procesu. Tvar vln průběhu veličin je potom představován pouze jedinou křivkou pro celou třídu podobných procesů. Absolutní hodnoty normované veličiny $N.Y$ srovnávané ve význačných bodech průběhu křivky $N.Y = f(Fo)$ představují třetí typ tvarového kritéria časového průběhu kontrolních veličin. Transformace Y na normovanou veličinu $N.Y$ nemusí vést k vytvoření bezrozměrné proměnné.

JANOTA [7] uvádí praktický význam definovaných tvarových kritérií časových průběhů kontrolních veličin takto:

- a) Kritéria prvního typu charakterizují intenzitu svařovacího procesu a mají nejblíže ke kritériím podobnosti. Mohou se použít pro regulaci energetických vstupů procesu.

- b) Kritéria druhého typu charakterizují dosažení významných etap nebo událostí procesu a jsou především vhodná pro řízení posloupnosti jednotlivých časových kroků.
- c) Kritéria třetího typu představují informace o intenzitě procesů podobně jako kritéria prvního typu. Jejich základem jsou proměnné, které nemají charakter kritéria podobnosti.

Nejtěžším problémem v praxi je najít použitelný způsob transformace, vyhnout se měření absolutních hodnot veličin a zahrnout normovací podmínku v každém procesu i měřicí technice [7].

6. STANOVENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Tenké ocelové plechy s různými typy kovových povlaků nacházejí v průmyslově vyspělých zemích stále širší uplatnění pro své vyšší užitné vlastnosti v porovnání s čistým ocelovým plechem. V některých odvětvích se jejich aplikace dokonce stala zásadní podmínkou pro udržení výrobků na konkurenci schopné úrovni. Tento trend je zcela zřejmý v automobilovém průmyslu.

Pro zpracování plechů s povlaky nemají naše strojírenské závody dostatek podkladů ani zkušeností. K hodnocení dílčích vlastností těchto materiálů obvykle ještě nejsou plně vypracované ani metodiky. Před jejich praktickou aplikací ve výrobě jsou i určité obavy, které nejsou vždy opodstatněné.

Na základě posouzení světových trendů spotřeby ocelových plechů s kovovými povlaky lze předpokládat, že v dohledné době se musí podstatně zvýšit jejich aplikace v automobilovém průmyslu, stavebnictví, obalové technice apod. Jsou to odvětví, kde spojování dílů předpokládá kromě dalších metod i aplikaci bodového odporového svařování.

V praxi bodového odporového svařování ocelových plechů s kovovými povlaky je nutno řešit celou řadu specifických problémů vyplývajících z metalurgických zvláštností svařovacího procesu. Za prvořadý problém lze pokládat udržení rovnoměrné a požadované kvality svarových spojů především v souvislosti s rychle postupujícím opotřebením elektrod. Při zajišťování kvality svaru se samozřejmě musí uvažovat i mnoho dalších rušivých vlivů vyskytujících se u bodového svařování, ale prioritní význam má vliv opotřebením elektrod.

Obsluha svařovacího stroje nemůže objektivně posoudit všechny náhodně působící rušivé vlivy, ani soustavně působící faktory způsobující rozptyl hodnot kvality svarů a pokles kvality svarů pod přípustnou mez. Z těchto důvodů roste význam aplikace monitorovacích a korekčních systémů, zajišťujících rovnoměrnou kvalitu svarů. Monitorovací a korekční systémy používané pro svařování plechů s povlaky jsou většinou určené

a ověřené pro svařování pozinkovaných plechů, jejichž produkce v celosvětovém měřítku převládá v porovnání s ostatními plechy s povlaky.

Mezi ocelovými plechy s kovovými povlaky má své specifické postavení žárově pohliníkový plech používaný ve stavebnictví, při stavbě pecí a také v automobilovém průmyslu např. na tepelně namáhané díly výfukových potrubí.

V souladu s uvedenými poznatky bude disertační práce zaměřena na studium souvislostí vybraných veličin svařovacího procesu s výslednou kvalitou svarů a na návrh principu monitorovacího či korekčního systému pro svařování žárově pohliníkového ocelového plechu. Pozornost bude zaměřena především na sledování a vyhodnocování elektrických veličin, neboť monitorovací a korekční systémy založené na jejich využití jsou univerzálnější (jsou vhodné i pro svařovací kleště).

S přihlédnutím k hlavním cílům disertační práce, technickým a materiálovým možnostem i přístrojovému vybavení pracoviště je práce zaměřena na:

- a) návrh a ověření metodiky hodnocení kvality svaru,
- b) návrh a realizaci experimentálních prací k získání podkladů pro studium souvislostí mezi průběhem vybraných fyzikálních veličin svařovacího procesu a výslednou kvalitou svaru,
- c) výběr vhodných kontrolních veličin svařovacího procesu na základě statistického zpracování experimentálně zjištěných údajů,
- d) návrh algoritmu systému monitorování a řízení svařovacího procesu na základě provedeného výběru kontrolních veličiny či veličin.

7. METODICKÉ POSTUPY ZPRACOVÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

7.1. Volba a zhodnocení vlastností základního materiálu

Vzhledem ke skutečnosti, že se u nás dosud žárově pohlí-
níkovaný ocelový plech nevyrábí, byl pro experimentální práce
použit plech z dovozu od fy THYSSEN typ fal 1. Plechy fal 1
mají povlak ze slitiny Al + 8 až 10 % Si a používají se pře-
devším v korozním prostředí se zvýšenými teplotami. K dispo-
zici byly plechy s tloušťkou 0,8 a 0,9 mm.

Plech fal 1 se vyrábějí v pěti skupinách podle množství
naneseného kovu na jednotku plochy povrchu a to 80, 100, 120,
150 a 200 g.m⁻² oboustranně. Základní ocelový plech se vyrábí
v pěti jakostech z měkké nelegované oceli (označení A 1,
Bu, Bg, C, D), ve třech jakostech ze stavebních ocelí (ozna-
čení L 1, M 1, N 1) a jedné jakosti zvláštní (označení S 1).
Specifikace jednotlivých jakostí je následující [87]:

- A 1 - základní jakost
- Bu - tažný
- Bg - hlubokotažný
- C - hlubokotažný odolný proti stárnutí
- D - zvláště hlubokotažný a odolný proti stárnutí
- L 1 - 250 Al (mez kluzu min. 250 N.mm⁻²)
- M 1 - 280 Al (mez kluzu min. 280 N.mm⁻²)
- N 1 - 320 Al (mez kluzu min. 320 N.mm⁻²)
- S 1 - mikrolegovaná ocel se zvýšenou pevností a mezí kluzu
za zvýšených teplot.

Vzhledem k tomu, že nebyla k dispozici přesná specifikace
získaného materiálu byly provedeny následující zkoušky a ana-
lýzy:

- a) analýza chemického složení ocelového plechu
- b) zkouška tahem na určení základních mechanických
vlastností plechu,
- c) metalografický rozbor ke zjištění struktury ocelo-
vého plechu i povlaku,

d) analýza povlaku na ED analyzátoru LINK 10 000.

Chemická analýza ocelového plechu byla provedena na kvantometru ARL 3360 u vzorků odebraných z tabulí plechu tl. 0,8 i 0,9 mm. Výsledky analýzy jsou v tabulce 2, obsah prvků je v hmotnostních %.

Tabulka 2: Výsledky chemické analýzy plechů

Prvek	plech tl. 0,8 mm	plech tl. 0,9 mm
C	0,042	0,040
Si	0,022	0,020
Mn	0,227	0,228
P	0,005	0,005
S	0,009	0,007
Al	0,089	0,068
Ni	0,008	0,009
Cr	0,009	0,010
Mo	0,007	0,006
V	0,002	0,002
Cu	0,023	0,017
Sn	0,002	0,002

Ke stanovení základních mechanických vlastností byla použita zkouška tahem podle ČSN 42 0310 [88] s úpravou zkušebního tělesa používanou v automobilovém koncernu ŠKODA. Polotovary byly vystřiženy a na konečné rozměry obrobena frézováním (šířka tyče 20 mm, výchozí měřená délka 80 mm). Naměřené výsledky (průměrné hodnoty ze šesti zkoušek tahem) jsou v tabulce 3.

K uvedeným výsledkům je třeba dodat, že zkoušky tahem byly provedeny po 6-ti měsíční lhůtě, během které výrobce garantuje mechanické vlastnosti u plechů odolných proti stárnutí.

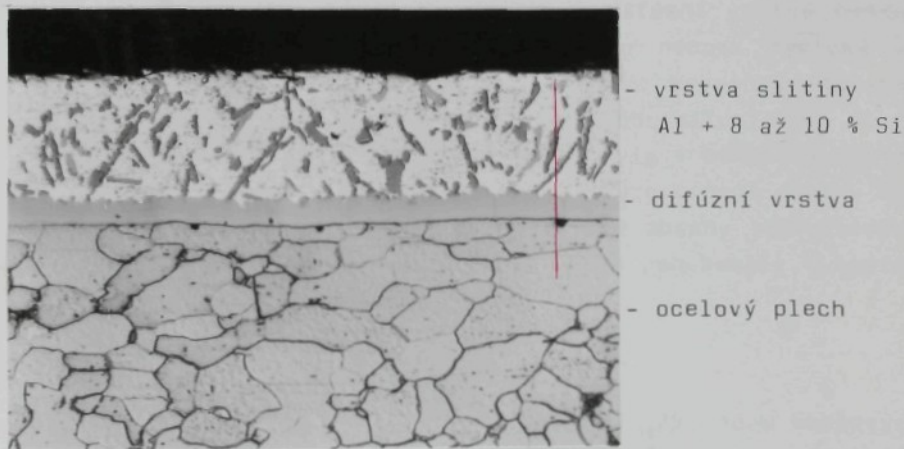
Výsledky chemické analýzy a výsledky zkoušky tahem prokázaly, že se jedná o hlubokotažné plechy odolné proti stárnutí. Vzhledem k dlouhodobému skladování však plechy při zkoušce tahem vykazují význačnou mez kluzu.

Tabulka 3. Mechanické vlastnosti základního materiálu

základní materiál	R_m N.mm ⁻²	R_e N.mm ⁻²	A %
plech tl.0,8 mm	367	274	33
plech tl.0,9 mm	378	287 ^x	34

Poznámka: x/ hodnota odpovídá dolní mezi kluzu R_{eL}

K posouzení struktury základního materiálu byl z dodaného plechu (z každé tabule) odebrán vzorek pro metalografický rozbor. Při odběru vzorků se respektovala skutečnost, že tloušťku povlaku lze stanovit v jakémkoliv bodě povrchu plechu vzdáleném od okraje alespoň 40 mm [87]. Na obr. 7 je snímek metalografického výbrusu provedeného v rovině kolmé na povrch plechu ve směru válcování (červeně je označeno místo provedení liniové analýzy). Ocelový plech má prakticky čistě feritickou struk-



Nital 3 %

1000x

Obr. 7. Struktura základního materiálu a povlaku

туру s ojedinělými útvary terciálního cementitu na hranicích zrn. Povlak má strukturu obdobnou jako podeutektický silumin. Při hodnocení struktury ocelového plechu i povlaku ve směru kolmo na směr válcování se prokázalo, že struktury jsou obdobné

jako ve směru válcování. Tloušťka povlaku včetně difúzní vrstvy činí ve sledovaném místě přibližně 26 μm . Difúzní vrstva má tloušťku asi 5 μm . Podle tloušťky povlaku stanovené z provedených metalografických výbrusů bylo zjištěno, že plechy mají oboustranný povlak v množství 80 g.m^{-2} .

Pro doplnění charakteristiky základního materiálu byly na ED analyzátoru LINK 10 000 provedeny analýzy povlaku. Na obr. 8 jsou rtg. obrazy rozložení Al, Si a Fe v oblasti povlaku. Při porovnání rtg. obrazu se snímkem mikrostruktury na obr. 7 je zřejmé, že tmavší útvary v povlaku jsou částice s vysokým obsahem Si. Na obr. 9 je kombinovaný rtg. obraz vytvořený programem "multi" z dílčích rtg. obrazů uvedených na obr. 8. Barevné označení je zřejmé z obrázku, čím hustší je výskyt barevných bodů, tím je vyšší obsah příslušného prvku. Na obr. 10 je snímek získaný z liniové analýzy ve stopě vyznačené červenou čarou na obr. 7. Pod obr. 10 je schematicky vyznačena orientace vzhledem k metalografickému výbrusu. Podle výsledků liniové analýzy lze konstatovat, že v difúzní vrstvě nejsou význačné koncentrační gradienty. Ty jsou naopak typické ve vlastním povlaku, kde se vyskytují částice s vysokým obsahem Si tak, jak je to obvyklé u podeutektického siluminu.

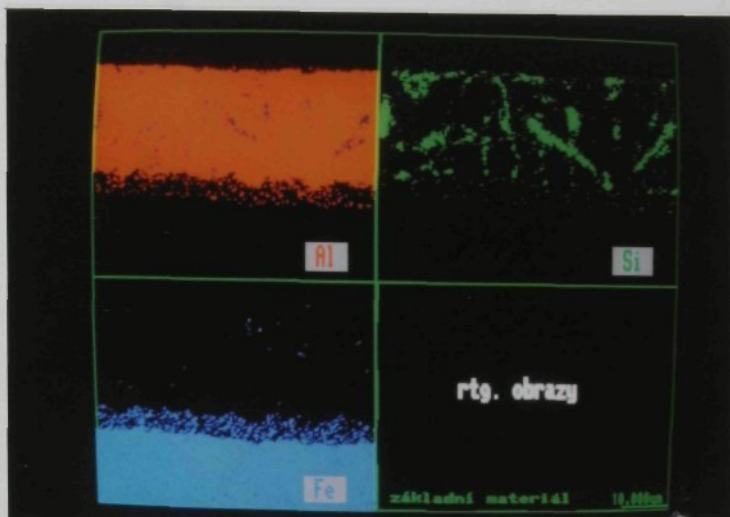
V polovině tloušťky difúzní vrstvy byla v několika místech provedena semikvantitativní mikroanalýza pro určení obsahu Al, Si a Fe. Při pěti provedených analýzách se obsahy jednotlivých prvků vyjádřených v hmotnostních podílech pohybovaly v mezích

Al 56,39 až 59,28 %

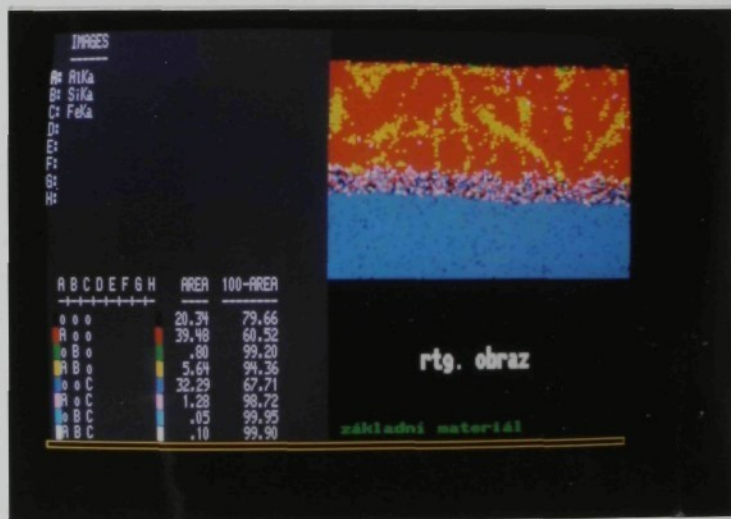
Si 8,98 až 9,26 %

Fe 33,08 až 34,63 %

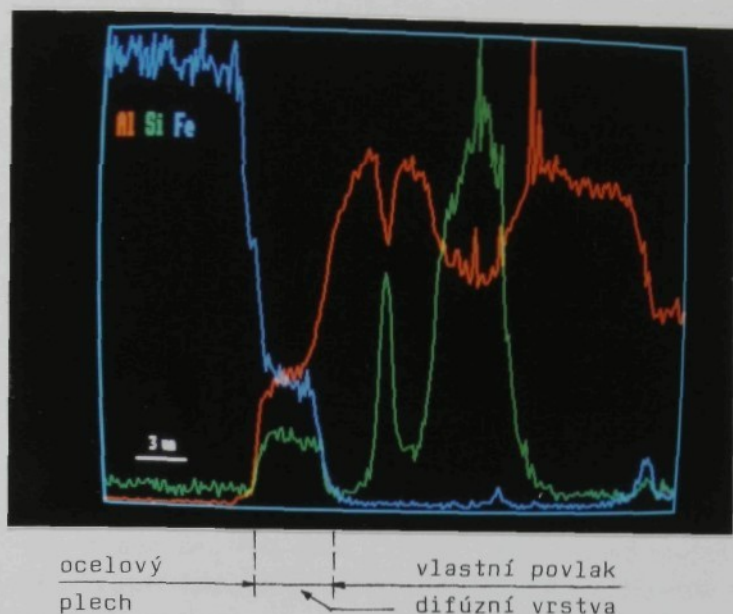
Podle údajů, které uvádějí DORN a LINDNER [89] je u ocelových plechů s povlakem hliníku difúzní vrstva tvořena především fází Fe_2Al_5 . Tento závěr potvrzují také údaje, které MALEVSKIJ, GORDONNAJA a RJABOV [90] získali při studiu fázových změn při žíhání tenkých bimetalických vrstev Al-Fe. Křemík přidávaný do hliníku snižuje tloušťku difúzní vrstvy, která se při žárovém pokovení vytváří. Ovlivní se tím i složení difúzní vrstvy. Podle rovnovážného diagramu ternární soustavy Al-Fe-Si, který



Obr. 8. Rtg. obrazy rozložení Al, Si a Fe v oblasti povlaku a přechodu do ocelového plechu



Obr. 9. Kombinovaný rtg. obraz rozložení Al, Si a Fe v oblasti povlaku a přechodu do ocelového plechu



Obr. 10. Výsledek liniové analýzy obsahu Al, Si a Fe v přechodu z ocelového plechu do povlaku

uvádí MONDOLFO [91] se pro naměřené koncentrace prvků dá předpokládat ve slitině výskyt různých fází (Fe_2SiAl_8 , FeAl_3 , FeSiAl_3). Vznik difúzní vrstvy je však nerovnovážný děj a na základě údajů z rovnovážného diagramu nelze provést specifikaci množství ani charakteru jednotlivých přítomných fází. S ohledem na naměřené koncentrace prvků se dá předpokládat převážné zastoupení fáze Fe_2SiAl_8 .

7.2. Svařovací pracoviště a metody měření fyzikálních veličin svařovacího procesu

Při návrhu a realizaci experimentálního pracoviště se vycházelo ze základního vybavení určeného ke stanovení vhodných svařovacích parametrů pro svařování žárově pohliníkováných plechů v práci [92].

Experimentální práce se prováděly na svařovacím stroji WBP 80.2 vybaveném řídicí skříní IS-B 50. Systém řízení stroje neumožňuje programové řízení průběhu svařovací síly ani svařovacího proudu.

Svařovací pracoviště bylo vybaveno tak, aby se umožnilo sledování vybraných fyzikálních veličin svařovacího procesu. Celkové blokové schéma pracoviště je na obr P-41. Při svařování lze sledovat:

- a) svařovací proud (efektivní nebo maximální hodnotu),
- b) časový průběh svařovacího proudu,
- c) časový průběh napětí mezi elektrodami,
- d) časový průběh svařovací síly,
- e) časový průběh tepelné expanze svaru,
- f) svařovací čas.

Ke sledování tepelné expanze svaru byl použit indukční snímač vlastní konstrukce. Schematický řez snímačem je na obr. P-42. Jádru snímače je uloženo v kluzných vedeních a pružinou je zajištěna jeho poloha ke stavitelnému dorazu sloužícímu k nastavení předpětí pružiny. Při dosedu elektrod na svařované plechy je jádro snímače vychýleno dotykem spojeným s horním ramenem stroje. Pružina zajišťuje stálý kontakt jádra snímače a dotyku a tím i sledování relativního pohybu elektrod.

Snímač je v můstkovém zapojení na tenzometrické aparatuře TDA-3, kde se nastavuje potřebné zesílení a citlivost. Výstupní signál z tenzometrické aparatury se vede na smyčku oscilografu 3-SO-101. Kalibrační křivka snímače je na obr. P-43.

Pro měření efektivní nebo maximální hodnoty svařovacího proudu se používal měřič svařovacího proudu a času VÚZ MZP-201. Signál pro měření proudu se získává z toroidního snímače umístěného na spodním rameni svařovacího stroje, tj. v sekundárním obvodu svařovacího transformátoru. Ke sledování časového průběhu svařovacího proudu se využívá výstupní signál měřiče svařovacího proudu a času. Vstup na smyčku oscilografu 3-SO-101 je proveden přes dělič napětí. Určení poměru mezi výchylkou signálu na registračním zařízení a skutečnou hodnotou svařovacího proudu se provedlo na základě statistického zpracování

30 naměřených hodnot maximálního svařovacího proudu měřičem VÚZ MZP-201. Zpracování výsledků potvrdilo, že přesnost měření maximální hodnoty proudu se pohybuje v mezích $\pm 1,5 \%$ udávaných výrobcem přístroje. Výchylka 1 mm na registračním záznamu oscilografu odpovídá 1,095 kA.

Snímací konektory pro sledování časového průběhu napětí mezi elektrodami jsou umístěny na špičce elektrody z důvodu snížení rušivého vlivu indukovaného napětí ve smyčce tvořené snímacími vodiči po uzavření proudového okruhu. Snímací vodiče byly k elektrodové špičce připevněny šroubem M3 ve vzdálenosti 7 mm od pracovní části. Před vstupem na smyčku oscilografu se signál napětí upravuje převodníkem RFT. Určení poměru mezi výchylkou signálu na registračním záznamu z oscilografu a skutečnou hodnotou napětí mezi elektrodami při určitém nastavení převodníku RFT se provedlo s využitím signálu z RC generátoru kmitů BM-534 přivedeného na snímací vodiče napětí. Napětí přiváděné do převodníku se měřilo milivoltmetrem Tesla BM-512 (presnost přístroje 1,5 %). Výchylka 1 mm na registračním záznamu odpovídá hodnotě 0,062 V. Ukázka záznamu z registračního zařízení oscilografu je na obr. P-44.

Pro měření svařovací síly lze použít tenzometrický snímač síly s polovodičovými tenzometry, zabudovaný v držáku horní elektrodové špičky. Celková konstrukce horní elektrody zajišťuje spolehlivý přívod svařovacího proudu i chlazení elektrodové špičky. Vzhledem k ohybovému momentu, který vzniká v důsledku svařovací síly působící mimo osu elektrody, je držák horní elektrodové špičky veden v kuličkovém vedení. Kuličkové vedení zajišťuje navíc přesný dosed elektrodových špiček, resp. souosost horní a dolní elektrody. Tenzometrický snímač je napájen stabilizovaným stejnosměrným napětím 7 V ze zdroje BS-525. Záznam průběhu svařovací síly lze provádět na oscilografu. V průběhu experimentálních prací se záznam svařovací síly prováděl pouze při seřízení snižovače tlaku vzduchu a nastavení dosedu elektrod. Celkový pohled na horní držák elektrodové špičky včetně elektrody a upevnění snímacích vodičů napětí je na obr. P-45.

7.3. Návrh programu experimentálních prací

Při návrhu programu experimentálních prací se vycházelo ze zkušeností získaných z ověřovacích zkoušek svařování žárově pohlínkovaných plechů zaměřených na hodnocení životnosti elektrod [4, 5, 15] a kvality svarových spojů [6]. Základním úkolem při návrhu systému monitorování a řízení svařovacího procesu je výběr vhodné kontrolní veličiny s těsnou korelační závislostí na kritériu kvality svaru. V souladu se schválenými tézemi a konečným cílem disertační práce se experimentální práce zaměří na:

a) Soubory měření se svařováním s konstantně nastavenými svařovacími parametry až do okamžiku, kdy se přestanou tvořit svarové čochy a svary již nemají vyhovující jakost. Výchozí svařovací parametry budou zvoleny na základě dříve provedených experimentálních prací a získaných zkušeností v [4, 5, 15, 36, 92, 93]. Při prováděných experimentech se budou sledovat průběhy tepelné expanze svaru, napětí mezi elektrodami a svařovacího proudu s cílem stanovit souvislosti mezi průběhy snímaných veličin a výslednou jakostí svarů.

b) Soubory měření s kompenzací rostoucího opotřebení elektrod změnou svařovacích parametrů. Vzhledem k výkonovým možnostem použitého svařovacího stroje a systému elektronického řízení stroje bude opotřebení elektrod kompenzováno prodlužováním svařovacího času. Experimenty uvedené pod bodem a) budou nejprve doplněny o soubory měření, u kterých se opotřebení elektrod bude kompenzovat prodlužováním svařovacího času s cílem dosahovat maxima na křivce tepelné expanze svaru, resp. pohybovat se na hranici výstřiků tekutého kovu.

Na základě vyhodnocení průběhu sledovaných veličin svařovacího procesu budou stanoveny vhodné kontrolní veličiny indikující kvalitu svarů a vhodný okamžik pro ukončení svařovacího procesu a pro obnovu pracovní části elektrody. Závěrečné experimentální práce se zaměří na soubory měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času podle namě-

řených hodnot kontrolní veličiny.

Při stanovení rozsahu experimentálních prací se musí respektovat stochastický charakter výsledků svařovacího procesu. Přehled plánovaných experimentálních prací a označení jednotlivých souborů měření podává tabulka 4.

Tabulka 4. Plánované experimenty a jejich označení

Druh experimentů	Označení souborů měření
Soubory měření s konstantně nastavenými svařovacími parametry	č. 1 - 3 (X_1)
Soubory měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času (kritériem ukončení svařovacího procesu je dosažení maxima na křivce tepelné expanze nebo hranice výstřiků)	č. 4 - 6 (X_2)
Soubory měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času (kritériem ukončení svařovacího procesu je dosažení určité hodnoty kontrolní veličiny)	č. 7 - 9 (X_3)

Po celkovém vyhodnocení realizovaného programu experimentálních prací a výběru vhodných kontrolních veličin bude vypracován algoritmus řízení svařovacího procesu.

Stanovení výchozích svařovacích parametrů a technologických podmínek plánovaných experimentů bylo provedeno na základě předchozích prací provedených na KPT. Uvedené podmínky platí pro soubory měření č. 1-9.

Svařovací síla $F_s = 2\ 250\ \text{N}$

Výkon svařovacího stroje - maximum
na prvním stupni přepojovače - to
odpovídá efektivní hodnotě svařovacího proudu $I_{ef} \approx 10\ \text{kA}$

Výchozí nastavení svařovacího času (na hranici výstřiku)	$t_s = 0,12 \text{ s}$
Dotlak	$t_d = 0,42 \text{ s}$
Kování	$t_k = 0,20 \text{ s}$
Kadence (při svařování svarů mezi sériemi zkušebních vzorků)	12 min^{-1}
Množství chladicí vody	$(3,5-4) \text{ l.min}^{-1}$

Při experimentech se budou používat přímé vsazované elektrodové špičky C 16 ON 05 2675.2 ze slitiny Cu-Cr podle ON 42 3039.71. Průměr dosedací plochy elektrodových špiček byl stanoven na základě porovnání různých údajů a doporučení v [11, 87, 94, 95, 96] a v souladu s předchozími experimenty v [36] na 5 mm pro tloušťku plechu 0,8 mm. Na základě výsledků studia životnosti elektrodových špiček byly zvoleny kuželové elektrody s vrcholovým úhlem 60° . Pracovní část se zhotoví soustružením a na elektrodě bude závit pro snadné uvolnění z držáků. Tvar a hlavní rozměry elektrod jsou na obr. P-46a) a na obr. P-46 b) je schéma vysvětlující výměnu elektrod pomocí matice a rozpěrného kroužku.

7.4. Metodický postup pro stanovení a vyhodnocení kontrolních veličin svařovacího procesu

Na základě studia průběhů snímaných veličin svařovacího procesu je nutno v souladu s cílem disertační práce stanovit kontrolní veličinu (veličiny), které s dostatečnou přesností umožní stanovit kvalitu svarů.

Pro vyhodnocování kvality svarových spojů se musí určit základní kritérium kvality svaru y . Veličinu měřenou v průběhu svařovacího procesu k posouzení kvality svaru označme x . Kritérium kvality svaru y i hodnota x měřená na svařovacím procesu jsou náhodné veličiny. Z povahy problému vyplývá, že budeme zkoumat dvourozměrnou náhodnou veličinu (ξ, η) nabývající hodnot (x, y) . Základní soubor tvořený množinou dvojic hodnot dvou náhodných veličin x, y je nekonečný.

V souvislosti s cílem práce se bude zkoumat kvantitativní závislost, při níž změny proměnné x vedou ke změnám podmíněné střední hodnoty $E(\eta|x)$ druhé závisle proměnné veličiny η . Forma této statistické závislosti se označuje jako závislost korelační (korelace). Funkce vyjadřující závislost podmíněné střední hodnoty závisle proměnné η na hodnotách proměnné x je tzv. regresní funkce [97]. Ke stanovení regresní funkce se ze základního souboru dvojic hodnot x, y musí získat náhodný výběr přiměřeného rozsahu.

Výběr dvojic hodnot y, x ke statistickému vyhodnocení byl proveden po následující úvaze.

Nechť Ω_1 je základní prostor představující množinu všech realizovatelných experimentů s pevně nastavenými svařovacími parametry, během kterých se svařuje až do okamžiku, kdy se přestávají tvořit svarové čocky (zkoušky životnosti elektrod). Pokud jednotlivé realizace zkoušek životnosti elektrod označíme $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, potom $\Omega_1 = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, přičemž $n \rightarrow \infty$. Při realizaci jednotlivé zkoušky životnosti získáme prvek ω náhodně vybraný z množiny Ω_1 . Provedeme-li celkově m zkoušek životnosti elektrod a označíme je $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m$, potom množina $X_1 = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m\}$ je podmnožinou množiny Ω_1 , tj. $X_1 \subset \Omega_1$. Množinu X_1 lze považovat za náhodný výběr m prvků z množiny Ω_1 , pokud $m \ll n$.

Obdobnou úvahu lze provést pro základní prostor Ω_2 představující množinu všech realizovatelných experimentů s kompenzací opotřebení elektrod zvyšováním svařovacího času s ukončením svařovacího procesu při dosažení maxima na křivce tepelné expanze svaru a omezením maximálního času svařování. Provedeme-li opět m těchto experimentů, které označíme $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m$ potom množina $X_2 = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m\}$ je podmnožinou množiny Ω_2 , tj. $X_2 \subset \Omega_2$. Množinu X_2 lze považovat za náhodný výběr m prvků z množiny Ω_2 pokud $m \ll n$.

Při realizaci experimentů zahrnutých v množině X_1 se budou vytvářet svarové spoje v rozmezí kvality od optimální úrovně zajištěné vhodným nastavením výchozích svařovacích parametrů

a geometrií pracovní části elektrod až do svarových spojů bez svarové čočky (tj. nevyhovující kvality). U experimentů zahrnutých v množině X_2 budou vznikat svarové spoje s optimální kvalitou zajištěnou opět výchozími parametry experimentů a svary s větším rozměrem, neboť postupným zvětšováním dosedací plochy elektrod a prodlužováním svařovacího času se svary zvětšují.

Množina X vytvořená sjednocením množin X_1 a X_2 tj. $X = X_1 \cup X_2$ bude zahrnovat experimenty, během kterých se vytvoří svarové spoje v celém rozsahu velikostí, které mohou přicházet do úvahy za určitých technologických podmínek svařování a geometrie pracovní části elektrod.

Vzhledem k tomu, že každá realizace experimentu z množiny X_1 a X_2 představuje provedení velkého množství svarů, je nutno rozhodnout o vhodném způsobu vzorkování, tj. výběru svarů ke komplexnímu posouzení a stanovení jednotlivých dvojic hodnot veličin x, y . Při návrhu metodického postupu realizace experimentů uvedeného v části práce 7.5 se vycházelo ze zkušeností získaných v práci [36] a ze zjištění, že hlavním faktorem ovlivňujícím kvalitu svarů při svařování pokovených ocelových plechů je rychlé opotřebování elektrod. U experimentů patřících do množiny X_1 a X_2 se postupuje tak, že po nastavení svařovacích parametrů se svaří šestice zkušebních vzorků a další šestice se svařují vždy po vytvoření dalších 100 svarových spojů. Zpracování výsledků u takto získaných sérií zkušebních vzorků bude provedeno v souladu s následující úvahou.

Nechť $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ je množina, kde c_i je prvek tvořený šesticí vzorků získaných po předchozím svaření k.100 svarů u jednotlivých experimentů spadajících do množiny X_1 (obdobně i pro X_2). Prvek c_i lze pokládat za náhodný výběr z množiny C při náhodné realizaci experimentu z množiny X_1 (obdobně X_2). Při zpracování výsledků jednotlivých sérií zkušebních vzorků se jednotlivé šestice stanovených dat považují za náhodný výběr charakterizující svarové spoje získané v určité fázi opotřebení elektrod.

Souhrn všech dvojic hodnot x , y získaných realizací experimentů zahrnutých v množině X bude graficky zpracován do korelačního diagramu (na osách diagramu jsou vyznačeny stupnice hodnot ξ a η), kde každé dvojici hodnot x , y bude odpovídat bod v rovině o souřadnicích (x, y) . Vzhledem ke způsobu realizace experimentů z množiny X a ke způsobu vzorkování bude mít výskyt dvojic hodnot x , y s optimální úrovní kritéria kvality svaru y poměrně malou četnost. Korelační diagram však poslouží podle seskupení bodů k odhadu existence, eventuálně povahy, závislosti mezi oběma veličinami. Pro získané soubory dat x , y budou v souladu s ČSN 01 0252 určeny také korelační poměry, neboť korelační poměr má vzhledem k typu korelační závislosti univerzální použití. Korelační poměr neslouží k určení typu korelační závislosti, ale pouze odhaluje stupeň její těsnosti.

Pro stanovení korelačního poměru se data dvojic hodnot dvourozměrného statistického souboru náhodných veličin ξ a η nejprve seskupí do tříd stanovených pro každou z obou náhodných veličin. Pro hodnoty náhodné veličiny ξ zvolíme m_1 tříd a pro hodnoty náhodné veličiny η m_2 tříd. Políčko v i -tém řádku a j -tém sloupci tabulky ($i = 1, 2, 3, \dots, m_1$; $j = 1, 2, 3, \dots, m_2$) představuje třídu pro takové dvojice hodnot náhodných veličin ξ a η , u nichž hodnota ξ padne do své i -té třídy a hodnota η do své j -té třídy. Tuto třídu (políčko tabulky) reprezentují třídní znaky z_{1i} a z_{2j} dvou náhodných veličin ξ a η vytvořené tak, že z_{1i} je třídní znak i -té třídy náhodné veličiny ξ a z_{2j} je třídní znak j -té třídy náhodné veličiny η . Tímto způsobem lze data zařadit v tzv. korelační tabulce. Absolutní četnost dvojic hodnot náhodných veličin ξ a η v i -tém řádku a j -tém sloupci korelační tabulky označme n_{ij} . Četnost hodnot v i -tém řádku je dána vztahem (34) a četnost hodnot v j -tém sloupci vztahem (35).

$$n_{i.} = \sum_{j=1}^{m_2} n_{ij} \quad (34)$$

$$n_{.j} = \sum_{i=1}^{m_1} n_{ij} \quad (35)$$

Jestliže n je rozsah dvourozměrného statistického souboru náhodných veličin ξ a η , potom platí vztah (36)

$$n = \sum_{i=1}^{m_1} n_{i.} = \sum_{j=1}^{m_2} n_{.j} = \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} n_{ij} \quad (36)$$

Korelační závislost v dvourozměrném statistickém souboru je tím těsnější, čím je menší rozptyl hodnot y kolem $E(\eta|x)$. Mírou stupně těsnosti korelační závislosti dvourozměrného statistického souboru bude korelační poměr vyjádřený vztahem (37) [97].

$$\eta_{y|x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m_1} \frac{1}{n_{i.}} \left(\sum_{j=1}^{m_2} z_{2j} n_{ij} \right)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^{m_2} z_{2j} n_{.j} \right)^2}{\sum_{j=1}^{m_2} x_{2j}^2 n_{.j} - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^{m_2} x_{2j} n_{.j} \right)^2}} \quad (37)$$

Korelační poměr může nabývat hodnot od 0 do 1. Čím je jeho hodnota větší, tím je korelační závislost těsnější.

Na základě korelačních diagramů a vypočítaných korelačních poměrů, bude proveden předběžný výběr vhodné kontrolní veličiny svařovacího procesu a k ověření vhodnosti výběru kontrolní veličiny budou provedeny experimenty z množiny $X_3 \subset \Omega_3$, kde Ω_3 je základní soubor představující množinu všech realizovatelných experimentů s kompenzací opotřebení elektrod na základě zvolené kontrolní veličiny svařovacího procesu. Metodika realizace těchto experimentů je vysvětlena v části 7.5. Realizací experimentů z množiny X_3 se získají další dvojice hodnot x, y s předpokladem, že hodnoty kritéria kvality svarů budou blízké optimální úrovni.

Souhrn dat všech dvojic hodnot x, y z realizovaných experimentů v množinách X_1, X_2 a X_3 se vyhodnotí metodami statistické analýzy. Konečným cílem vyhodnocení získaných údajů bude stanovení tolerančních mezí, ve kterých se s vysokou pravděpo-

dobností bude pohybovat kvalita vysokého procentuálního podílu vytvářených svarů (pro rozmezí technologických podmínek svařování a geometrii pracovní části elektrod vyhodnocovaných experimentů).

7.5. Metodický postup realizace experimentů

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

- a) Před začátkem svařování se změří délka částí elektrodových špiček vyčnívajících z držáků. Na bílý karton se provede 6 otisků pracovní části horní i spodní elektrody způsobem vyznačeným na obr. P-47.
- b) Postupné svaření prvních 10 svarů nutných pro ustálení podmínek průchodu svařovacího proudu. U těchto svarů se provádí kontrolní oscilografický záznam průběhů napětí mezi elektrodami, svařovacího proudu a tepelné expanze svaru.
- c) Svaření šesti zkušebních vzorků na přeplátovaných páslech 100 x 1000 mm s vyznačenými obrysy vzorků pro zkoušku tahem na odtržení plechů a vyraženým číselným označením. Způsob sestavení dvou pásů pro svařování zkušebních vzorků je na obr. P-48. U všech zkušebních svarů se provádí oscilografický záznam sledovaných veličin.
- d) Svaření svarových spojů mezi jednotlivými sériemi zkušebních vzorků na přeplátovaných páslech 30 x 1000 mm. Rozteč svarů se udržuje přibližně 15 mm a kadence 12 min^{-1} . Oscilografický záznam snímaných veličin se neprovádí a kvalita těchto svarů se nehodnotí.
- e) Pro hodnocení opotřeбенí elektrod se změří délka jejich částí vyčnívajících z držáku a na bílý karton se provede 6 otisků elektrod stejně jako v bodě a).

V dalším průběhu souborů měření se postupuje opakováním činností podle bodů c), d) a e). Série zkušebních vzorků se svařují po provedení 50, 100 a dále vždy po svaření každých dalších 100 svarů až do okamžiku, kdy se přestávají tvořit svařové čocky (zjištění občasnou kontrolou na odloupenutí svarů vytvářených na přeplátovaných pásech 30 x 1000 mm podle bodu d).

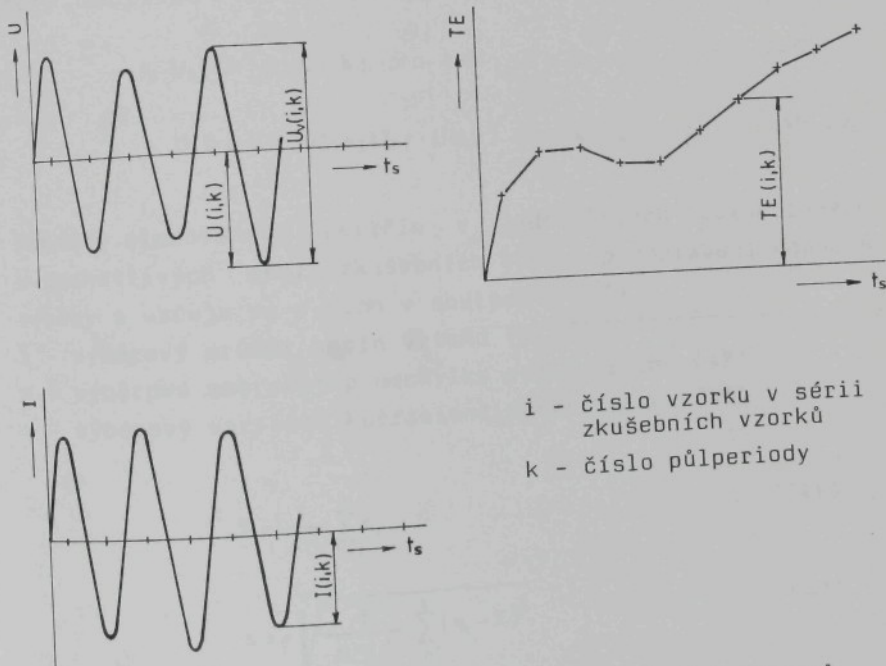
U jednotlivých souborů měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času do okamžiku dosažení maxima na křivce průběhu tepelné expanze svaru se postupovalo obdobným způsobem jako u souborů měření s pevně nastavenými svařovacími parametry. Během postupného vytváření svarů podle bodu d) se změnou svařovacího času udržovaly podmínky svařování na hranici výstřiku (pokud nedošlo k výstřiku během provedení 30 svarů byl zvýšen svařovací čas o jednu polohu na přepínači), pokud došlo k výstřiku 3krát po sobě, byl svařovací čas o jednu polohu snížen). Před zhotovením zkušební série vzorků podle bodu c) se nejprve předběžně podle oscilografického záznamu ověřilo vhodné nastavení svařovacího času. Postup činností podle bodu c), d) a e) pokračuje do okamžiku, kdy se dosáhne zvýšení svařovacího času z 0,12 s na 0,30 s.

U souborů měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času podle hodnot vybrané kontrolní proměnné se nejprve postupuje podle bodů a), b) a c). Vhodný svařovací čas pro další zkušební sérii zkušebních vzorků se určí po vyhodnocení kontrolní veličiny u tří předběžně vytvořených svarů. Podle výsledků se nastaví vhodný svařovací čas a svaří se série šesti 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 (tj. z 0,12 s na 0,24 s).

7.6. Metodický postup vyhodnocení experimentů

Při vyhodnocování jednotlivých souborů měření se postupuje následujícím způsobem.

- a) Z oscilografických záznamů se provede vyhodnocení průběhů svařovacího proudu, napětí mezi elektrodami a tepelné expanze svaru. Na Abbeho komparátoru se stanoví hodnoty amplitud svařovacího proudu v jednotlivých půlvlnách a v odpovídajícím časovém okamžiku (tj. v místech, kde $dI/dt = 0$) se provede stanovení výchylek tepelné expanze svaru a napětí. Mezi průběhem proudu a napětí nebyl zjištěn fázový posun, proto se odečítaly hodnoty amplitud napětí v jednotlivých půlvlnách. Odečítání hodnot a jejich označování je na obr. 11.



i - číslo vzorku v sérii
zkušebních vzorků
 k - číslo půlperiody

Obr. 11. Princip vyhodnocení oscilografických záznamů a označování jednotlivých hodnot snímaných veličin

Pro okamžiky, kdy $dI/dt = 0$ se výpočtem podle vztahu (38) určí hodnoty dynamického elektrického odporu a podle vztahu (39) hodnoty okamžitých maximálních výkonů.

$$R(i,k) = \frac{U(i,k)}{I(i,k)} \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n, \text{ pro } k = 1, 2, \dots, j \quad (38)$$

$$P(i,k) = U(i,k) \cdot I(i,k) \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n, \text{ pro } k = 1, 2, \dots, j \quad (39)$$

n - celkový počet vzorků ve zkušební sérii

j - celkový počet půlperiod.

Pro posouzení jiného způsobu vzorkování hodnot napětí byly určeny také hodnoty napětí mezi po sobě následujícími vrcholy amplitud (obr. 11) podle vztahů (40.1) a (40.2).

$$U_v(i,k) = U(i,k) \quad \text{pro } k = 1 \quad (40.1)$$

$$U_v(i,k) = U(i,k-1) + U(i,k) \quad \text{pro } k \geq 2 \quad (40.2)$$

b) Hodnoty sledovaných veličin v jednotlivých půlperiodách u jednotlivých sérií zkušebních vzorků představují náhodné výběry a určuje se u nich v souladu s [98]:

$\bar{x}$ - výběrový průměr podle vztahu (41)

s - výběrová směrodatná odchylka podle vztahu (42)

v - výběrový variační koeficient podle vztahu (43)

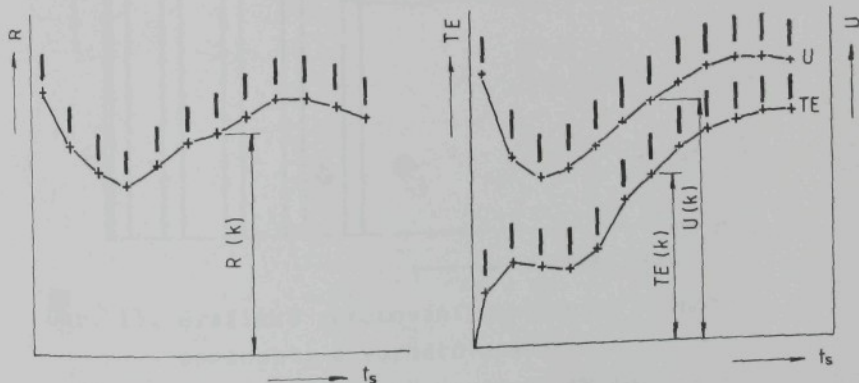
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (41)$$

$$s = + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (42)$$

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (43)$$

Hodnoty x_i ($i = 1, 2 \dots n$) představují příslušné hodnoty náhodných veličin pojatých do náhodného výběru. V našem případě představují náhodné veličiny hodnoty $U(i,k)$, $I(i,k)$, $R(i,k)$, $TE(i,k)$, vždy pro určitou hodnotu k . Vypočítané výběrové průměry pro jednotlivé veličiny v jednotlivých půlperiodách se označí $U(k)$, $R(k)$, a $TE(k)$.

- c) Pro každou zkušební sérii vzorků se graficky vyhodnotí časová závislost výběrových průměrů hodnot dynamického elektrického odporu R , napětí mezi elektrodami U a tepelné expanze svaru TE během svařovacího procesu. V grafech se u jednotlivých bodů představujících hodnoty výběrových průměrů v jednotlivých půlperiodách uvádějí hodnoty výběrových variačních koeficientů. Podle výběrových variačních koeficientů se posuzuje, jak se mění relativní charakteristika rozptýlení u jednotlivých veličin během svařovacího procesu v určitém stádiu opotřebení elektrod. Způsob grafického zpracování výsledků je na obr. 12.



Obr. 12. Princip kreslení závislosti hodnot $R(k)$, $U(k)$, $TE(k)$ na čase (t_s svařovací čas)

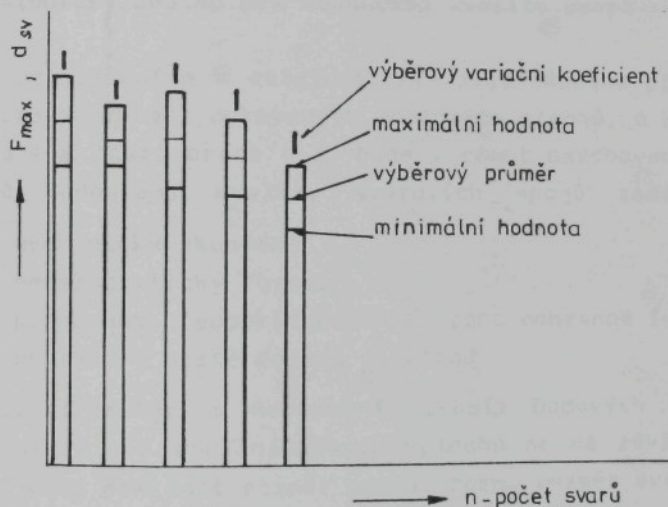
- $R(k)$ - výběrový průměr hodnot $R(i,k)$ pro určitou půlperiodu k
- $TE(k)$ - výběrový průměr hodnot $TE(i,k)$ pro určitou půlperiodu k
- $U(k)$ - výběrový průměr hodnot $U(i,k)$ pro určitou půlperiodu k
- - výběrové variační koeficienty

(Pokud se grafy TE a U kříží, přiléhají výběrové variační koeficienty vždy k příslušné křivce.)

d) U každé zkušební série vzorků se v souladu s postupem uvedeným v části 7.7 provede vyhodnocení kvality svarů. Vzorek pro metalografický rozbor se vybere náhodným způsobem.

Z naměřených hodnot únosností svarů $F_{\max}$ a rozměrů svarů d_{sv} se v jednotlivých sériích zkušebních vzorků opět v souladu s [98] určí podle vztahu (41), (42), (43) charakteristiky náhodného výběru. Hodnoty náhodných veličin spojených do výběru nyní představují hodnoty $F_{\max}(i)$ a $d_{sv}(i)$, tj. výsledky únosností a rozměrů jednotlivých svarů.

Formou sloupcových grafů se zpracují závislosti $F_{\max} - n$ a $d_{sv} - n$, kde n nyní představuje počet vytvořených svarů, způsobem zřejmým z obr. 13. Z uvedených závislostí



Obr. 13. Grafické zpracování naměřených hodnot únosnosti a rozměrů svarů

$F_{\max}$ - maximální únosnost svarů

d_{sv} - rozměr svarů

lze posoudit, jak se mění základní ukazatele kvality svarů a jejich relativní charakteristiky rozptýlení v průběhu rostoucího opotřebení elektrod.

e) Na Abbeho komparátoru (s ohledem na snadnost měření) se ve dvou na sebe kolmých směrech změří vždy 6 otisků horní i spodní elektrody zhotovených způsobem popsáným v části 7.5. Z naměřených hodnot se určí aritmetické průměry otisků pro obě elektrody. Výsledky měření otisků elektrod d_{ot} se graficky vyhodnotí v závislosti na počtu svařených bodů n , tj. $d_{ot} = f(n)$. Graficky se zpracují také výsledky měření úbytků délky elektrod, a to opět v závislosti na počtu svařených bodů $\Delta l_{el} = f(n)$. Z průběhu obou grafů lze sledovat rostoucí opotřebení elektrod v závislosti na počtu svařených bodů.

7.7. Metodický postup při hodnocení kvality svarů

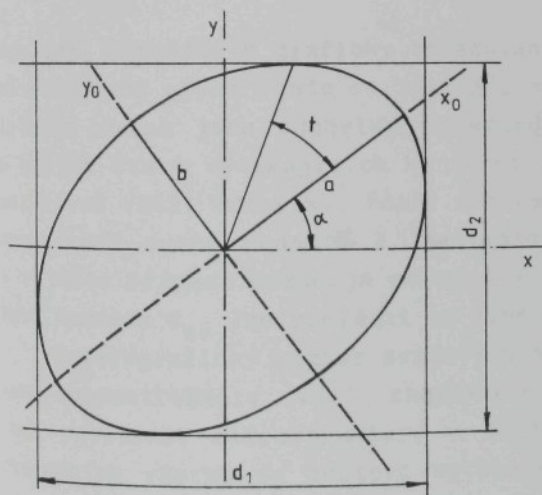
S přihlédnutím k metalurgickým zvláštnostem při bodovém odporovém svařování pokovených ocelových plechů, o kterých se pojednává v části práce 4.2, bude v rámci navrhovaných experimentů hodnocení kvality svarových spojů zaměřeno na:

- mechanické zkoušení
- metalografický rozbor
- posouzení předpokládaného snížení ochranné funkce povlaku v místě dosedu elektrod.

Za základní kritérium hodnocení jakosti bodových svarů při svařování žárově pohliníkováných plechů se na základě prací [6, 99] bude pokládat rozměr svaru, resp. rozměr svarové čočky. Pro mechanické zkoušení svarů se bude používat zkouška tahem na odtržení plechů, která objektivně hodnotí kvalitu svarů v celém rozsahu rozměrů svarů, které se mohou tvořit za určitých technologických podmínek a geometrie pracovní části elektrod [99].

Zkušební tělesa se svařují metodickým postupem uvedeným v části 7.5. Ze svařených pásů se jednotlivá tělesa oddělují na tabulových nůžkách. Tvar zkušební tělesa před ohnutím do tvaru U je na obr. P-49 a) a na obr. P-49 b) je schéma provede-

ní zkoušky i tvar zkušební tělesa po ohnutí do konečného tvaru. Zkoušky se provádějí na trhacím stroji FM 1000 s konstantní rychlostí pohybu upínacích částí $0,15 \text{ mm.s}^{-1}$. Při zkoušce se určí maximální únosnost svaru $F_{\max}$ před porušením tělesa. Po provedení zkoušky se vyhodnotí charakter porušení tělesa a na Abbeho komparátoru se ve dvou na sebe kolmých směrech změří rozměr svaru. Z naměřených hodnot se určí ze vztahu (44) aritmetický průměr rozměru svaru d_{sv} . Při tomto způsobu určování rozměru svaru vzniká určitá nepřesnost, neboť hodnota d_{sv} se neurčuje z minimální a maximální hodnoty rozměru svaru. Vznikající svary nejsou přesně kruhové, ale jejich tvar se dá přirovnat k tvaru elipsy. Za předpokladu, že svar má tvar elipsy o poloosách a , b ($a > b$) může být tato elipsa při měření rozměru svaru natočena vzhledem ke směru měření o libovolný, předem neznámý úhel α tak, jak je vyznačeno na obr. 14.



$$d_{sv} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (44)$$

Obr. 14. Stanovení rozměru svaru

Při zkoušce na odtržení plechů se svarová čočka prakticky vždy vytrhne po obvodě z jednoho plechu (nebo částečně z obou plechů) a z hlediska únosnosti svaru bude především dů-

ležitá délka obvodu svaru. Výpočtem na samočinném počítači SAPI-1 byla zjištěna maximální relativní chyba, která může vzniknout uvedeným postupem proměřování svaru, mezi délkou elipsy s určitým poměrem poloos $a:b$ a délkou obvodu kruhu s průměrem odpovídajícím hodnotě d_{sv} (tj. pro případ, kdy součet naměřených hodnot d_1 a d_2 je maximální). Délka obvodu elipsy se určí ze vztahů (45.1) a (45.2), obvod kruhu ze vztahu (46) a relativní chyba ze vztahu (47).

$$O_{el} = \pi(a+b) \cdot \frac{64-3l^2}{64-16l^2} \quad (45.1)$$

$$l = \frac{a-b}{a+b} \quad (45.2)$$

$$O_{max} = \pi d_{max} \quad (46)$$

$$\delta_r = \frac{O_{max} - O_{el}}{O_{el}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (47)$$

Výsledek výpočtů je graficky zpracován na obr. P-50. Maximální relativní chyba roste se zvyšujícím se poměrem $a:b$. U kvalitních svarů jsou odchylky od kruhového tvaru malé, pouze u malých svarů vznikajících ke konci životnosti elektrod lze pozorovat větší odchylky. Poměr $a:b$ však nepřekročil u vyhodnocovaných svarů hodnotu 2. Maximální relativní chyba však i v tomto případě dosahuje pouze 3 %. Postup měření a stanovení hodnoty d_{sv} lze pokládat za plně vyhovující.

Metalografický rozbor svarových spojů se zaměří na posouzení makrostruktury svarů, charakteru adhezni oblasti a celkové posouzení mikrostruktury v oblasti svaru. Z vybraných zkušebních vzorků se zhotoví metalografické výbrusy v osové rovině svaru, kolmo na povrch plechů. Před oddělením vzorku pro přípravu výbrusu se osová rovina vyznačí dvěma otvory ø 1 mm, aby během přípravy výbrusu zůstala možnost kontroly skutečné polohy roviny výbrusu. Schematicky je odběr vzorku pro zhotovení výbrusu nakreslen na obr. P-51.

Při hodnocení makrostruktury se hodnotí především velikost a tvar svarové čočky, hloubka vtisku elektrod, metalurgické vady svaru, velikost a charakter adhezní oblasti.

V místě dosedu elektrod se v průběhu svařovacího procesu zjevně poškodí povlak plechů. Posouzení rozsahu snížení ochranné funkce povlaku bude provedeno na základě ED analýzy zbytků povlaku v místě dosedu elektrod a podle stanovené tloušťky zbytků povlaku.

8. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ A VÝSLEDKY PRÁCE

8.1. Vyhodnocení souborů měření č. 1-6

V souladu s návrhem programu experimentů byly realizovány tři soubory měření s konstantním nastavením svařovacích parametrů č. 1-3, u kterých se hodnotil vliv postupně rostoucího opotřebení elektrod na průběh snímaných veličin svařovacího procesu a na změnu vlastností svarových spojů. U dalších tří souborů měření č. 4-6 se opotřebení elektrod kompenzovalo prodlužováním svařovacího času. Kritériem pro ukončení svařovacího procesu bylo dosažení maxima na křivce tepelné expanze svaru, resp. hranice výstřiků.

Experimenty se prováděly v souladu s metodickým postupem uvedeným v části 7.5 a jejich vyhodnocení v souladu s metodickým postupem podle části 7.6.

Vliv postupně rostoucího opotřebení elektrod na maximální únosnost svarů a rozměry svarů u souboru měření č. 1-3 lze sledovat z průběhu závislostí maximální únosnosti svarů a rozměru svarů na počtu zhotovených svarů. Pro jednotlivé soubory měření jsou tyto závislosti na obr. P-52 až P-57. Vycházejí-li ze vztahu (48) pro volbu vhodné velikosti svaru d_{sv} v závislosti na tloušťce plechu s , potom pro tloušťku plechu 0,8 mm činí vhodný rozměr 4,5 mm.

$$d_{sv} = 5 \sqrt{s} \quad (48)$$

V souladu s ČSN 05 0005 |100| budeme za minimální přípustný rozměr svaru považovat hodnotu o 10 % menší, než je vhodná velikost svaru, tzn. přibližně 4 mm. V grafech d_{sv} - n je tato hranice vyznačena čárkovanou čarou. U souboru měření č. 1 došlo k poklesu rozměru svaru pod tuto hranici již u zkušební série vzorků svařené po provedení 50-ti svarů. V souboru měření č. 3 až v sérii vzorků svařené po provedení 600 svarů. Z grafických závislostí d_{sv} - n je vidět, že kvalita svarů (rozměr svarů d_{sv}) se v průběhu experimentů může dočasně znovu zvýšit (především u souboru měření č. 2), celkově však proces rostoucího opotřebení elektrod vede ke stavu, kdy se pře-

stávají tvořit svarové čochy. U souboru měření č. 1 byla poslední série zkušebních vzorků svařena po provedení 1000 svarů a u souboru měření č. 2 a 3 po provedení 1300 svarů. Okamžik, kdy se přestávají tvořit svarové čochy, se pokládá za konec životnosti elektrod.

S průběhem závislosti $d_{sv} - n$ velmi dobře korespondují průběhy závislostí $F_{max} - n$.

Podle hodnot výběrových variačních koeficientů lze pozorovat, jak se s rostoucím opotřebením elektrod mění relativní charakteristika rozptýlení hodnot rozměrů svarů a maximální únosnosti svarů. Největší rozptyl hodnot d_{sv} a F_{max} je u sérií zkušebních vzorků svařených ke konci životnosti elektrod.

Na obr. P-58 až P-60 jsou graficky zpracované výsledky získané při hodnocení opotřebenění elektrod u souborů měření č. 1-3. V grafech jsou vyhodnoceny úbytky délky elektrod (obrázky označené - a) a změny rozměru otisku pracovní plochy elektrod (obrázky označené - b) v závislosti na počtu zhotovených svarů. Průběh závislostí $\Delta l_{el} - n$ a $d_{ot} - n$ je obdobný u všech souborů měření. Nejrychlejší průběh opotřebenění byl u elektrod ze souborů měření č. 1, tj. u souboru s nejmenší životností elektrod. Výrazný pokles rozměru otisku dolní elektrody u souboru měření č. 3 (obr. P-60) je způsoben odlomením otřepu z elektrody). Občasné "poklesy" úbytku délky elektrod (tj. vlastně zvětšení jejich délky) jsou dokladem o vytváření nerovností na povrchu pracovní části elektrod v důsledku "nalepování" kovu z roztaveného povlaku. Po provedení cca 1000 svarů činí úbytek délky elektrod přibližně 1 mm a rozměr dosedací plochy se zvětší o 2 až 2,5 mm.

Výsledky hodnocení rozměru svarů a maximální únosnosti svarů u souborů měření č. 4-6 jsou graficky zpracované na obr. P-61 až P-66. Z obrázků je zřejmé, že kompenzace rostoucího opotřebenění elektrod prodlužováním svařovacího času, kdy kritériem pro ukončení svařovacího procesu je dosažení maxima na křivce tepelné expanze svaru (resp. hranice výstřiku), vede k postupnému zvětšování rozměrů i únosnosti svarů. Experimenty byly ukončeny po dosažení maximálního svařovacího času 0,30 s.

výběrové variační koeficienty charakterizující rozptýlení hodnot $F_{\max}$ a d_{sv} u jednotlivých sérií zkušebních vzorků se v průběhu experimentů výrazně nemění a jsou v porovnání s výběrovými variačními koeficienty stanovenými pro jednotlivé série zkušebních vzorků ze souborů měření č. 1-3 nižší.

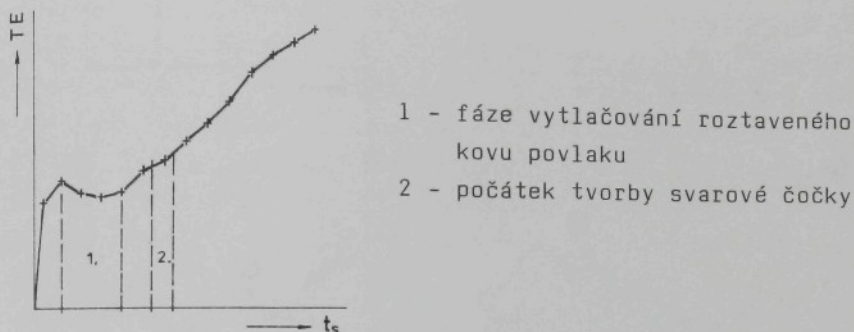
Pro úplnost jsou na obr. P-67 až P-69 výsledky hodnocení opotřebenění elektrod u souborů měření č. 4-6 (grafické zpracování je analogické jako u souborů č. 1-3). V čase ukončení experimentů činil úbytek délky elektrod přibližně 0,6 až 1,1 mm a rozměr dosedací plochy se zvětšil o 1,6 až 2,5 mm.

S ohledem na skutečnost, že u souboru měření č. 2 jsou nejvýraznější změny v průběhu závislostí $d_{sv} - n$ a $F_{\max} - n$, budou pro tento soubor měření uvedeny i další výsledky získané v souladu s metodickým postupem vyhodnocení experimentů. Ze souborů měření č. 4-6 budou uvedeny údaje získané při vyhodnocení souboru měření č. 4.

Na obr. P-70 až P-84 jsou závislosti sledovaných veličin svařovacího procesu pro jednotlivé série zkušebních vzorků ze souboru měření č. 2 a na obr. P-85 až P-92 ze souboru měření č. 4. Grafy jsou kreslené způsobem vyznačeným na schematickém obr. 12. Na obr. P-93.1 až P-93.3 jsou snímky makrostruktur svarů vybraných k metalografickému rozboru ze souboru měření č. 2 a na obr. P-94.1 až P-94.2 ze souboru měření č. 4.

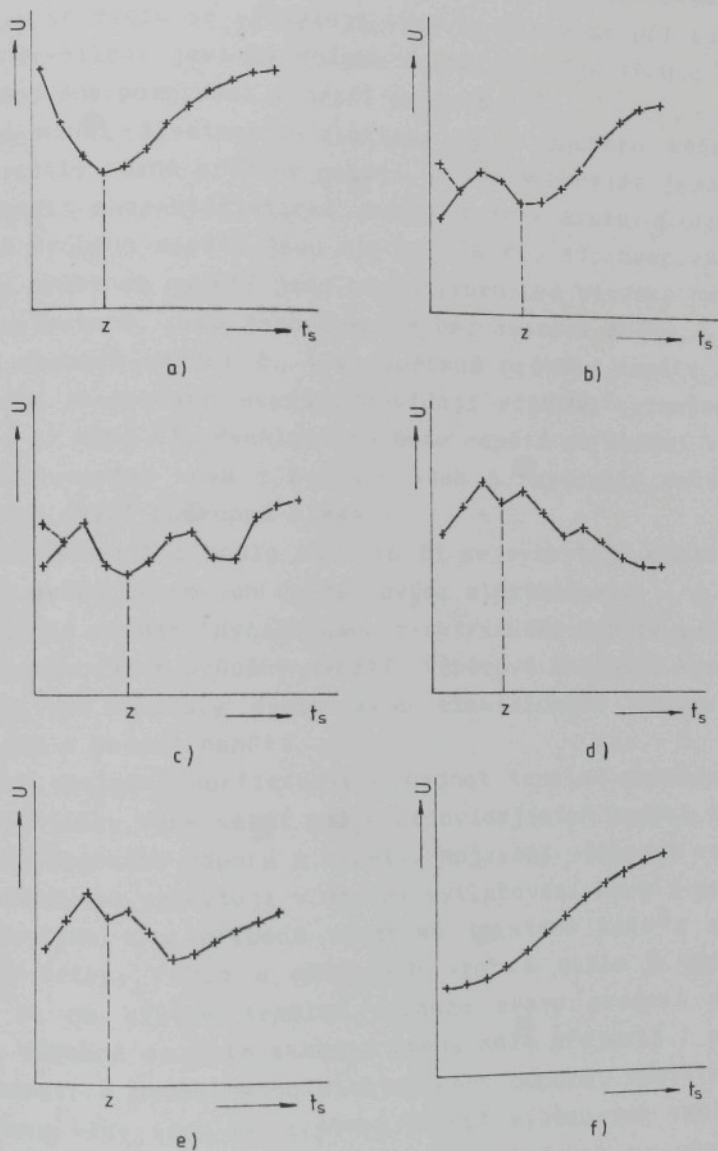
Z grafů sledovaných veličin svařovacího procesu souboru měření č. 2 (obr. P-70 až P-84) je zřejmé, že opotřebenění elektrod vede k výrazným změnám jejich časového průběhu. Charakteristický obraz o průběhu sledovaných veličin v počáteční fázi experimentů lze posoudit na obr. P-70. Napětí mezi elektrodami a dynamický elektrický odpor po počáteční fázi poklesu hodnot vykazují fázi rychlého nárůstu na maximum. Po dosažení maxima může dojít v dalším průběhu svařovacího procesu k mírnému poklesu hodnot napětí i odporu a v případě výstřiku tekutého kovu k výraznému poklesu. Dosažení minima na křivce napětí a odporu souvisí se snižováním přechodových odporů v počáteční fázi svařovacího procesu a s postupným vytlačováním roztaveného kovu povlaku v místech dosedu elektrody a ve styku

plechů v oblasti tvorby svaru. Experimentálně bylo zjištěno, že počátek tvorby svarové čochy spadající do vzestupné fáze napětí a odporu je v období zpomaleného nárůstu (eventuelně nového mírného poklesu) tepelné expanze svaru po skončení fáze vytlačování roztaveného kovu povlaku. Uvedené vývojové stádium svaru je vyznačeno na obr. 15.



Obr. 15. Souvislost průběhu tepelné expanze svaru s počátkem tvorby svarové čochy

Naměřené průběhy napětí mezi elektrodami u zkušebních vzorků ze souborů měření č. 1-6 bylo možné roztrždit do charakteristických skupin podle schematického obr. 16. Průběh napětí podle obr. 16 a) je typický pro svary vytvořené v počáteční fázi experimentů pro první série zkušebních vzorků. Pokud se postupně rostoucí opotřebení elektrod nekompenzuje změnou svařovacích parametrů, začne se průběh napětí mezi elektrodami měnit. V období před vytlačováním roztaveného kovu povlaku se může vyskytnout krátký nárůst napětí (nebo nejprve pokles a nárůst) tak, jak je vyznačeno na obr. 16 b). Na obr. 16 c) je vyznačen stav, kdy se ve fázi po vytlačování roztaveného kovu povlaku vyskytují různě "deformované" průběhy napětí, eventuelně se objeví dvě maxima. Takový průběh napětí byl např. zjištěn u vzorku č. 291 (svar č. 302 ze



Obr. 16. Charakteristické průběhy napětí mezi elektrodami u zkušebních vzorků ze souborů měření č. 1-6

souboru měření č. 2). Ze snímku makrostruktury tohoto svaru (obr. P-93.1) je zřejmé, že svar nemá pravidelnou svarovou čočku a ve svaru se vyskytují vrstvy, které se při použitém šikmém osvětlení jeví na snímku černě. Analýze těchto vrstev bude věnována pozornost v části práce 8.1.1.

Ke konci životnosti elektrod se u souborů měření č. 1-3 zjistily různé průběhy napětí, u kterých nelze jednoznačně posoudit charakteristická období tvorby svaru. Ukázky podobných průběhů napětí jsou na obr. 16 d), e). Svarové spoje s tímto průběhem napětí jsou po metalurgické stránce nedosta- tečně vytvořené, nebo jsou dokonce bez svarové čočky.

U souborů měření č. 4-6 naměřené průběhy napětí u jed- notlivých zkušebních svarů odpovídají průběhu vyznačeném na obr. 16 a) nebo b). Rychlost nárůstu napětí po období vytlačo- vání roztaveného kovu z povlaku však s rostoucím počtem vy- tvořených svarů postupně klesá.

Průběh napětí podle obr. 16 f) se vyskytuje pouze u ně- kterých svarů svařených úplně novými elektrodami.

Časové průběhy dynamického elektrického odporu velmi dob- ře korespondují s průběhy napětí. Výběrové variační koeficien- ty jsou pro hodnoty dynamického elektrického odporu mírně vyšší než u hodnot napětí.

Výběrové variační koeficienty u hodnot tepelné expanze svaru jsou prakticky vždy větší než u odpovídajících hodnot dynamic- kého elektrického odporu a napětí. Nejvyšší výběrové variační koeficienty se vyskytují v období vytlačování kovu z roztave- ného povlaku a v případě výstřiků tekutého kovu z oblasti svarové čočky. Pokud u některých vzorků došlo k výstřiku, potom se na křivce tepelné expanze svaru projeví skoková změna. Obdobně se tato skoková změna může projevit i na prů- běhu napětí a dynamického elektrického odporu. Výstřik teku- tého kovu vždy vede ke zvýšení hodnot výběrových variačních koeficientů. Uvedené skutečnosti lze sledovat na obr. P-88 a obr. P-90 až P-92.

Na základě vyhodnocení časových průběhů sledovaných veli- čin u souborů měření č. 1-6 a výsledků mechanických zkoušek

svarů lze učinit následující dílčí závěry:

a) Kvalitní svarové spoje s dostatečně velkou svarovou čočkou mají průběh napětí i dynamického elektrického odporu odpovídající obr. 16 a), b).

b) Svarové spoje s nedostatečně vyvinutou svarovou čočkou mají časové průběhy napětí i dynamického el. odporu v závislosti na stavu pracovní části elektrod různě "deformované", např. podle obr. 16 c), d), e).

c) S rostoucím opotřebením elektrod se snižuje rychlost nárůstu tepelné expanze svaru v období po skončení vytlačování tekutého kovu z roztaveného povlaku a snižuje se i maximální hodnota tepelné expanze svaru v procesu svařování.

8.1.1. Metalografické hodnocení svarových spojů

Na obr. P-93.1 až P-93.3 jsou snímky makrostruktur svarů vybraných k metalografickému rozboru u jednotlivých sérií zkušebních vzorků ze souboru měření č. 2 a na obr. P-94.1 a P-94.2 ze souboru měření č. 4. Všechny vzorky u souboru měření č. 2 jsou svařeny svařovacím časem $t_s = 0,12$ s. U vzorků ze souboru měření č. 4 jsou příslušné svařovací časy uvedeny vedle snímku makrostruktury. U snímků makrostruktur svarů ze souborů měření č. 2 i č. 4 jsou uvedeny hodnoty kontrolní veličiny SU, stanovené z průběhu napětí mezi elektrodami způsobem popsáným v části práce 8.2.

Na základě hodnocení makrostruktur svarů ze souborů měření č. 2 a 4 bylo zjištěno, že v adhezních oblastech se prakticky vždy vyskytuje tenká vrstva zasahující u některých svarů až do svarové čočky, nebo svarovou čočku částečně lemuje. V důsledku použitého šikmého osvětlení jsou na snímcích makrostruktur tyto vrstvy černé a na snímcích mikrostruktur zhotovených za přímého osvětlení naopak světlé. Na obr. P-95 je snímek okraje svarové čočky a adhezní oblasti svaru vzorku č. 265 (svar č. 10 - soubor měření č. 2). Svarová čočka je

částečně lemována tenkou "světlou" vrstvou (levý horní okraj). Adhezní oblast je v rovině výbrusu dlouhá pouze 0,3 mm. Na obr. P-96 a), b) je zachycen okraj svarové čočky a adhezní oblast svaru u vzorku č. 325 (svar č. 804 - soubor měření č. 2). Oba snímky se částečně překrývají. V rovině styku plechů v adhezní oblasti svaru je kov z povlaku prakticky vytlačen.

U svarových spojů vzorků č. 291 (svar č. 302), č. 349 (svar č. 1204) a č. 356 (svar č. 1306) ze souboru měření č. 2 se vyskytují "světlé" vrstvy ve svarových čočkách. KRAUSE [28] označuje tyto vrstvy jako hliníkové vměstky. Vzorek č. 291 je ze série zkušebních vzorků svařené po provedení 300 svarů, u které se projevil výrazný pokles rozměru svarů (graf d_{sv} - n na obr. P-54) a vzorky č. 349 a č. 356 ze sérií svařených ke konci životnosti elektrod. Ve všech případech se jedná o nedostatečně vyvinuté svarové spoje, u vzorku č. 356 se svarová čočka teprve začala tvořit. Na obr. P-97 je ve větším zvětšení snímek části svarové čočky s výskytem popisovaných vrstev. Obdobné vrstvy byly zjištěny také u svaru vzorku č. 348 (svar č. 1203 - soubor měření č. 2), u kterého byl proveden metalografický výbrus až po zkoušce tahem na odtržení plechů. Ze snímku makrostruktury na obr. P-98 je vidět, že svar má vnitřní vadu (staženinu).

U svarových spojů ze souboru měření č. 4 se ve svarových čočkách "světlé" vrstvy nevyskytují, všechny metalograficky hodnocené svary jsou dostatečně vyvinuté a nemají vnitřní vady.

Vzhledem ke skutečnosti, že klasická optická metalografie neumožňuje přesnou specifikaci charakteru "světlých" vrstev ve svarech, byla provedena jejich analýza s využitím ED analyzátoru LINK 10 000.

Na obr. P-99 jsou rtg. obrazy Al, Si a Fe v adhezní oblasti svaru u vzorku č. 265 (svar č. 10 - soubor měření č. 2) a na obr. P-100 je kombinovaný rtg. obraz těchto prvků zpracovaný programem "multi". Způsob barevného značení jednotlivých prvků je zřejmý z obrázků. Semikvantitativní mikroanalýzou

bylo zjištěno, že se obsah Al v rovině styku plechů na hranici svarové čocky pohyboval kolem 15 % a obsah Si kolem 2 %. Směrem k místu rozevření plechů v rovině styku plechů obsah Al a Si nejdříve vzrůstal, potom klesal a znovu stoupal. Ve vzdálenosti 0,15 mm od okraje svarové čocky (tj. v polovině délky adhezní oblasti) byl obsah Al 28 % a Si 3,5 %. Na konci adhezní oblasti v místě začínajícího rozevření plechů činí obsah Al již 77 % a Si 5 %. Ve vrstvičce, která částečně lemuje svarovou čocku (na obr. P-95 v horní části vlevo), byl zjištěn obsah Al 1 % a Si 0,8 %.

Na obr. P-101 jsou rtg. obrazy Al, Si a Fe v adhezní oblasti svaru vzorku č. 325 (svar č. 804 - soubor měření č. 2) a na obr. P-101 je kombinovaný rtg. obraz stejného místa. Semikvantitativní mikroanalýzou byl v rovině styku plechů v blízkosti svarové čocky určen obsah Al 10 % a Si 1,3 %. Na konci adhezní oblasti v místě, kde začíná oblast svařených povlaků, se zvýšil obsah Al na 42 % a Si na 1,6 %.

Při semikvantitativní mikroanalýze vrstvy, která zůstává v rovině styku plechů u vzorku č. 850 svařeného záměrně tak, aby se zachytil okamžik počátku tvorby svarové čocky, byl ve střední části spoje naměřen obsah Al 17,5 % a Si 2,5 %. Na obr. P-103 je snímek mikrostruktury s vyznačením místa, kde se analýza prováděla (červený křížek). Ze snímku je vidět, že se ocelový plech ještě nenatavil a překrystalizace byla pouze částečná. To dovoluje odhad maximální teploty ohřevu v této části spoje. Směrem k místu rozevření plechů obsah Al a Si vzrůstal a na konci adhezní oblasti byl obsah Al 28 % a Si 9 %. (Makrostruktura spoje vzorku č. 850 - svar č. 19 ze souboru měření č. 9 je na obr. P-155.1).

Na obr. P-104 je obraz odražených elektronů ze střední části spoje u vzorku č. 851 svařeného opět se záměrem zachytit začátek tvorby svarové čocky. Na obr. P-105 jsou ze stejného místa rtg. obrazy Al, Si a Fe. Ze snímku je zřejmé, že ve vrstvě v rovině styku plechů nejsou žádné výrazné koncentrační gradienty. Semikvantitativní analýzou byl v těchto místech naměřen obsah Al 5,5 % a Si 1 %. (Makrostruktura

spoje vzorku č. 851 - svar č. 20 ze souboru měření č. 9 je na obr. P-155.1).

Semikvantitativní mikroanalýzou vrstev ve střední části svaru vzorku č. 291 (svar č. 302 - soubor měření č. 2) byl zjištěn obsah Al 1,4 % a Si 0,9 % (snímek struktury svaru je na obr. P-97). Výsledky semikvantitativní mikroanalýzy vrstev vyskytujících se v dalších nedostatečně vytvořených svarech, např. u vzorku č. 348 (snímek struktury svaru je na obr. P-98) byly obdobné.

K posouzení charakteru a rozsahu poškození povlaku v důsledku svařovacího procesu, byla na ED analyzátoru LINK 10 000 u vybraných vzorků provedena analýza povrchových vrstev v místě dosedu elektrod. Na obr. P-106 je obraz odražených elektronů z místa vtisku po elektrodě u vzorku č. 269 (svar č. 14 - soubor měření č. 2) svařeného téměř novými elektrodami. Na obr. P-107 jsou rtg. obrazy Al, Si a Fe a na obr. P-108 je kombinovaný rtg. obraz ze stejného místa. Vtisk je výrazný, hluboký a na jeho okraji je vytvořen val z vytlačného kovu z roztaveného povlaku. Z rozložení jednotlivých prvků vyplývá, že největší poškození povlaku je v obvodových částech vtisku. Semikvantitativní analýzou provedenou z plochy 0,5 x 0,5 mm na povrchu plechu byl v obvodových částech vtisku naměřen obsah Al 14,5 %, Si 1,6 % a Fe 83,9 % a ve střední části vtisku obsah Al 42 %, Si 4,9 % a Fe 53,1 %.

Na obr. P-109 je obraz odražených elektronů z místa vtisku po elektrodě u vzorku č. 349 (svar č. 1204 ze souboru měření č. 2). Na obr. P-110 jsou rtg. obrazy Al, Si a Fe a na obr. P-111 kombinovaný rtg. obraz těchto prvků ze stejného místa. K největšímu poškození povlaku došlo ve střední části vtisku a v těchto místech byl semikvantitativní analýzou z plochy 0,5 x 0,5 mm zjištěn obsah Al 55,6 %, Si 6,7 % a Fe 37,7 %. Celkové poškození povlaku je sice menší než u vzorku č. 269, ale svar již nelze pokládat za kvalitní, neboť má pouze malou svarovou čočku.

Na obr. P-112 je obraz odražených elektronů z místa dosedu elektrody u vzorku č. 534 (svar č. 57 ze souboru měření č. 6; $t_s = 0,16$ s). Na obr. P-113 jsou rtg. obrazy Al, Si a Fe

a na obr. P-114 je kombinovaný rtg. obraz těchto prvků ze stejného místa. Charakter poškození je obdobný jako u vzorku č. 269, tj. největší poškození povlaku je v obvodových částech vtisku. Semikvantitativní analýzou z plochy $0,5 \times 0,5$ mm zde byl naměřen obsah Al 16,3 %, Si 2,1 % a Fe 81,6 % a ve střední části obsah Al 42,8 %, Si 5,7 % a Fe 51,5 %.

Na obr. P-115 je obraz odražených elektronů z místa dosedu elektrody u vzorku č. 605 (svar 619 ze souboru měření č. 6, $t_s = 0,28$ s). Na obr. P-116 jsou rtg. obrazy Al, Si a Fe a na obr. P-117 kombinovaný rtg. obraz těchto prvků ze stejného místa. Poškození povlaku je v celé ploše vtisku rovnoměrnější, ale největší je opět v obvodových částech. Semikvantitativní analýzou z plochy $0,5 \times 0,5$ mm byl v obvodové části zjištěn obsah Al 20,9 %, Si 2,7 % a Fe 76,4 % a ve střední části vtisku obsah Al 38,7 %, Si 4,3 % a Fe 57 %.

Při metalografickém hodnocení vybraných svarových spojů byla pozornost věnována také hodnocení struktury v teplem ovlivněné části základního materiálu. Při měření mikrotvrdosti v jednotlivých oblastech teplem ovlivněných pásem svarů ze souboru měření č. 2 bylo největší zvýšení tvrdosti zjištěno v blízkosti hranice ztavení a to až na HV $0,05 = 320$. Hodnota mikrotvrdosti neovlivněného základního materiálu odpovídá HV $0,05 = 130$ (aritmetický průměr z 10 měření).

Vysoké hodnoty mikrotvrdosti byly naměřeny především v adhezních oblastech svarů. U vzorku č. 345 (svar č. 1106 - soubor měření č. 2) byla naměřena na rozhraní svarové čocky a adhezní oblasti v rovině styku plechů tvrdost HV $0,05 = 510$ a u vzorku č. 325 (svar č. 804 - soubor měření č. 2) v místě svařených povlaků ke konci adhezní oblasti maximální hodnota až HV $0,05 = 940$. Tyto údaje svědčí o tom, že v adhezní oblasti svaru se mohou vytvářet tenké tvrdé a křehké vrstvy tvořené slitinami Al-Fe-Si.

Na základě metalografického hodnocení vybraných svarových spojů a analýz provedených na ED analyzátoru LINK 10 000 lze učinit následující dílčí závěry:

- a) Vrstvy vyskytující se v adhezních oblastech svarů a ve

svarových čočkách nedostatečně vyvinutých svarů nelze optickou metalografií přesně specifikovat,

b) V adhezni oblasti svarů se mohou vyskytovat feritické vrstvy se zvýšeným obsahem Al a Si nebo vrstvy na bázi slitin Al-Fe-Si s nepříznivými plastickými vlastnostmi. Jednoznačné posouzení charakteru těchto vrstev lze provést na ED analyzátoru.

c) V nedostatečně vyvinutých svarech zůstávají neroztýlené vrstvy obohacené o Al a Si z roztaveného povlaku. Semikvantitativní mikroanalýzy na ED analyzátoru potvrdily, že jde o feritické vrstvy.

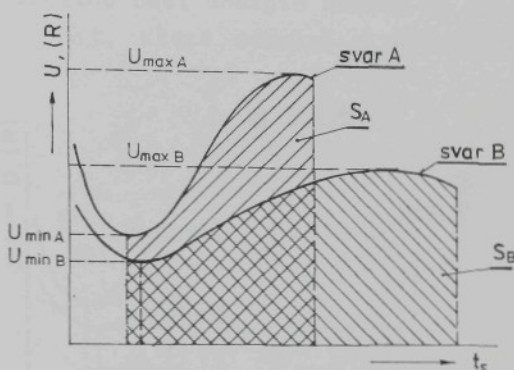
d) V průběhu svařovacího procesu se v místech dosedu elektrod výrazně poškodí povlak plechu a tím se sníží jeho ochranná funkce. Tloušťka vrstev obohacených o Al a Si v místech dosedu elektrod nepřesahuje několik mikrometrů. U souborů měření č. 1-3 při svařování málo opotřebovanými elektrodami je největší poškození povlaku v obvodových částech vtisku. Při svařování značně opotřebovanými elektrodami ke konci jejich životnosti vzniká největší poškození povlaku ve střední části vtisku. U souborů měření č. 4-6 zůstává největší poškození povlaku v obvodových částech vtisku a s postupně rostoucím počtem svařených spojů se rozdíl v poškození povlaku v obvodové a střední části vtisků zmenšují.

8.2. Návrh kontrolních veličin svařovacího procesu a metodický postup pro jejich stanovení

Na základě dílčích závěrů z vyhodnocení souborů měření č. 1-6 se při návrhu kontrolních veličin svařovacího procesu vycházelo ze skutečnosti, že u kvalitních svarových spojů s dostatečně velkou svarovou čočkou mají časové průběhy napětí mezi elektrodami a dynamického elektrického odporu charakteristický tvar jako na obr. 16 a), b). Po období vytlačování roztaveného kovu z povlaku, které prakticky končí dosažením minima na křivce průběhu napětí a odporu, následuje období ná-

růstu napětí a odporu spojené s tvorbou a růstem svarové čočky. Po dosažení maxima na křivce napětí a odporu tyto hodnoty klesají, a to především u svarových spojů zhotovených po kompenzaci opotřebení elektrod prodloužením svařovacího času.

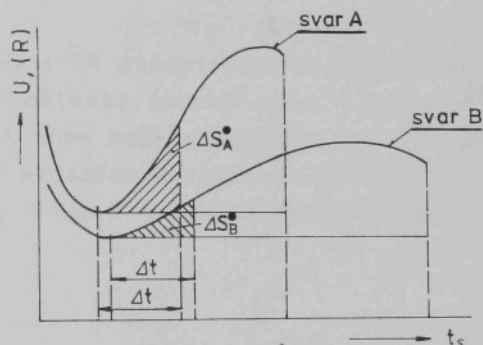
Na obr. 17 jsou schematicky znázorněny časové průběhy napětí mezi elektrodami pro dva svarové spoje zhotovené za různých stavů opotřebení elektrod, které se kompenzuje prodloužením svařovacího času. Předpokládáme, že kompenzace



Obr. 17. Časový průběh napětí mezi elektrodami pro dva kvalitní svary

opotřebení elektrod prodloužením svařovacího času pro svar B ve srovnání se svarem A je provedena tak, aby v obou případech vznikly svary se stejným rozměrem d_{sv} . Hodnoty U_{minA} , U_{minB} a také hodnoty U_{maxA} a U_{maxB} jsou vždy různé a nelze je použít jako kontrolní veličiny. Jako kontrolní veličinu nelze použít ani rozdíly hodnot $U_{max} - U_{min}$. Ze studia literárních podkladů v části práce 5.2 je zřejmé, že za možné kontrolní veličiny nelze pokládat ani časové integrály napětí mezi elektrodami a dynamického elektrického odporu v období po dosažení minima na příslušné křivce (vyšrafované plochy S_A , S_B), neboť odpovídají v určitém měřítku celkovému množství energie dodané do oblasti tvorby svaru v tomto období.

Nárůst napětí mezi elektrodami a dynamického elektrického odporu po skončení období vytlačování roztaveného kovu z povlaku je spojen s výraznou nerovnovážností svařovacího procesu podmíněnou změnou fyzikálních vlastností základního ocelového plechu v souvislosti se změnou teploty. Časové integrály pod křivkou napětí a odporu provedené pro jednotlivé svary A a B pro stejný časový úsek Δt , budou různé a jejich rozdílnost bude vyjadřovat rozdílnost podmínek vzniku svarů. Tyto integrály označené na obr. 18 $\Delta S_A^\bullet$, $\Delta S_B^\bullet$ představují pouze určitou část energie dodané do oblasti tvorby svaru za čas Δt , která souvisí s dynamikou tvorby svaru.

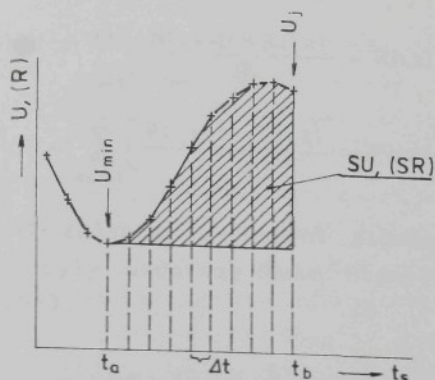


Obr. 18. Charakteristika rozdílných podmínek vzniku dvou svarů

Na základě této úvahy bylo rozhodnuto zjistit, zda za kontrolní veličiny nelze použít časové integrály napětí mezi elektrodami a dynamického elektrického odporu označené na obr. 19 S_U a S_R . Tyto integrály jsou vyjádřené vztahy (49) a (50)

$$S_U = \int_{t_a}^{t_b} (U - U_{min}) dt \quad (49)$$

$$S_R = \int_{t_a}^{t_b} (R - R_{min}) dt \quad (50)$$



Obr. 19. Návrh kontrolních veličin svařovacího procesu

Hodnoty SU a SR představují v určitém měřítku část energie dodané do oblasti tvorby svaru v časovém období t_a až t_b . Vzhledem k tomu bylo rozhodnuto do hodnocení zahrnout také veličinu SP vyjádřenou vztahem (51), kde hodnoty P jsou okamžité maximální výkony v jednotlivých půlperiodách svařovacího procesu.

$$SP = \int_{t_a}^{t_b} (P - P_{min}) dt \quad (51)$$

Pro praktický výpočet navrhovaných kontrolních veličin svařovacího procesu $SU(i)$, $SR(i)$, $SP(i)$, kde i představuje číslo vzorku ve zkušební sérii, se vychází z diskrétních hodnot veličin $U(i,k)$, $R(i,k)$ a $P(i,k)$, stanovených v souladu s metodickým postupem uvedeným v části práce 7.6. Označíme-li půlperiodu, kdy tyto veličiny dosahují minima číslem z , lze výpočet hodnot $SU(i)$, $SR(i)$ a $SP(i)$ provádět podle vztahů (52), (53) a (54).

$$SU(i) = \Delta t \sum_{k=z+1}^j \left[\frac{U(i,k-1) + U(i,k)}{2} - U(i,z) \right] \quad (52)$$

$$SR(i) = \Delta t \sum_{k=z+1}^j \left[\frac{R(i, k-1) + R(i, k)}{2} - R(i, z) \right] \quad (53)$$

$$SP(i) = \Delta t \sum_{k=z+1}^j \left[\frac{P(i, k-1) + P(i, k)}{2} - P(i, z) \right] \quad (54)$$

Pro posouzení způsobu vzorkování signálu napětí systémem vrchol-vrchol, byly určovány také hodnoty kritéria $SU_v(i)$ podle vztahu (55).

$$SU_v(i) = \Delta t \sum_{k=z+1}^j \left[\frac{U_v(i, k-1) + U_v(i, k)}{2} - U_v(i, z) \right] \quad (55)$$

Ve vztazích (52) až (55) značí j celkový počet půlperiod a Δt čas jedné půlperiody, tj. 0,01 s. Výpočet hodnot $SU(i)$, $SR(i)$, $SP(i)$ a $SU_v(i)$ se prováděl na samočinném počítači SAPI-1.

Uvedeným způsobem byly určeny veličiny $SU(i)$, $SR(i)$, $SP(i)$ a $SU_v(i)$ pro svary zkušebních vzorků ze souborů měření č. 1-6. Z vypočítaných hodnot se pro jednotlivé série zkušebních vzorků v souladu s [98] určí podle vztahů (41), (42), (43) charakteristiky náhodných výběrů.

Na obr. P-118 až P-123 jsou způsobem shodným s obr. 13 zpracovány sloupcové grafy závislostí $SU-n$, kde n značí počet zhotovených svarů, pro jednotlivé soubory měření č. 1-6. Závislosti $SR-n$, $SP-n$ a SU_v-n mají analogický průběh se závislostí $SU-n$, a proto nejsou v práci uvedeny.

Program pro výpočet hodnot $SU(i)$ byl sestaven tak, že za minimální hodnotu napětí ve vztahu (52) se pokládá hodnota napětí v prvním minimu, které se vyskytne v čase delším než 2 půlperiody. Odpovídající poloha minima pro různé průběhy napětí jsou v obr. 16 vyznačeny číslem půlperiody z . Lokální minimum, které se vyskytovalo u některých svarů ve druhé půlperiodě - obr. 16 b), c), nelze na základě experimentálního ověření pokládat za konec vytlačování roztaveného kovu povlaku. U nedostatečně vyvinutých svarů ze souborů měření č. 1-3 se s ohledem na časový průběh napětí a metodický postup stanovení polohy minima na křivce napětí mohou při výpočtu veličiny

SU(i) vyskytovat záporné hodnoty - pro průběhy napětí podle obr. 16 d), e). Vzhledem k tomu, že se vždy jedná o svary s nedostatečně vyvinutou svarovou čoučkou, tj. svary nekvalitní, nejsou výsledky získané pro série zkušebních vzorků s výskytem záporných hodnot SU(i) zahrnuty do statistického vyhodnocení. Program pro výpočet veličin SR(i), SP(i) a $SU_v(i)$ byl sestaven analogicky s programem pro určení veličiny SU(i).

V souladu s návrhem metodického postupu vyhodnocení kontrolních veličin svařovacího procesu byly hodnoty získané při vyhodnocení zkušebních svarů ze souborů měření č. 1-6 sestaveny do korelačních diagramů. Na obr. P-124 jsou v korelačním diagramu zakresleny získané dvojice hodnot $SU-d_{sv}$ ze souborů měření č. 1-3 a na obr. P-125 ze souborů měření č. 4-6. Na obr. P-126 jsou zakresleny výsledky z obou skupin experimentů, tj. ze souborů měření č. 1-6. Pro tento soubor dat byl ze vztahu (37) vypočítán korelační poměr $\eta = 0,89$, což svědčí o těsné korelační závislosti veličin SU a d_{sv} .

Na obr. P-127 až P-129 jsou korelační diagramy sestavené z dvojic hodnot $SR-d_{sv}$, $SP-d_{sv}$ a SU_v-d_{sv} ze souborů měření č. 1-6. Pro soubor dat $SR-d_{sv}$ byl vypočítán korelační poměr $\eta = 0,89$, pro soubor dat $SP-d_{sv}$ korelační poměr $\eta = 0,90$ a pro soubor dat SU_v-d_{sv} korelační poměr $\eta = 0,89$. Korelační poměry vypočítané pro jednotlivé soubory dat se prakticky neliší a svědčí o existenci těsné korelační závislosti mezi hodnocenými kontrolními veličinami svařovacího procesu a kritériem kvality svaru d_{sv} . Vhodnost všech zkoumaných kontrolních veličin bude ověřena dalšími experimenty.

Při zpracování korelačních diagramů bylo ověřeno, že korelační poměr snižují výsledky získané u svarových spojů s výstřikem tekutého kovu.

8.3. Vyhodnocení souborů měření č. 7-9

V souladu s programem experimentálních prací byly realizovány tři soubory měření s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času, u kterých kritériem pro ukončení svařovacího procesu bylo dosažení určité hodnoty kontrolní veličiny. Experimenty byly provedeny podle metodického postupu v části práce 7.5 a jejich vyhodnocení podle metodického postupu uvedeného v části práce 7.6. Při určování vhodného svařovacího času u jednotlivých sérií zkušebních vzorků se vycházelo ze stanovení veličiny SU u tří předběžně svařených vzorků.

Na obr. P-130 až P-135 jsou sloupcové grafy zpracované z údajů naměřených hodnot rozměrů svarů d_{sv} a maximální únosnosti svarů F_{max} v jednotlivých sériích zkušebních vzorků ze souborů měření č. 7-9. Ve sloupci jsou vždy uvedeny svařovací časy, jinak je forma zpracování analogická s obr. 13. V grafech $d_{sv} - n$ je čárkovanou čarou vyznačena vhodná velikost svaru 4,5 mm vypočítaná ze vztahu (48). V případě, že v některé sérii zkušebních vzorků byla naměřena hodnota $d_{sv} < 4,5$ mm, svařila se ještě jedna série zkušebních vzorků s delším svařovacím časem. Zkušební série s výskytem hodnot $d_{sv} < 4,5$ mm jsou v grafech $d_{sv} - n$ i $F_{max} - n$ odlišeny poloviční šířkou základny sloupce. Úzké sloupce jsou nakreslené i v případech, kdy opotřebení elektrod bylo kompenzováno zbytečně velkým prodloužením svařovacího času. Z grafů $d_{sv} - n$ je vidět, že se u souborů měření č. 7-9 podařilo udržet rozměr svarů v mezích od 4,65 do 6,05 mm, bereme-li do úvahy série zkušebních vzorků s přiměřenou kompenzací opotřebení elektrod (sloupce se širokou základnou).

Výběrové variační koeficienty charakterizující rozptýlení hodnot d_{sv} a F_{max} se v průběhu jednotlivých souborů měření příliš nemění. Výběrové variační koeficienty pro hodnoty d_{sv} z jednotlivých sérií zkušebních vzorků jsou u všech tří souborů měření ve většině případů menší než pro hodnoty F_{max} .

Na obr. P-136 až P-138 je vyhodnocení úbytků délky elektrod a vyhodnocení změn rozměrů otisků pracovních ploch elektrod pro sledované soubory měření. V době ukončení experimentů činil úbytek elektrod 0,83 až 1,04 mm a zvětšení rozměrů otisku pracovní plochy elektrod bylo v mezích 1,4 až 2,3 mm.

Na obr. P-139 až P-154 jsou postupně uvedeny časové průběhy sledovaných veličin svařovacího procesu u jednotlivých sérií zkušebních vzorků ze souboru měření č. 9. Grafy jsou kreslené způsobem vyznačeným na obr. 12. U souborů měření č. 7 a 8 byly výsledky obdobné. Z obr. P-139 až P-154 je zřejmé, že u všech sérií zkušebních vzorků má průběh napětí mezi elektrodami i dynamického elektrického odporu charakter podle schématického obr. 16 a,b. S rostoucím počtem provedených svařů pouze klesá rychlost nárůstu napětí mezi elektrodami, elektrického odporu i tepelné expanze svaru po období vytlačování roztaveného kovu povlaku. Podle dílčích závěrů v části práce 8.1 by se mělo jednat o svary s dostatečně velkou svarovou čoučkou a bez vnitřních metalurgických vad. Metalografický rozbor vybraných svarových spojů tento předpoklad potvrdil. Na obr. P-155.1 až P-155.3 jsou snímky makrostruktur hodnocených svarů. Na obr. P-155.1 jsou rovněž snímky makrostruktur "spojů" u vzorků č. 849, 850 a 851, které byly svařeny s cílem zachytit počátek tvorby svarové čoučky. Vzorek č. 849 svařený časem $t_s = 0,04$ s se při přípravě metalografického výbrusu rozpadl. Znamky natavení ocelového plechu jsou zřejmé až u vzorku č. 851 svařeného svařovacím časem $t_s = 0,08$ s.

Na obr. P-156 až P-158 jsou způsobem shodným s obr. 13 zpracovány sloupcové grafy závislostí $SU-n$ (n - značí počet zhotovených svarů) pro jednotlivé soubory měření č. 7-9. Ve sloupcích jsou uvedeny svařovací časy a sloupce s nepříměrou nebo nedostatečnou kompenzací opotřeбенí elektrod jsou kresleny s poloviční základnou obdobně jako sloupcové grafy $d_{sv}-n$ a $F_{max}-n$ na obr. P-130 až P-135. Sloupcové grafy závislostí $SR-n$, $SP-n$ a SU_v-n mají pro jednotlivé soubory měření obdobný charakter jako závislosti $SU-n$ a v práci nejsou uvedeny.

8.4. Statistické vyhodnocení závislostí kontrolních veličin svařovacího procesu a jakosti svarů

U statisticky závislých veličin ξ a η je účelné popsat tuto závislost pro předpovědi nebo odhady veličiny η na základě pozorované hodnoty veličiny ξ a naopak. Pokud je určen stupeň této závislosti lze stanovit i přesnost předpovědi a odhadů. Má tedy význam zkoumat, jak závisí podmíněná střední hodnota $E(\eta|x)$ na hodnotách x náhodné veličiny ξ (která má úlohu nezávisle proměnné) a jak závisí podmíněná střední hodnota $E(\xi|y)$ na hodnotách y náhodné veličiny η (která je v tomto případě nezávisle proměnná). K označení analytického vyjádření statistické závislosti náhodných veličin s určením jejího stupně se používá termínu "korelační závislost".

S ohledem na zkoumanou problematiku vztahu kvality svaru a řídicí veličiny svařovacího procesu se zaměříme především na řešení závislosti podmíněné střední hodnoty $E(\eta|x)$ na hodnotách kontrolní veličiny x náhodné veličiny ξ a stanovení tolerančních mezí, které s určitou pravděpodobností zahrnou předem stanovený podíl základního souboru.

V souladu s metodikou vyhodnocení kontrolních veličin svařovacího procesu podle části práce 7.4, byly sestaveny hodnoty jednotlivých zkoumaných kontrolních veličin do korelačních diagramů na obr. P-159 až P-162 (příloha str. 136 až 139). V korelačních diagramech jsou zahrnuty výsledky vyhodnocení zkušebních svarů ze souborů měření č. 1-9 včetně svarů, u kterých došlo k výstřiku tekutého kovu.

Zkoumané dvourozměrné základní soubory jsou množinami dvojic hodnot dvou náhodných veličin z množiny všech realizovatelných experimentů $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3$ jejichž charakter je popsán v části práce 7.4. Ve všech případech jsou základní soubory nekonečné. Experimentálně získané soubory dat budeme s ohledem na jejich rozsah pokládat z technického hlediska za náhodný výběr, i když se vzhledem k metodice

získání těchto souborů dat z matematického hlediska dopouštíme určité nedůslednosti. Pro statistické vyhodnocení experimentálně zjištěných souborů dat bude důležité, zda příslušné náhodné veličiny budou mít dvourozměrné normální rozdělení.

K posouzení, zda náhodné veličiny ξ a η mají dvourozměrné normální rozdělení, použijeme χ^2 test dobré shody. Zkoumané soubory dat rozdělíme do tříd stanovených pro každou z obou náhodných veličin tak, jako se popisuje v části práce 7.4. Pro hodnoty náhodné veličiny ξ budeme mít m_1 tříd a pro hodnoty η m_2 tříd. Políčko tabulky bude reprezentované třídními znaky z_{1i} a z_{2j} dvou náhodných veličin ξ a η .

Šířku třídy pro veličinu ξ označme k a šířku třídy pro veličinu η označme h . Jednotlivým třídám odpovídají teoretické četnosti $n \cdot p_{ij}$ odvozené za předpokladu platnosti hypotézy, že náhodný výběr pochází z daného rozdělení pravděpodobnosti. Hodnota p_{ij} (pro $i = 1, 2, 3, \dots, m_1$ a $j = 1, 2, 3, \dots, m_2$) je pravděpodobnost, že hodnota náhodné veličiny ξ padne do i -té třídy a současně hodnota veličiny η do j -té třídy. Hodnotu p_{ij} lze vypočítat z hodnot distribuční funkce podle vztahu (56). Distribuční funkce je závislá na paramet-

$$p_{ij} = \left[F\left(z_{1i} + \frac{k}{2}, z_{2j} + \frac{h}{2}\right) - F\left(z_{1i} + \frac{k}{2}, z_{2j} - \frac{h}{2}\right) \right] - \left[F\left(z_{1i} - \frac{k}{2}, z_{2j} + \frac{h}{2}\right) - F\left(z_{1i} - \frac{k}{2}, z_{2j} - \frac{h}{2}\right) \right] \quad (56)$$

rech základního souboru. Vzhledem k tomu, že tyto parametry nejsou známé, musí se při výpočtech používat jejich bodové odhady z testovaných náhodných výběrů.

Hodnotu pravděpodobnosti p_{ij} můžeme také přibližně vyjádřit vztahem (57), ve kterém $f(z_{1i}, z_{2j})$ představuje sdruženou hustotu pravděpodobnosti a k, h jsou rozměry tříd pro veličiny ξ a η .

$$p_{ij} = k h f(z_{1i}, z_{2j}) \quad (57)$$

Nechť $\mathbf{z}$ a $\boldsymbol{\mu}$ jsou dva sloupcové vektory takové, že $\mathbf{z}' = \|z_{1i}, z_{2j}\|$ a $\boldsymbol{\mu}' = \|\bar{x}, \bar{y}\|$. Hodnoty $\bar{x}$, $\bar{y}$ jsou výběrové průměry z hodnot x_i a y_i (pro $i = 1, 2, 3 \dots n$) pojatých do náhodného výběru rozsahu n a určí se podle vztahů (58) a (59).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (58)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (59)$$

V našem případě budou hodnoty x_i představovat zkoumané kontrolní veličiny svařovacího procesu $SU(i)$, $SR(i)$, $SP(i)$ a $SU_v(i)$ a hodnoty y_i představují kritérium kvality svaru $d_{sv}(i)$. Sdruženou hustotu pravděpodobnosti pro dvourozměrné normální rozdělení potom můžeme vyjádřit podle [101] ve tvaru (60).

$$f(z_{1i}, z_{2j}) = K \cdot e^{-\frac{(\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu})' \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu})}{2}} \quad (60)$$

Hodnotu K lze vyjádřit vztahem (61), kde $|\mathbf{S}|$ představuje determinant výběrové kovarianční matice (62).

$$K = \frac{1}{2\pi (|\mathbf{S}|)^{-\frac{1}{2}}} \quad (61)$$

$$\mathbf{S} = \begin{vmatrix} s_x^2 & s_{xy} \\ s_{yx} & s_y^2 \end{vmatrix} \quad (62)$$

Hodnoty s_x^2 a s_y^2 jsou výběrové rozptyly, které charakterizují rozptýlení v souboru hodnot x_i a y_i a lze je určit podle vztahů (63) a (64). Hodnota s_{xy} je výběrová kovariance (tvoří bodový odhad kovariance základního souboru) a určí se ze vztahu (65).

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (63)$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (64)$$

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}) \quad (65)$$

Označíme-li exponent v exponenciální funkci ve vztahu (60) t_{ij} a provedeme naznačené matematické operace, lze exponent t_{ij} vyjádřit pomocí vztahů (66.1) až (66.5).

$$t_{ij} = -a (b + c - d) \quad (66.1)$$

$$a = \frac{1}{2(1 - r_{xy}^2)} \quad (66.2)$$

$$b = \frac{(z_{1i} - \bar{x})^2}{s_x^2} \quad (66.3)$$

$$c = \frac{(z_{2j} - \bar{y})^2}{s_y^2} \quad (66.4)$$

$$d = 2 r_{xy} \frac{(z_{1i} - \bar{x})(z_{2j} - \bar{y})}{s_x s_y} \quad (66.5)$$

Hodnota r_{xy} je relativní charakteristikou lineární korelační závislosti dvou proměnných v dvourozměrném náhodném výběru a nazývá se výběrový koeficient korelace (výběrový korelační koeficient) a určuje se ze vztahu (67).

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (67)$$

Konečný vztah pro výpočet hodnoty K je dán rovnicí (68).

$$K = \frac{1}{2\pi s_x s_y \sqrt{1 - r_{xy}^2}} \quad (68)$$

Hypotéza H_0 : "náhodný výběr je ze základního souboru s daným rozdělením pravděpodobnosti, tj. s dvourozměrným normálním rozdělením" se zamítá na hladině významnosti α ve prospěch alternativní hypotézy H_1 : "náhodný výběr není ze základního souboru s dvojrozměrným normálním rozdělením" pokud testové charakteristika χ^2 bude větší než α - kritická hodnota rozdělení χ^2 s $(m-k-1)$ stupni volnosti. Hodnota m představuje celkový počet tříd, k počet parametrů distribuční funkce odhadovaných z náhodného výběru. Matematicky lze testovou charakteristiku χ^2 vyjádřit vztahem (69), kde n_{ij} je skutečná četnost prvků ve třídě. Testová charakteristika se

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} \frac{(n_{ij} - np_{ij})^2}{np_{ij}} \quad (69)$$

porovná s α kritickou hodnotou rozdělení χ^2 podle vztahu (70). Platí-li uvedená nerovnost, potom se hypotéza H_0 zamítá na hladině významnosti α ve prospěch hypotézy H_1 .

$$\chi^2 > \chi_{\alpha}^2 (m-k-1) \quad (70)$$

Z náhodného výběru odhadujeme hodnoty $\bar{x}$, $\bar{y}$, s_x^2 , s_y^2 a r_{xy} tzn., že $k = 5$. Test dobré shody byl proveden pro všechny experimentálně zjištěné soubory dat, tj. SU-d_{sv}, SR-d_{sv}, SP-d_{sv} a SU_v-d_{sv}.

Jako příklad provedení χ^2 testu budou uvedeny výsledky hodnocení souboru dat SU-d_{sv}. Podle popsaného postupu byly naměřené hodnoty roztrženy do korelační tabulky - tabulka P-3. V tabulce jsou uvedeny teoretické četnosti $n \cdot p_{ij}$ a skutečné četnosti n_{ij} prvků v jednotlivých třídách. Po spojení krajních tříd tak, aby teoretická četnost byla ve

všech polích větší než 5 (podmínka použitelnosti χ^2 testu) byla určena hodnota testového kritéria χ^2 . Na základě výsledku porovnání testové charakteristiky χ^2 s kritickou hodnotou $\chi^2_{\alpha(m-k-1)}$ se hypotéza o dvourozměrném normálním rozdělení veličin SU, d_{sv} zamítá. Obdobné výsledky χ^2 testu byly zjištěny také u souborů dat $SR-d_{sv}$, $SP-d_{sv}$ a SU_v-d_{sv} . Jednoznačné odmítnutí hypotézy o dvourozměrném normálním rozdělení sledovaných náhodných veličin by znemožnilo stanovení tolerančních mezí, které zahrnují určitý podíl hodnot základního souboru.

Při porovnání teoretických četností n_{ij} a skutečných četností prvků n_{ij} v jednotlivých polích korelační tabulky souboru dat $SU-d_{sv}$ (obdobně i pro ostatní soubory dat), je zřejmé, že nevyhovující výsledek χ^2 testu je způsoben výskytem zvýšeného počtu prvků ve třídách označených v korelační tabulce plným kolečkem a nízkého výskytu prvků ve třídách označených kroužkem. Lze předpokládat, že tato skutečnost je zapříčiněna především způsobem získání hodnocených souborů dat.

Z vícerozměrné normality vyplývá i normalita všech margiálních rozdělení, tj. jednorozměrná normalita individuálně pro všechny proměnné. Obrácená implikace sice obecně neplatí, ale v reálných úlohách se každá významnější odchylka od vícerozměrné normality projeví také na margiálních rozděleních. Proto se v praxi při testování normality rozdělení lze omezit např. i na testování margiálních rozdělení [102].

Na základě této úvahy bylo provedeno vyhodnocení, zda pro jednotlivé řádky a sloupce korelační tabulky lze napozorované hodnoty četností prvků veličin ξ a η pokládat za výběry s normálním rozdělením. Hodnocení bylo provedeno opět s využitím χ^2 testu dobré shody pro 1-6 řádek a pro 4-9 sloupec. V řádcích 7,8 a sloupcích 1-3 nebylo hodnocení provedeno pro nedostatek vyskytujících se prvků. Hodnoty nutné pro provedení χ^2 testu jsou pro jednotlivé řádky korelační tabulky dat $SU-d_{sv}$ sestaveny v tabulkách P-4 až P-8 a pro jednotlivé sloupce do tabulek P-9 až P-14. Přepočítané meze označené

v tabulkách u_x a u_y jsou určeny ze vztahů (71) a (72). Význam

$$u_x = \frac{x_m - \bar{x}_i}{s_{xj}} \quad (71)$$

$$u_y = \frac{y_m - \bar{y}_i}{s_{yi}} \quad (72)$$

jednotlivých symbolů v uvedených vztazích je následující:

- x_m, y_m - hodnoty původních mezí v korelační tabulce pro veličiny ξ a η
- $\bar{x}_i$ - výběrový průměr pro hodnoty kontrolní veličiny x v jednotlivých řádcích
- $\bar{y}_i$ - výběrový průměr pro hodnoty kritéria kvality svaru y v jednotlivých sloupcích
- s_{xj} - výběrová směrodatná odchylka pro hodnoty kontrolní veličiny x v jednotlivých sloupcích,
- s_{yi} - výběrová směrodatná odchylka pro hodnoty kritéria kvality svaru y v jednotlivých řádcích.

Hodnoty $\bar{x}_i, \bar{y}_i, s_{xj}, s_{yi}$ jsou stanoveny s předpokladem, že všechny prvky v jednotlivých třídách mají velikost třídního znaku (v tabulkách označen x_t, y_t).

Teoretická četnost prvku n_t v jednotlivých třídách se určí ze vztahu (73), kde $\Phi(u_h)$ je hodnota distribuční funkce

$$n_t = n [\Phi(u_h) - \Phi(u_d)] \quad (73)$$

normovaného normálního rozdělení pro horní mez v příslušné třídě, $\Phi(u_d)$ hodnota distribuční funkce normovaného normálního rozdělení pro spodní mez v téže třídě a n počet prvků v řádku či sloupci.

Na základě provedených testů lze konstatovat, že hypotéza o normálním rozdělení se zamítá pouze u hodnot ve třetím řádku. Pro hodnoty v řádcích 1, 2, 5 a 6 a ve sloupcích 4-9 se hypotéza o normálním rozdělení přijímá. Obdobné vý-

sledky byly získány také pro soubory dat $SR-d_{sv}$, $SP-d_{sv}$ a SU_v-d_{sv} . Vzhledem k této skutečnosti je další vyhodnocení souboru dat provedeno za předpokladu, že příslušné náhodné veličiny mají dvourozměrné normální rozdělení, i když při χ^2 testu dobré shody byla původně hypotéza o dvourozměrném normálním rozdělení zamítnuta.

Jestliže dvě náhodné veličiny ξ a η mají dvourozměrné normální rozdělení a jsou statisticky závislé, potom jejich závislost je korelační a lineární [97]. Vhodným typem regresní funkce je proto přímka.

Regresní funkce vyjadřuje závislost podmíněné střední hodnoty náhodné veličiny η při daných hodnotách x náhodné veličiny ξ na těchto hodnotách x . Pro náš případ bude platit vztah (74), ve kterém β_0 a β_1 představují koeficienty regrese. Bodové odhady b_0 , b_1 koeficientů regrese β_0 , β_1 získáme metodou nejmenších čtverců, při které se hledá minimum výrazu (75).

$$E(\eta|x) = \mu(x; \beta_0, \beta_1) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (74)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - \mu(x_i; \beta_0, \beta_1)]^2 \quad (75)$$

Výběrové koeficienty regrese b_0 a b_1 se naleznou řešením soustavy rovnic (76) a jsou vyjádřeny vztahy (77) a (78).

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_j} = 0 \quad \text{pro } j = 0, 1 \quad (76)$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (77)$$

$$b_0 = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n y_i - b_1 \sum_{i=1}^n x_i \right] \quad (78)$$

Přímka $y = b_0 + b_1 x$ je nejlepším odhadem skutečné regresní přímky a nazývá se přímka odhadu (značí se obvykle $\hat{Y}$). Pokud

budeme zkoumat také sdruženou regresní závislost, tj. závislost $E(\xi|y)$, má přímka odhadu X tvar (79)

$$x = b'_0 + b'_1 y \quad (79)$$

Výběrové regresní koeficienty b'_0 a b'_1 se určí ze vztahů (80) a (81).

$$b'_0 = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i - b'_1 \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (80)$$

$$b'_1 = \frac{r^2}{b_1} \quad (81)$$

Ve vztahu (81) značí r výběrový koeficient korelace formálně vyjádřený již vztahem (67) a pro praktický výpočet vztahem (82).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (82)$$

Čím více se výběrový koeficient korelace v absolutní hodnotě blíží 1, tím je lineární korelační závislost mezi veličinami ξ a η těsnější.

Při výpočtu výběrových rozptylů výběrových koeficientů regrese b_0 a b_1 se nejprve musí určit podle vztahu (83) reziduální rozptyl S_R^2 . Kladná odmocnina reziduálního rozptylu

$$S_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2}{n - 2} \quad (83)$$

se nazývá reziduální směrodatná odchylka a označuje se S_R . Reziduální směrodatná odchylka charakterizuje rozptýlení hodnot náhodné veličiny η kolem regresní přímky. Výběrové rozptyly s_{b0}^2 a s_{b1}^2 výběrových koeficientů regrese jsou potom vyjádřeny vztahy (84) a (85). Kladné druhé odmocniny

$$s_{b_0}^2 = s_R^2 \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (84)$$

$$s_{b_1}^2 = s_R^2 \frac{n}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (85)$$

výběrových rozptylů výběrových koeficientů regrese jsou výběrové směrodatné odchylky těchto koeficientů a značí se s_{b_0} a s_{b_1} .

Pro koeficienty regrese β_0 a β_1 budou stanoveny podle vztahů (86) a (87) konfidenční intervaly s konfidenčním koeficientem $1 - \alpha$.

$$b_0 - t_{\alpha}(n-2) s_{b_0} < \beta_0 < b_0 + t_{\alpha}(n-2) s_{b_0} \quad (86)$$

$$b_1 - t_{\alpha}(n-2) s_{b_1} < \beta_1 < b_1 + t_{\alpha}(n-2) s_{b_1} \quad (87)$$

Hodnota $t_{\alpha}(n-2)$ je α - kritická hodnota rozdělení t s $v = n-2$ stupni volnosti.

Konfidenční interval pro hodnotu $E(\eta|x)$ pro dané x s konfidenčním koeficientem $1 - \alpha$ je určen vztahem (88).

$$b_0 + b_1 x - t_{\alpha}(n-2) s_y(x) < E(\eta|x) < b_0 + b_1 x + t_{\alpha}(n-2) s_y(x) \quad (88)$$

Výběrová směrodatná odchylka $s_y(x)$ odhadu pořadnice $y=b_0 + b_1 x$ skutečné regresní přímky v bodě x je určena vztahem (89).

$$s_y(x) = s_R \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{n(x - \bar{x})^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}} \quad (89)$$

Pro posouzení jaké lze očekávat rozptýlení hodnot velikostí svaru při udržování řídicí veličiny na konstantní hodnotě je nutno z náhodných výběrů jednotlivých souborů dat

stanovit meze pokrývající podíl P základního souboru se zvolenou vysokou pravděpodobností γ .

Mají-li náhodné veličiny ξ a η dvourozměrné normální rozdělení, jsou jejich podmíněná rozdělení také normální. Vzhledem k tomu, že parametry rozdělení základního souboru neznáme, musíme použít jejich bodové odhady z náhodného výběru. Bodový odhad rozptylu podmíněného rozdělení (podmíněný rozptyl) se určí ze vztahu (90).

$$s^2(\eta|x) = s_y^2 (1-r^2) \quad (90)$$

Je zřejmé, že podmíněný rozptyl je nezávislý na hodnotách x . Oboustranné toleranční meze lze napsat ve tvaru (91), kde k je hodnota tabelovaná v závislosti na n , P a γ [98].

$$E(\eta|x) \pm k s(\eta|x) \quad (91)$$

Pro stanovení tolerančních mezí se může použít i reziduální směrodatná odchylka s_R , která také charakterizuje rozptýlení náhodné veličiny η kolem regresní přímky.

V souladu s uvedeným postupem byly graficky vyhodnoceny experimentálně získané soubory dat $SU-d_{sv}$, $SR-d_{sv}$, $SP-d_{sv}$ a SU_v-d_{sv} . Pro jednotlivé soubory dat jsou v grafech na obr. P-159 až P-162 uvedeny rovnice přímky odhadu Y , konfidenční interval pro hodnoty skutečné regresní přímky s konfidenčním koeficientem 0,95 vypočítaný pro jednotlivé naměřené hodnoty d_{sv} a toleranční meze, které s pravděpodobností $\gamma = 0,95$ zahrnou $P = 0,90$ podíl základního souboru. V grafech je vyznačena také minimální teoretická šířka tolerance kvality svaru $\Delta d_{sv, \min}$ při konstantně nastavené hodnotě řídicí veličiny x s respektováním tolerančních mezí stanovených s $\gamma = 0,95$ a $P = 0,90$. Hodnoty $\Delta d_{sv, \min}$ se pro jednotlivé zkoumané řídicí veličiny pohybují v rozmezí 1,32 až 1,40 mm.

Na základě statistického vyhodnocení jednotlivých souborů dat lze konstatovat, že korelační závislosti $SU-d_{sv}$, $SR-d_{sv}$, $SP-d_{sv}$ a SU_v-d_{sv} jsou prakticky stejně těsné. Obsažnost informace, kterou jednotlivé veličiny o svařovacím procesu po-

skytují, je na stejné úrovni a rozdíly v šířce tolerančních pásem jsou ze statistického hlediska nevýznamné. Stupeň citlivosti S_{ci} stanovený pro veličiny SU, SR, SP a SU_v podle vztahu (33) se pohybuje od 0,62 do 0,65.

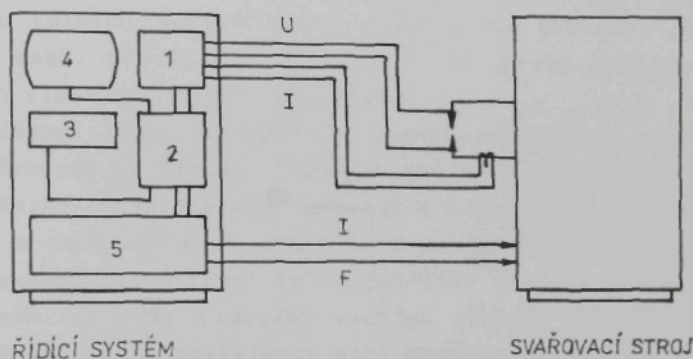
Vliv změny tloušťky plechu na hodnoty kontrolních veličin SU, SR, SP a SU_v mohl být ověřen pouze na plechu s tloušťkou 0,9 mm, neboť jiný plech se stejným typem povlaku nebyl k dispozici. Výsledky experimentů potvrdily, že při svařování plechů s větší tloušťkou se snižuje podmíněná střední hodnota $E(\eta|x)$, tzn., že pro stejný rozměr svaru bude hodnota SU (obdobně i dalších kontrolních veličin) u plechu s větší tloušťkou vyšší. Vzhledem k malé změně v tloušťce plechů (z 0,8 na 0,9 mm) nebyly rozdíly ve výsledcích výrazné a výsledky vyhodnocení souboru měření u plechů s tloušťkou 0,9 mm nejsou v práci uvedené.

Při dalších doplňujících experimentech se posuzoval vliv zvětšení svařovací síly z 2250 N na 3000 N na charakter průběhu snímaných veličin svařovacího procesu i vliv na hodnoty kontrolních veličin. Podle výsledků dosud provedených experimentů lze konstatovat, že u kvalitních svarových spojů odpovídá průběh napětí obr. 16 b). Charakter časového průběhu tepelné expanze svaru zůstává zachován, snižují se však absolutní hodnoty tepelné expanze svaru ve fázi následující po vytlačování roztaveného kovu povlaku. Výsledky vyhodnocení kontrolních veličin naznačují, že zvýšení svařovací síly zmenší šířku tolerančního pásma kvality svaru.

8.5. Ideový návrh řídicího systému a návrh vývojového diagramu řízení svařovacího procesu

Výsledky předchozí části práce prokázaly, že všechny vyhodnocované kontrolní veličiny svařovacího procesu lze využít pro jeho řízení. Výhodné se jeví především využití veličin SU a SU_v , neboť jejich stanovení vyžaduje sledování pouze jedné veličiny svařovacího procesu, tj. napětí mezi elektrodami.

Na obr. 20 je blokové schéma spojení řídicího systému a svařovacího stroje. Vlastní řídicí systém musí mít všechny hlavní části tak, jak jsou uvedeny na obr. P-22. Na obr. 20 je schematicky označeno snímání napětí mezi elektrodami i svařovacího proudu (pro eventuální aplikaci a vyhodnocování veličin SR nebo SP).



Obr. 20. Blokové schéma spojení řídicího systému a svařovacího stroje

- 1 - měřicí blok, 2 - vyhodnocovací blok,
- 3 - zadávací blok, 4 - signalizace,
- 5 - výkonová jednotka

V souladu s obr. P-22 tvoří řídicí systém zadávací blok, měřicí blok, vyhodnocovací blok, zařízení pro signalizaci a výkonové jednotky.

Měřicí blok navazuje na snímače jednotlivých veličin svařovacího procesu a slouží pro úpravy signálů tak, jak to vyžaduje vyhodnocovací blok. V našem případě bude úkolem měřicího bloku vzorkování signálu napětí (eventuálně i proudu). Za předpokladu použití mikropočítačového systému budou důležitou součástí měřicího bloku analogovo-číslicové převodníky.

Vyhodnocovací blok na bázi mikropočítačové jednotky poskytuje podle algoritmu řízení signály na korekci nebo ukončení svařovacího procesu. Číslicové zpracování snímaných dat

je dostatečně rychlé i odolné proti rušivým vlivům prostředí svařovny. Řídící činnost musí být realizována v čase do $1/4$ periody síťového kmitočtu.

Výstupní signály z vyhodnocovacího bloku se prostřednictvím výkonových členů převádějí na vhodnou formu pro zabezpečení řídicího zásahu.

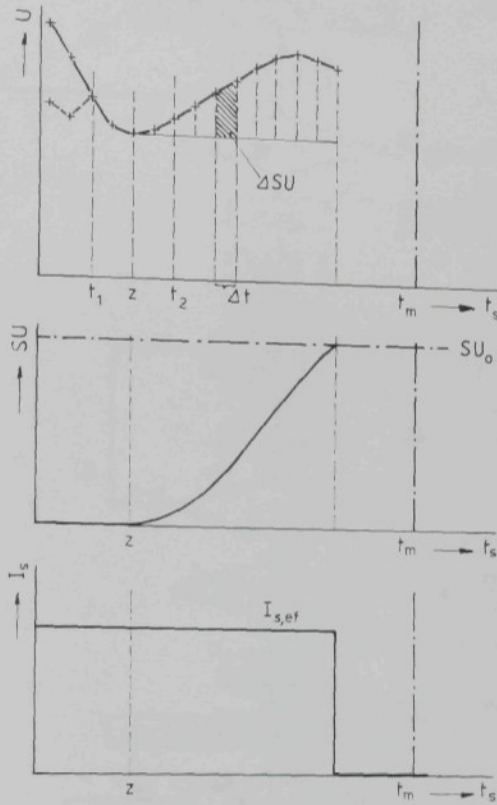
Signalizační blok může mít řadu funkcí. Signalizovat se mohou informace o kvalitě svaru, ukončení životnosti elektrod, dosažení různých dorazů během svařovacího procesu, poruchy systému apod. Slouží při nastavování a údržbě stroje i při opravách vlastního řídicího systému.

Zadávací blok zabezpečuje zadání programů a vstupních dat potřebných na činnost řídicího systému. U zařízení s mikropočítačem se údaje obvykle zadávají z klávesnice. Signalizační blok a zadávací blok může být u mikropočítačového systému řešen jako společná odpojitelná jednotka [7].

Návrh činnosti řídicího systému vychází ze statisticky zjištěné korelační závislosti mezi rozměrem svaru a kontrolní veličinou SU. Kompenzace opotřebení elektrod se bude provádět prodlužováním svařovacího času. Řídící systém musí zajistit následující funkce:

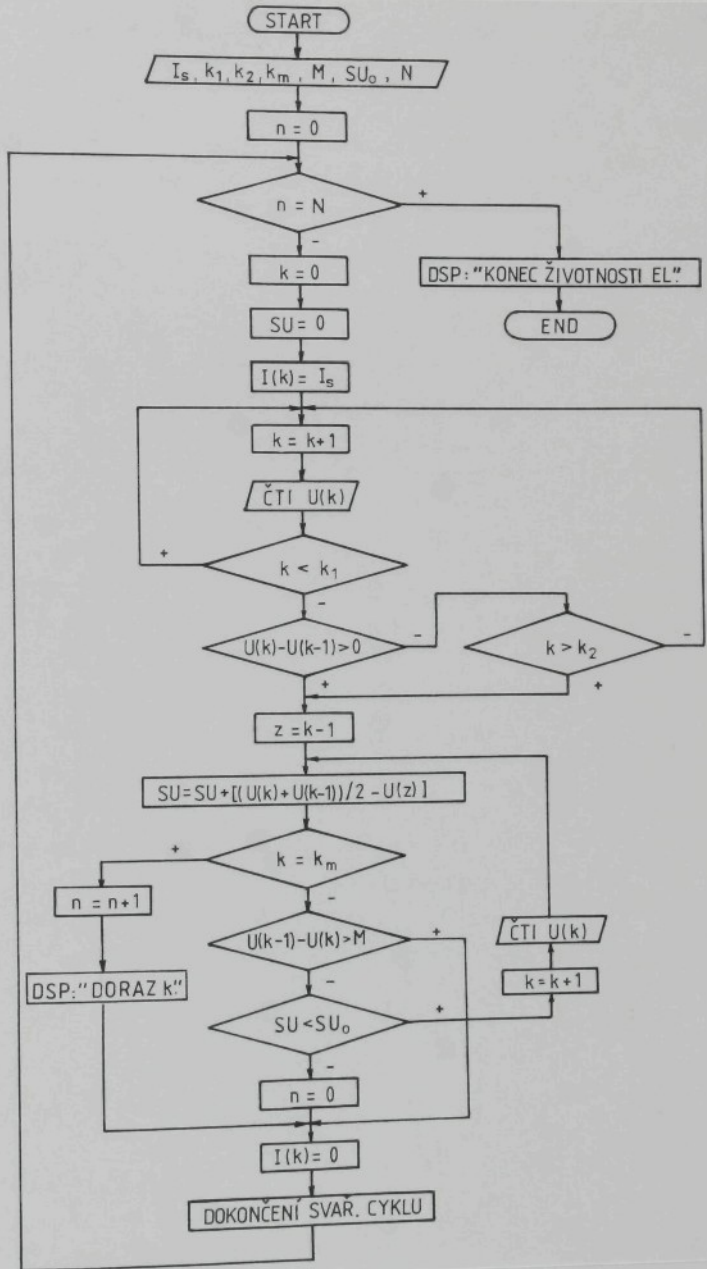
- a) Ukončení svařovacího procesu, resp. ukončení fáze průchodu svařovacího proudu při:
 - dosažení nastaveného maximálního svařovacího času t_m ,
 - výstřiku tekutého kovu,
 - dosažení nastavené hodnoty kontrolní veličiny SU_0 (optimální experimentálně ověřená hodnota),
- b) Blokování dalšího svařovacího cyklu pokud se opakovaně dosáhne časového dorazu na konci životnosti elektrod.

Schéma návrhu funkce řídicího systému je na obr. 21 a na obr. 22 je návrh vývojového diagramu řízení svařovacího procesu. U kvalitních svarových spojů má časový průběh napětí mezi elektrodami charakter podle obr. 16 a), b). Kontrolní veličina SU se vyhodnocuje od okamžiku dosažení minima na křivce napětí.



Obr. 21. Návrh funkce řídicího systému

Vyhledávání polohy minima na křivce napětí začíná v čase delším než je nastavitelná hodnota t_1 . Ve vývojovém diagramu přísluší tomuto času číslo půlperiody k_1 . Vhodným nastavením času t_1 se blokuje vyhledávání minima v počáteční fázi svařovacího procesu u svarů s průběhem napětí podle obr. 16 b) (na obr. 21 je tento průběh vyznačen čárkovaně). Od okamžiku dosažení minima (číslo půlperiody z) začíná vyhodnocování kontrolní veličiny SU . Pokud se na křivce napětí nevyskytne minimum do času t_2 (číslo půlperiody k_2), vyhodnocuje se kontrolní veličina SU od tohoto nastavitelného času ($z = k_2$).



Obr. 22. Vývojový diagram řízení svařovacího procesu

Při výpočtu veličiny SU není ve vývojovém diagramu zahrnuto násobení časovou konstantou Δt jako ve výpočtovém vztahu (52), neboť násobení konstantou by pouze upravilo použité měřítko a prodlužovalo čas výpočtu. V každé půlperiodě následuje po výpočtu hodnoty SU kontrola, zda nebyl dosažen maximální nastavený svařovací čas t_m (číslo půlperiody k_m) a zda nedošlo k výstřiku tekutého kovu. Existence výstřiku se vyhodnocuje ze stanovených rozdílů napětí v po sobě následujících půlperiodách. Pokud je rozdíl napětí větší než předem nastavená hodnota M, svařovací proces se ukončí stejně jako v případě dosažení svařovacího času t_m . V rámci provedených experimentů činil pokles napětí při výstřiku přibližně 0,1 V.

Pokud nedošlo k výstřiku ani k dosažení maximálního svařovacího času t_m , porovná se vypočítaná hodnota SU s nastavenou optimální hodnotou SU_0 . Jestliže $SU < SU_0$, potom se svařovací čas prodlužuje o další půlperiodu. Za optimální hodnotu SU_0 se bude pokládat hodnota SU, pro kterou velikost svaru na spodní hranici tolerančního pásma odpovídá optimální velikosti stanovené ze vztahu (48). Tato hodnota je vyznačena na obr. P-159.

Rostoucí opotřebení elektrod povede k postupnému prodlužování svařovacího času až na hodnotu nastaveného maximálního času t_m . Opakované dosažení časového dorazu t_m (počet dorazů N) signalizuje ukončení životnosti elektrod a blokuje možnost dalšího svařování. Ojedinělé dosažení časového dorazu se vynuluje prvním svarem svařeným časem kratším než t_m .

Navrhovaný řídicí systém patří mezi systémy klasické koncepce vyhodnocující kvalitu svarů podle kvantitativních ukazatelů stanovených ze sledovaných veličin svařovacího procesu. To znamená, že optimální hodnota kritéria SU bude platit pouze pro určité vstupní parametry svařovacího procesu např. pro určitou tloušťku či kombinaci tlouštěk plechů, pro určitou velikost svařovací síly apod. (obdobně to bude platit i pro optimální hodnoty veličin SR, SP a SU_v). Při realizaci experimentů popisovaných v předložené práci nebyly k dispozici technické prostředky pro stabilizaci alespoň některých vstupních podmínek - např. síťového napětí a svařovací síly. Ve statis-

tickém vyhodnocení jednotlivých souborů dat jsou tak v podstatě zahrnuty i obvyklé náhodné výkyvy těchto parametrů, které nepochybně zvětšují podmíněný rozptyl $s^2(\eta|x)$ a tím i šířku tolerančního pásma kvality svarů. Metodický postup experimentů vycházel z technických možností svařovacího pracoviště, a proto se u žádných experimentů nekompenzovala změna intenzity svařovacího procesu. Vezmeme-li v úvahu, že dosedací plocha elektrod se v průběhu experimentů zvětšila až o 2,5 mm, přičemž efektivní svařovací proud byl v mezích 9,4 až 10,2 kA, potom se intenzita svařovacího procesu (definovaná podílem I_s/D) pohybovala v mezích 1,3 až 2 kA.mm⁻¹.

Na základě studia literárních podkladů lze předpokládat, že kompenzace změny intenzity svařovacího procesu řízeným svahovým nárůstem svařovacího proudu v období po dosažení minima na křivce napětí mezi elektrodami, bude mít příznivý vliv na zmenšení šířky rozptylového pásma kvality svaru.

V práci popsané a vyhodnocené kontrolní veličiny svařovacího procesu SU , SR , SP a SU_v nebyly využity pro návrh principu funkce monitorovacího systému, neboť předpověď rozměru svaru není vzhledem k šířce tolerančního pásma jeho kvality dostatečně přesná. Podle výsledků souborů měření bez kompenzace opotřebení elektrod lze navíc pokládat monitorovací systém pro svařování žárově pohlíníkových plechů za nevhodný (krátká životnost elektrod).

9. ZÁVĚR

Disertační práce vznikla postupně při řešení fakultních úkolů F 2421-040 "Spojování tenkých plechů" F 2421-053 "Aplikace mikroelektroniky při optimalizaci zpracování tenkých plechů" a dokončena byla v rámci státního úkolu III-1-6/2-3 "Mezní stavy při zpracování povrchově upravených tenkých ocelových plechů".

Během spolupráce s AZNP Mladá Boleslav při řešení úkolů RVT zaměřených na posouzení zpracovatelnosti ocelových plechů s kovovými povlaky byly ověřeny vhodné technologické parametry pro bodové odporové svařování žárově pohliníkováných plechů a zjišťovala se životnost elektrod s různou geometrií pracovní části. Postupně se vyjasnily otázky, jejichž řešení je rozhodující pro aplikaci ocelových plechů s povlaky v hromadné výrobě vybraných svařovaných dílů v podmínkách automobilového průmyslu. Vzhledem ke stále odkládanému zahájení výroby ocelových plechů s novými typy povlaků v Československu se dočasně snížil i zájem zpracovatelského průmyslu o tyto materiály. Přispěly k tomu nepochybně i dílčí informace o specifických problémech souvisejících s jejich zpracováním např. z hlediska tvářitelnosti, svařitelnosti a lakovatelnosti. Ke konci 80-tých let však nakonec světový trend výroby a spotřeby ocelových plechů s povlaky vedl ke změnám v inovačních programech výrobce plechů (VSŽ Košice) i v přístupech spotřebitelů. Zájem o nové informace a podklady pro dílčí zpracovatelské technologie se tím výrazně zvýšil. To nakonec urychlilo i dokončení disertační práce zaměřené na bodové odporové svařování žárově pohliníkováných ocelových plechů.

Hlavní cíle disertační práce byly stanoveny v souladu s prací [103] na základě studia literárních podkladů a výsledků experimentálních prací zaměřených na hodnocení životnosti elektrod [4, 5, 15, 104]. Práce se snaží o komplexní pohled na problematiku bodového odporového svařování ocelových plechů s povlaky. Základní otázky, které je při aplikaci techno-

logie bodového odporového svařování těchto plechů nutno řešit, lze shrnout do dvou bodů:

- 1) Stanovení kritérií kvality svarových spojů a vypracování metodik pro jejich určování. S tím neoddělitelně souvisí i definování pojmu životnost elektrod a vypracování metodického postupu pro stanovení životnosti elektrod.
- 2) Technologické a technické zajištění výroby kvalitních svarů za splnění reálně stanovených požadavků na životnost elektrod.

Předpokladem pro účelné a objektivní řešení těchto otázek je znalost vlivu specifických metalurgických podmínek vzniku bodového svaru na jeho výslednou kvalitu i vlivu metalurgických procesů v oblasti pracovní části elektrod na jejich životnost.

Reálné podmínky vzniku bodového odporového svaru jsou u ocelových plechů s povlaky velmi složité a prakticky znemožňují matematické řešení teplotního a elektrického pole při svařování bez podstatných zjednodušujících předpokladů. Vzhledem k těmto skutečnostem i s ohledem na stochastický charakter svařovacího procesu je vhodné zaměřit se na rozbor souvislostí mezi experimentálně zjištěnými časovými průběhy charakteristických fyzikálních veličin svařovacího procesu a výslednou jakostí svaru. Na základě kvalitativního i kvantitativního vyhodnocení časových průběhů fyzikálních veličin se hledají vhodné kontrolní veličiny svařovacího procesu umožňující s dostatečnou přesností předpovědět kvalitu svaru. Tento přístup k řešení základních otázek souvisejících se svařováním ocelových plechů s kovovými povlaky podmínil vybavení svařovacího pracoviště na katedře tváření a plastů přístroji pro snímání a registraci základních fyzikálních veličin svařovacího procesu tak, jak popisuje část práce 7.2.

Pro realizaci cílů disertační práce byl proveden návrh metodických postupů:

- pro hodnocení kvality svarových spojů,
- pro měření a vyhodnocení časových průběhů fyzikálních veličin svařovacího procesu,

- experimentů pro studium vlivu rostoucího opotřebení elektrod na časové průběhy registrovaných fyzikálních veličin,
- experimentů s kompenzací opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času,
- pro vyhodnocení experimentálních prací,
- pro stanovení a vyhodnocení kontrolních veličin svařovacího postupu.

Specifikace dílčích metodických postupů je provedena v části práce 7. Lze konstatovat, že využitím uvedených metodických postupů byly hlavní síle disertační práce splněny. Vyhodnocení realizovaných experimentů a hlavní výsledky obsahuje část práce 8.

Přínosy disertační práce se mohou posuzovat z různých hledisek. Směrodatné budou především přínosy z hlediska vědního oboru, teorie odporového bodového svařování ocelových plechů s povlaky a přínosy pro praxi.

Pro vědní obor 23-07-09 "Strojírenská technologie" je hlavním přínosem návrh jednoduchého principu řízení svařovacího procesu při bodovém odporovém svařování žárově pohliníkového ocelového plechu na základě vyhodnocování časového průběhu napětí mezi elektrodami. Návrh systému řízení byl proveden na základě statistického zpracování výsledků experimentálně zjištěných souborů dat $SU-d_{sv}$, $SR-d_{sv}$, $SP-d_{sv}$ a SU_v-d_{sv} a porovnání tolerančních pásem kvality svaru pro jednotlivé kontrolní veličiny. Systém kompenzuje opotřebení elektrod prodlužováním svařovacího času a šířka tolerančního pásma kvality svarů pro konstantní úroveň kontrolní veličiny SU činí 1,4 mm (za podmínek uvedených v části 8.4).

Přínosy práce pro teorii odporového bodového svařování se mohou shrnout do následujících bodů:

- a) Bylo prokázáno, že kvalitní svarové spoje s dostatečně velkou svarovou čočkou mají charakteristické časové průběhy napětí mezi elektrodami a dynamického elektrického odporu (podle obr. 16 a, b). Výrazné změny v časovém průběhu napětí a odporu v podmínkách rostou-

cího opotřeбенí elektrod svědčí o nepřípustném zhoršení kvality svarů.

- b) Statistickým vyhodnocením experimentálně zjištěných souborů dat $SU-d_{sv}$, $SR-d_{sv}$, $SP-d_{sv}$ a SU_v-d_{sv} a metodou regresní analýzy byly stanoveny kvantitativní vztahy mezi kontrolními veličinami SU , SR , SP , SU_v a rozměrem svaru d_{sv} . Mezi kontrolními veličinami a rozměrem svaru existuje lineární korelační závislost a vypočítané rovnice přímek odhadů jsou pro jednotlivé veličiny u obr. P-159 až P-162. Vztahy jsou platné pouze pro podmínky realizovaných experimentů a mohou se zobecnit rovnicí (92). V této rovnici jsou

$$d_{sv} = a + b S_e \quad (92)$$

a, b konstanty a S_e reprezentuje část energie, dodané do svaru v období po skončeném vytlačování roztaveného kovu z povlaku, charakterizující rozdílnost v dynamických podmínkách tvorby svarové čočky u jednotlivých svarů.

- c) Korelační závislosti kontrolních veličin SU , SR , SP , SU_v a rozměru svaru d_{sv} jsou stejně těsné. Všechny vyhodnocené kontrolní veličiny poskytují o průběhu svařovacího procesu prakticky stejně obsaženou informaci.

Disertační práce obsahuje i některé informace, podklady a metodické postupy, které mohou být přínosem pro praxi:

- a) V práci jsou uvedeny údaje o životnosti elektrod z klasického elektrodového materiálu $Cu-Cr$ při svařování žárově pohliníkových plechů.
- b) Metodické postupy aplikované v práci při hodnocení kvality svarů žárově pohliníkového plechu jsou použitelné a vhodné i pro bodové svary ocelových plechů s jinými typy povlaků.

- c) Kvalitativní a kvantitativní údaje o charakteru a rozsahu poškození povlaku v místě dosedu elektrod svědčí o výrazném snížení ochranné funkce povlaku.
- d) Informace získané vyhodnocením kontrolních veličin svařovacího procesu mohou být přínosem pro realizaci řídicích systémů pracujících na bázi elektrických veličin. V tomto směru je důležité především zjištění, že veličiny SU , SU_v stanovené pouze na základě vyhodnocení časového průběhu napětí mezi elektrodami, poskytují o svařovacím procesu stejně obsažnou informaci jako veličiny SR , SP stanovené z časových průběhů napětí i svařovacího proudu.

Pro praktickou aplikaci výsledků disertační práce a pro další výzkum procesů probíhajících při bodovém odporovém svařování ocelových plechů s kovovými povlaky považuje autor práce za rozhodující a prospěšné:

- ověřit realizovatelnost navrhovaného principu řízení svařovacího procesu na systémech řízení dostupných v Československu,
- ověřit vliv hlavních svařovacích parametrů a vstupních technologických parametrů na hodnoty kontrolních veličin SU , SR , SP , SU_v ,
- zjistit, zda existují podobnostní kritéria odvoditelná na základě vyhodnocení časového průběhu napětí mezi elektrodami ve fázi po skončeném vytlačování roztaveného kovu povlaku, obdobně jako kritérium odvozené z průběhu odporu KUBÁNEM [57],
- ověřit, zda systém řízení svařovacího procesu VÚZ-AUTO-SET R může úspěšně pracovat pouze na základě vyhodnocení časového průběhu napětí mezi elektrodami,
- analyzovat procesy probíhající při svařování v oblasti pracovní části elektrod, které způsobují jejich rychlé opotřebování,
- provést komplexní zhodnocení mechanické zkoušky na odtržení plechů a její srovnání s normalizovanou zkouškou tahem podle ČSN 05 1122,

- vypracovat metodiku hodnocení mechanických vlastností adhezni oblasti svaru.

Vyřešení uvedených otázek by přispělo k prohloubení teoretických i praktických poznatků využitelných pro optimální návrhy technologických parametrů při bodovém odporovém svařování ocelových plechů s různými typy povlaků. Zároveň se mohou získat i nové podklady k návrhům a realizaci nových principů řízení svařovacího procesu.

Závěrem děkuji všem, kteří mi radou a pomocí umožnili dokončit a odevzdat práci. Z pracovníků katedry tváření a plastů děkuji doc. Ing. V. Mikešovi, CSc., za pomoc při návrhu metodiky hodnocení jakosti svarů, Ing. J. Jungwirthovi a Ing. M. Horňákovi za pomoc při počítačovém zpracování výsledků experimentů a paní B. Havlákové za pomoc při grafické úpravě a kreslení obrázků. Prof. Ing. J. Tmějovi, CSc., děkuji za organizační zajištění a vedení vědecké přípravy a paní L. Želinové za strojový přepis práce.

Zvláště chci poděkovat Ing. J. Formanovi a Ing. Dr. P. Chráskovi, DrSc., z ÚFP ČSAV v Praze za pomoc při ED analýze vybraných svarových spojů.

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- | 1 | Kolektiv: Aplikace žárově pozinkovaných plechů při výrobě silničních vozidel. Svářečský zpravodaj, 1984, č. 2, 52 s.
- | 2 | 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 výzkumu v praxi. Konferencie k 20. výročí VSÚ VO VSŽ Košice, Košice 1988, s. 103-113.
- | 3 | HAUSER, J.: Zkušenosti s použitím ocelového plechu s povlakem FeZn na karosérie autobusů. In.: Sborník V. vedeckotechnická konferencia pri príležitosti 30. výročí VSŽ. Košice 1989, s. 177-183.
- | 4 | TMĚJ, J.-NEUMANN, H.: Bodové odporové svařování žárově pohliníkováných ocelových plechů fal fy Thyssen. /Výzkumná zpráva - F 2421-040/. Liberec, VŠST 1982. 95 s.
- | 5 | TMĚJ, J.-NEUMANN, H.-ŠOLCOVÁ, A.: Spojování tenkých plechů. /Výzkumná zpráva - F 2421-040 díl 1./. Liberec, VŠST 1983. 76 s.
- | 6 | NEUMANN, H.-TMĚJ, J.: Jakost odporových bodových svařových spojů žárově pohliníkováných ocelových plechů. /Výzkumná zpráva - F 2421-053/. Liberec, VŠST 1985. 45 s.
- | 7 | JANOTA, M.: Procesy a riadenie odporového zvarovania. Bratislava, VÚZ 1985. 317 s.
- | 8 | HEHL, D.-MAILE, K. -ROOS,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.

- | 9 | SCHRÖDER, R. - MACHERAUCH, E.: Berechnung der Wärme- und Eigenspannungen bei Widerstandspunktschweißverbindungen unter Zugrundelegung unterschiedlicher mechanisch-termischer Werkstoffdaten. Schweißen und Schneiden, 35, 1983, č. 6, s. 270-276.
- | 10 | JANOTA, M.: Kritéria podobnosti pre riadenie bodového zvaracieho procesu. Zváranie, 29, 1980, č. 8, s.234-239.
- | 11 | PLÍVA, L.: Odporové svařování. 1. vydání, Praha, SNTL 1975, 265 s.
- | 12 | ČSN 05 1122. Skúška ťahom bodových a priedvarkových zvarových spojov. 1964.
- | 13 | SAWHIL, J.M.-WATANABE, J.H. - MITCHEL, J.W.: Spot Weldability of Mn-Mo-Cb, V-N, and SAE 1008 Steels. Welding Journal, 1977, č. 7, s. 217-224.
- | 14 | Anonym: The Assesment and Testing of Resistance Spot Welding Electrode Materials: Doc. IIW-586-78.
- | 15 | NEUMANN,H.: Studium životnosti elektrodových špiček při bodovém odporovém svařování žárově pohliníkových ocelových plechů fal fy Thyssen. /Výzkumná zpráva - H.S. č. 62033/350/. Liberec, VŠST 1982, 79 s.
- | 16 | KELLY, J. - KNOWLSON, P.M.:Spot Welding Galvanized Stell. Welding and Metal Fabrication, 1968, č. 12, s. 447-453.
- | 17 | KELLY, J. - KNOWLSON, P.M.: The BWRA Quality Monitor an Spot-Welding Galvanized Steel Sheet-An Evaluation. Welding Research Supplement, 1967, č. 3, s. 114-120.
- | 18 | BURBANK, G.E.: - TAYLOR, W.D.: Ultrasonic in-process inspection of resistance spot welds. Welding Journal 44, 1965, č. 5, s. 193-198
- | 19 | HAIN, R.: Resistivity Testing of Spot. Welds Challenges Ultrasonics. Welding Journal, 1988, č. 5, s. 46-51.

- | 20 | Anonym: Spot Weld Destructive Testing Decreases Dramatically. Welding Journal, 1986, č. 5, s. 62-65.
- | 21 | SVÍTIL, A.: Životnost elektrod při odporovém bodovém svařování pozinkovaných ocelových plechů. Zváranie, XXVI, 1977, č. 1, s. 9-13, č. 2, s. 48-55.
- | 22 | RIVETT, R.M.: In-process spot weld control. Metal Construction, 1980, č. 5, s. 230-234.
- | 23 | SITTE, G.: Elektrodenstandzeit beim Widerstandspunktschweissen. /Technicko-vědecké zprávy/. Halle/Saale, ZIS 1979, č. 95/4, 44 s.
- | 24 | SITTE, G.: Elektrodenstandzeit beim WP-Schweissen. ZIS Mitteilungen, 1975, č. 8, s. 950-958.
- | 25 | MUCHA, M.: Metodika skúšok životnosti elektród pre bodové odporové zváranie. /Disertační práce/. Bratislava 1985. 140 s. VÚZ.
- | 26 | MUCHA, M.: Evaluation and comments on Life Testing Methods of Spot Welding Electrodes. Doc. IIW III-782-84, Bratislava 1979, 5 s.
- | 27 | ŠIMŮNEK, M.: Odporové svařování žárově pohliníkových ocelových plechů fal - Thyssen. Strojírenská výroba, 28, 1980, č. 2, s. V-VIII.
- | 28 | KRAUSE, H.J.: Untersuchungen zur Elektrodenstandzeit beim Widerstandspunktschweissen feueraluminierter Bleche aus Stahl. Schweissen und Schneiden, 29, 1977, č. 1, s. 5-9.
- | 29 | ON 05 2675. Odporové svařovací stroje. Elektrodové špičky vsazované přímé. Rozměry. 1964.
- | 30 | ON 42 3039. Slitina mědi tvářená 42 3039. CuCr 1, 1983.
- | 31 | NADKARNI, A.V.-WEBER, E.P.: A New Dimension in Resistance Welding Electrode Materials. Welding Journal, 1977, č. 11, s. 331-338.
- | 32 | SVÍTIL, A.: Elektrodové materiály pro odporové bodové svařování. Strojírenská výroba, 28, 1980, č. 8, s. I-VI.

- | 33 | SVÍTIL, A.: Příspěvek k odporovému bodovému svařování pozinkovaných plechů. In: Odporové zvárání. Bratislava, Dom techniky ČSVTS 1981, s. 12-25.
- | 34 | DYCHNO, S.L.-PUGAČEV, A.I.: Mechanizm nalipanija legkoplavkikh pokrytij na elektrody pri kontaktnoj točečnoj svarke. Avtomatičeskaja svarka, 1975, č. 10 (271), s. 19-21.
- | 35 | ŠIMŮNEK, M.: Technická zpráva o svařování (odporovém) pohliníkových plechů. /Technická zpráva/. Ledec nad Sázavou, Kovofiniš n.p. 1979, 28 s.
- | 36 | NEUMANN, H.: Vliv opotřeбенí elektrod na průběh svařovacího procesu a jakost svarových spojů u bodového odporového svařování žárově pohliníkováného plechu. /Výzkumná zpráva - H.S. 64049/350/, Liberec, VŠST 1984, 62 s.
- | 37 | RIVETT, R. M.-WESTGATE, S.A.: Resistance Welding of aluminium alloys in mass production. Metal Construction, 1980, č. 10, s. 510-517.
- | 38 | BRŮZDA, J.: The structure, mechanical properties and corrosion resistance of spot - and seam welds made on hot dip aluminized sheet. In: Sborník prednášok. 3. Vysoké Tatry, ČSSR, VÚZ 1983, s. 15-19.
- | 39 | HOULDCROFT, P.T.: Weld monitoring and automation. In: Advances in welding processes. Harotage, 1970.
- | 40 | JANOTA, M.: Niektoré otázky automatizácie v odporovom zvárání. Zváračské správy, 21, 1971, č. 1, s. 6-13.
- | 41 | Anonym: Survey of in-process quality control systems for resistance welding. Doc. IIW III-G-67-79.
- | 42 | COOK, G.E.: Feedback and adaptive control in automated arc welding systems. Metall Construction, 13, 1981, č. 9, s. 551-556.

- | 43 | KMEŤ, A.-JANOTA, M.: Sledovanie tepelnej expanzie bodových odporových zvarov. Zváranie, XXIII, 1974, č. 11, s. 331-325.
- | 44 | PAČENCEV, Ju. A.: Regulirovanije processa točečnoj svarki po veličine peremeščenija elektrodov svaročnoj mašiny. Avtomatičeskaja svarka 4, 1951, č. 5, s. 18-29.
- | 45 | BABKIN, L.T.-GORSKIJ, V.V.: Sistema avtomatičeskogo regulirovania processov kontaktnoj svarki. Avtomatičeskaja svarka 15, 1962, č. 6, s. 39-47.
- | 46 | JOHNSON, K.I.: Resistance welding quality-control techniques. Metal Construction and Britisch Welding Journal, 1973, č. 5, s. 176-181.
- | 47 | RODEN, W.A.: Evaluation of Resistance Welding In-Process Monitors. Welding Journal, 1968, č. 11, s. 515-521.
- | 48 | KRAUSE, H.J.-LEHMKUHL, B.: Arbeitsweise und Anwendungsmöglichkeiten eines neuen Prozessregelgeräts für das Widestandspunktschweissen. Schweissen und Schneiden 34, 1982, č. 5, s. 229-233.
- | 49 | JANOTA, M.-KUBÁN, J.: Systém automatického riadenia bodového odporového zvarovania. VÚZ-AUTOSET. Zváranie, XXVI, 1977, č. 3, s. 89-92.
- | 50 | Kolektiv: Riadenie procesu odporového bodového zvarovania. /Technická zpráva/. Bratislava, VÚZ 1984, 32 s.
- | 51 | JANOTA, M.: Adaptivní riadenie bodového zvarovania na robotizovaných pracoviskách. /Technická zpráva/. Bratislava, VÚZ, 1985, 35 s.
- | 52 | JANOTA, M.-KUBÁN, J.: Skúšky technologických vlastností systému riadenia bodového zvarovania VÚZ-AUTOSET. Zváranie, XXV, 1976, č. 8, s. 248-251.

- | 53 | TARASOV, N.M.-VARUCHA, N.A.: Kontrol' processa kontakt-noj točečnoj svarki metodom ul'trazvukovoj lokacii. Avtomatičeskaja svarka 24, 1971, č. 8, s. 26-29.
- | 54 | TARASOV, N.M.-KARTAŠOV, V.K.: Ul'trazvukovaja kontrol' i avtomatičeskoe regulirovanie processa točečnoj svar-ki. Svaročnoe proizvodstvo, 1966, č. 3, s. 24-26.
- | 55 | SNEE, R.K.-TAYLOR, J.L.: Infra-red monitor of resis-tance spot welding. Metal Construction and British Welding Journal 4, 1972, č. 4, s. 142-148.
- | 56 | POPOV, Ju.A.-SUCHOVERCHOV, A.A.: Kontrol' kačestva točečnych soedinenij po teplovomu izpučeniju ich po-verchnosti. Svaročnoe proizvodstvo. č. 10, 1978, s. 34-37.
- | 57 | KUBÁN, J.: Automatické riadenie odporového bodového zváracieho procesu pre zváracie kliešte. /Disertační práce/. Bratislava 1981, 103 s. VÚZ.
- | 58 | Anonym: Acoustic emission spot weld controllor. Welding Journal 57, 1978, č. 2, s. 77.
- | 59 | PODOLA, N.V. a kol.: Issledovaniye vozmožnosti pri-menenija principov raspoznavaniya dl'ja ocenki kačes-tva soedinenij vypolnennyh konktaktnoj točečnoj svar-koj. Avtomatičeskaja svarka 25, 1972, č. 6, s. 19-22.
- | 60 | MASING, W.E.: Stochastische Betrachtung zur Strom-integration als Mittel der Gütesicherung von Wider-standspressschweissverbindungen. Schweissen und Schneiden 26, 1974, č. 1, s. 3-4.
- | 61 | GANOWSKI, F.J.: Technique for ensuring spot welds in a standart welding range. Welding Metal Fabrication, 1974, č. 11, s. 372-378.
- | 62 | JOHNSON, K.I. a kol.: Automatic spot weld correction. Metal Construction 9, 1977, č. 2, s. 70-71.
- | 63 | Anonym: Resistance welding controls. Metal Construction 10, č. 10, 1978, s. 497.

- | 64 | ANDREWS, D.R.-DUNN, A.-BROMHEAD, I.: Dynamic deviation monitoring for resistance welding a low budget system. Welding Research International 6, 1976, č. 4, s. 1-27.
- | 65 | PETZOLD, J.: Untersuchungen zur Erhöhung der Elektrodenstandzeit beim Punktschweißen verzinkter Feinbleche durch widerstandsabhängige Prozessregelung. / Disertační práce/. Aachen 1970, TH.
- | 66 | SAWAGE, W.F.-NIPPES, E.F.-WASELL, F.A.: Static Contact Resistance of Series Spot Welds. Welding Journal, 1977, č. 11, s. 365-370.
- | 67 | TOWEY, N.-ANDREWS, D.R.: Instantaneous resistance during spot weld formation as a parameter for an automatic control system. Welding Metal Fabrication 36, 1968, č. 10, s. 383-392.
- | 68 | MILCKE, H.: Steuerung der Schweisszeit in Abhängigkeit vom Widerstandsverlauf zwischen den Elektroden. Schweißen und Schneiden 19, 1967, č. 4, s. 152-156.
- | 69 | BHATTACHARYA, S.-ANDREWS, D.R.: Significance of dynamic resistance curves in the theory and practice of spot welding. Welding Metal Fabrication 42, 1974, č. 9, s. 296-301.
- | 70 | SAWAGE, W.F.-NIPPES, E.F.-WASELL, F.A.: Dynamic contact resistance of series spot welds. Welding Journal 57, 1978, č. 2, s. 43-50.
- | 71 | DICKINSON, D.W.-FRANKLIN, J.E.-STANYA, A.: Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring. Welding Journal, 1980, č. 6, s. 170-176.
- | 72 | ANDREWS, D.R.-WALLS, D.M.K.-LO, C.K.: Dynamic resistance monitoring applied to projection welding. Metal Construction, 1980, č. 1, s. 30-33.
- | 73 | DZURÁNYI, E.-JANOTA, M.-KUBÁN, J.: Systém automatického riadenia odporového zvárania VÚZ-AUTOSET R. In: Odporové zváranie. Bratislava, Dom techniky ČSVTS 1981, s. 35-46.

- | 74 | DZURÁNYI, E.-JANOTA, M.-KUBÁŇ, J.: Systémy automatického riadenia odporového bodového zvarovania VÚZ-AUTOSET R. Zváračské správy /Welding news 31, 1981, č. 1, s. 11-22.
- | 75 | KUBÁŇ, J.: Automatické riadenie bodového odporového zvarovania pozinkovaných plechov. Zváračské správy/Welding news, 28, 1978, č. 3, s. 75-80.
- | 76 | KUBÁŇ, J.-ŠTEFÁNEK, A.-DRÁBEK, D.: Systém riadenia odporového bodového zvaracieho procesu VÚZ-M1. Zváračské správy/Welding news 36, 1986, č. 3, s. 66-70.
- | 77 | KRAUSE, M.: Mikroprozessoren in Steuerungen für Widerstandsschweisseinrichtungen. Schweissen und Schneiden 36, 1984, č. 10, s. 467-470.
- | 78 | SLEE, K.V.-MOORE, G.V.: A new aproach to quality assurance in resistance welding. Welding and Metal Fabrication 41, 1973, č. 6, s. 204-209.
- | 79 | EICHHORN, F.-SINGH, S.-EMONTS, M.-LEUSCHEN, B.: Sicherung der Güte von Widerstandspunktschweissverbindungen durch Einsatz einer Regeleinrichtung. Schweissen und Schneiden, 32, 1980, č. 12, s. 491-496.
- | 80 | PATON, B.E.-PODOLA, N.V.-KVAČEV, V.G.-URSATĚV, A.A.: Matematičeskoe modelirovanie svaročnych processov dlja sozdanija sistem prognozirovanija kačestva soedinenij i optimalnogo upravlenija. Avtomatičeskaja svarka 24, 1971, č. 7, s. 1-5.
- | 81 | PODOLA, N.N.-KVAČEV, V.G.-URSATĚV, A.A.: Ocenka vlijanija parametrov režima na rozmary jadra pri točečnoj svarke. Avtomatičeskaja svarka 23, 1970, č. 11, s. 24-26.
- | 82 | PODOLA, N.V.-MEĽNIKOV, P.V.-URSATĚV, A.A., KVAČEV, V.G.-NIKULIN, V.N.: Statističeskaja ocenka vlijanija nekotorych parametrov processa točečnoj svarki legkich splavov na razmary litogo jadra. Avtomatičeskaja svarka 25, č. 4, 1972, s. 31-34.

- | 83 | PODOLA, N.V.-POPOVIČ, A.P.-ORSATĚV, A.A.-DONČENKO, N.A.-MEĽNIKOV, P.V.-FABRIKANTOV, L.I.: Ustrojstvo dlja kontrolja parametrov režima kontaktnoj svarki i kačestva soedinenija. Avtomatičeskaja svarka 28, 1975, č. 9, s. 58-62.
- | 84 | VASIĽEV, A.S.-BELACHOV, D.V.-PETROV, Ju.A.-STREĽNIKOV, V.P.-ČE EN UN-BELOV, A.B.: Sistema aktivnogo kontrolja kačestva točečnoj svarki na baze matematičeskoj modeli svaročnogo processa. Avtomatičeskaja svarka, 1980 č. 5, s. 42-44.
- | 85 | JANOTA, M.: Selection of variables for the control of resistance welding. Doc. IIW III-609-79, Bratislava, 1979, 24 s.
- | 86 | JANOTA, M.-DZURÁNYI, E.: Metodika návrhu kontrolných a riadiacich systémov v odporovom zváraní. Zváranie 28, 1979, č. 11, s. 333-336.
- | 87 | THYSSEN AKTIENGESSELLSCHAFT vorm. August Thyssen Hütte, Duisburg (NSR): Thyssenfeueeraluminiertes Feinblech fal. 1978, 28 s.
- | 88 | ČSN 42 0310. Zkouška tahem. 1980.
- | 89 | Messer Griesheim GMBH, München (NSR): Schweissen aluminierter und aluminiumplattierten Stahlbleche nach dem Folienstumpfnah Verfahren. Sonderdruck 18/71. Sest. Dorn. L. a LINDNER, K. 1971, 13 s.
- | 90 | MALEVSKIJ, Ju.B.-GORDONNAJA, A.A.-RJABOV, V.R.: Vlijanije uslovij otžiga na fazovyje prevraščeniya v tonkich bimetalličeskich plenkach alimunij-železo. Avtomatičeskaja svarka 24, 1971, č. 1, s. 30-34.
- | 91 | MONDOĽFO, L.F.: Struktura i svojstva aljmunievych splavov. Metallurgija. Moskva, 1979, 639 s.
- | 92 | NEUMANN, H.: Studium technologických parametrů bodového odporového svařování pohliníkováných ocelových plechů fal fy Thyssen. /Výzkumná zpráva - H.S. č. 61010/ 350/. Liberec. VŠST 1981, 49 s.

- | 93 | NEUMANN, H.: Studium možnosti aplikace automatického řízení svařovacího procesu při bodovém odporovém svařování pohliníkových ocelových plechů. /Výzkumná zpráva - H.S. č. 63067/350/. Liberec. VŠST 1983, 75 s.
- | 94 | ZEŽ, Praha (ČSSR): Pokyny pro údržbu, užití a obsluhu bodové svářečky WBP 80.2. 1963. 35 s.
- | 95 | FRITZSCHE, W.-HÜTNER, H.: Widerstandschweissen Band 1. Bedingungen zum Einsatz der Widerstandschweissungen. /Technicko-vědecké zprávy/. Halle/Saale, ZIS 1979, č. 95/1, 172 s.
- | 96 | VÚZ Bratislava (ČSSR): Merač zvaracieho prúdu a času. VÚZ MZP-201. Návod na použitie. 1979. 26 s.
- | 97 | ČSN 01 0252. Statistické metody v průmyslové praxi II. Závislosti mezi náhodnými veličinami - korelace a regrese. 1976.
- | 98 | ČSN 01 0250. Statistické metody v průmyslové praxi. Všeobecné základy. 1973.
- | 99 | NEUMANN, H.-FORMAN, J.: Příspěvek k hodnocení kvality bodových odporových svarů žárově pohliníkových ocelových plechů. Zváranie (článek v tisku).
- | 100 | ČSN 05 0005. Chyby zvarových spojov. Základní pojmy. 1970.
- | 101 | HÁTLE, J.-LIKEŠ, J.: Základy počtu pravděpodobnosti a matematické statistiky. SNTL/Alfa. Praha 1974, 463 s.
- | 102 | HEBÁK, P.-HUSTOPECKÝ, J.: Vícerozměrné statistické metody s aplikacemi. SNTL/Alfa. Praha 1987, 452 s.
- | 103 | NEUMANN, H.: Bodové odporové svařování žárově pohliníkových ocelových plechů. /Písemný referát/. Liberec, VŠST 1986. 73 s.
- | 104 | NEUMANN, H.: Příspěvek ke studiu životnosti elektrodových špiček při bodovém odporovém svařování žárově pohliníkových plechů. In: Sborník vědeckých prací pohliníkových plechů. VŠST v Liberci. 1984 (sv. XVII). Liberec. VŠST 1984, s. 263-270.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

nositelka Řádu práce

fakulta strojní

katedra tváření a plastů

Ing. Heinz Neumann

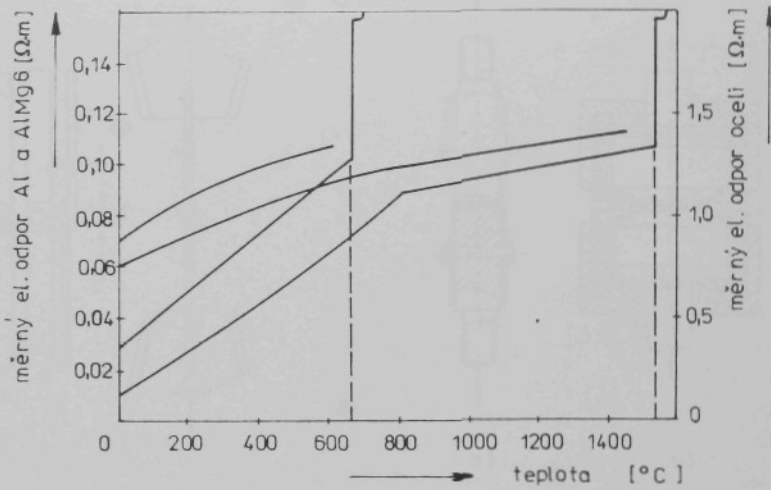
SLEDOVÁNÍ A ŘÍZENÍ SVAŘOVACÍHO PROCESU
PŘI ODPOROVÉM BODOVÉM SVAŘOVÁNÍ ŽÁROVĚ
POHLINÍKOVANÝCH OCELOVÝCH PLECHŮ

Příloha kandidátské disertační práce

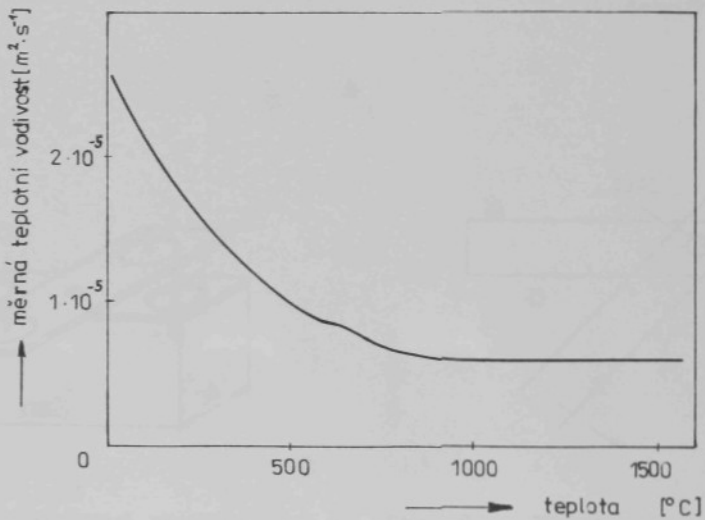
Číslo a název vědního oboru
23-07-9 Strojírenská technologie

Odborné vedení: Prof. Ing. Jaroslav Tměj, CSc.

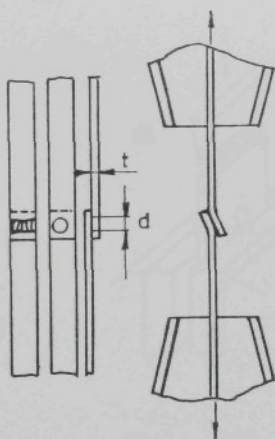
Liberec, březen 1990



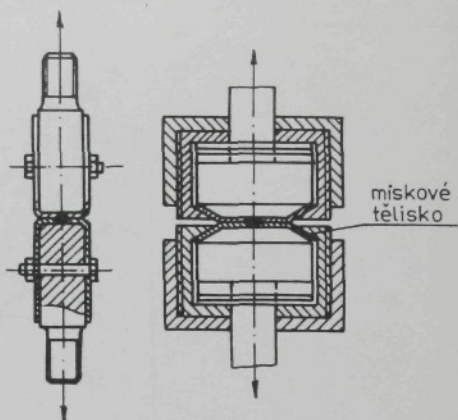
Obr. P-1. Teplotní závislost měrného elektrického odporu



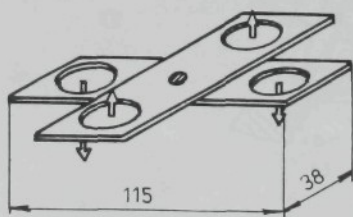
Obr. P-2. Závislost měrné teplotní vodivosti na teplotě pro ocel (0,11 % C, 0,36 % Mn)



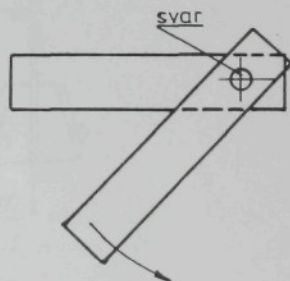
Obr. P-3. Zkušební těleso
a schéma provedení
zkoušky tahem
(smykové zkoušky)



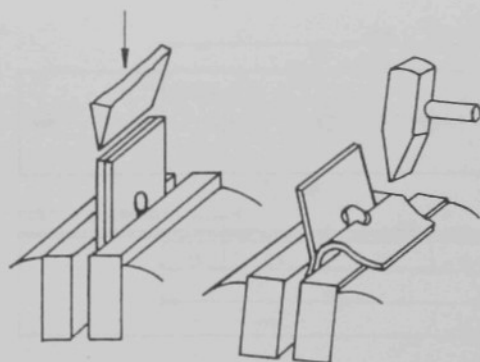
Obr. P-4. Schéma provedení
tahové zkoušky na
vytržení svaru
a) zkušební těleso
tvaru U,
b) miskový tvar
zkušebního tělesa



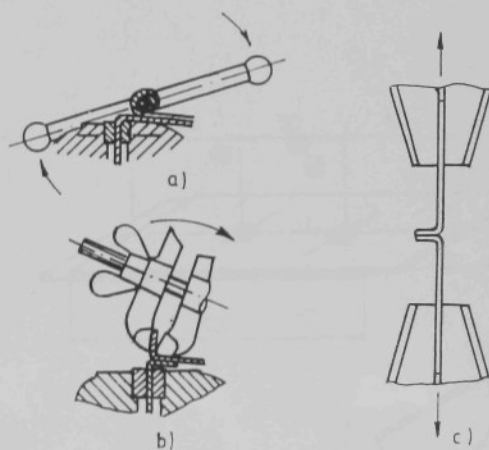
Obr. P-5. Křížová zkouška



Obr. P-6. Zkouška kroucením



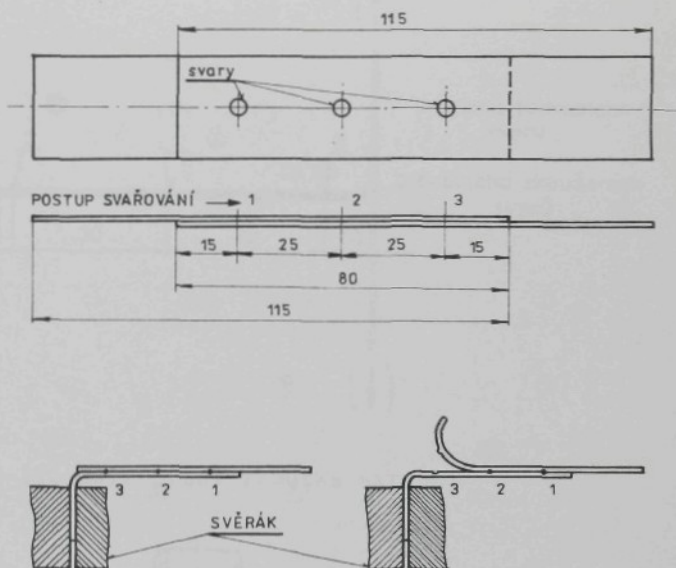
Obr. P-7. Zkouška sekáčem



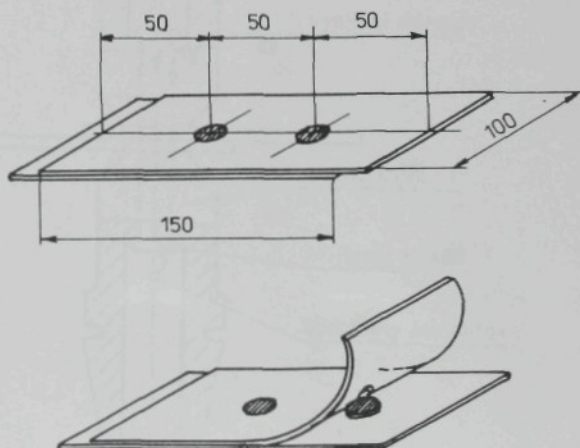
Obr. P-8. Odlupovací zkoušky

a), b) - ruční provedení

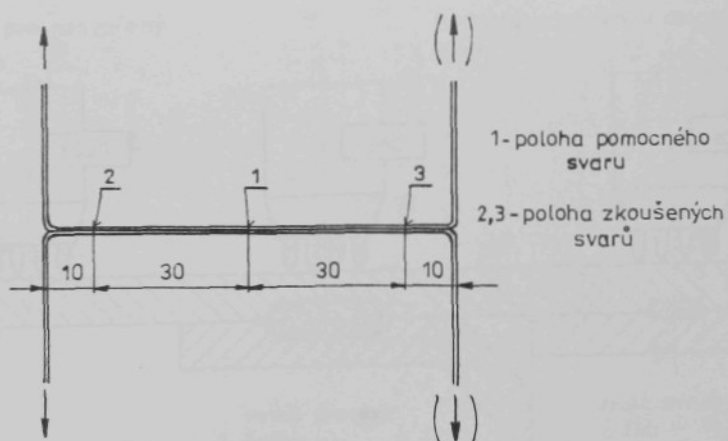
c) strojní provedení



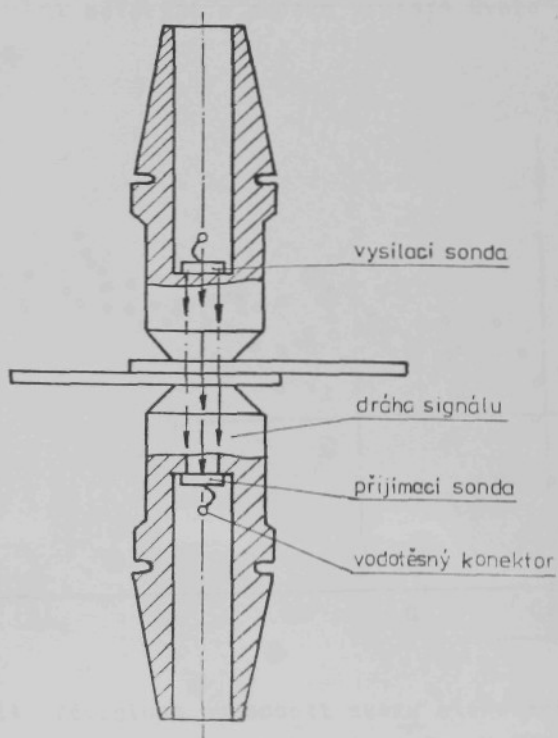
Obr. P-9. Odlupovací zkouška podle Doc. IIW III-586-78



Obr. P-10. Odlupovací zkouška podle Ford Motor Company BA 13-4



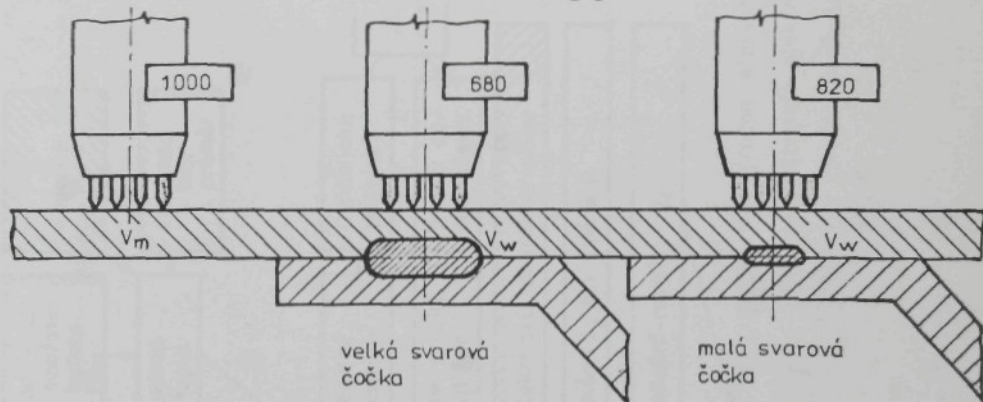
Obr. P-11. Odlupovací zkouška strojní



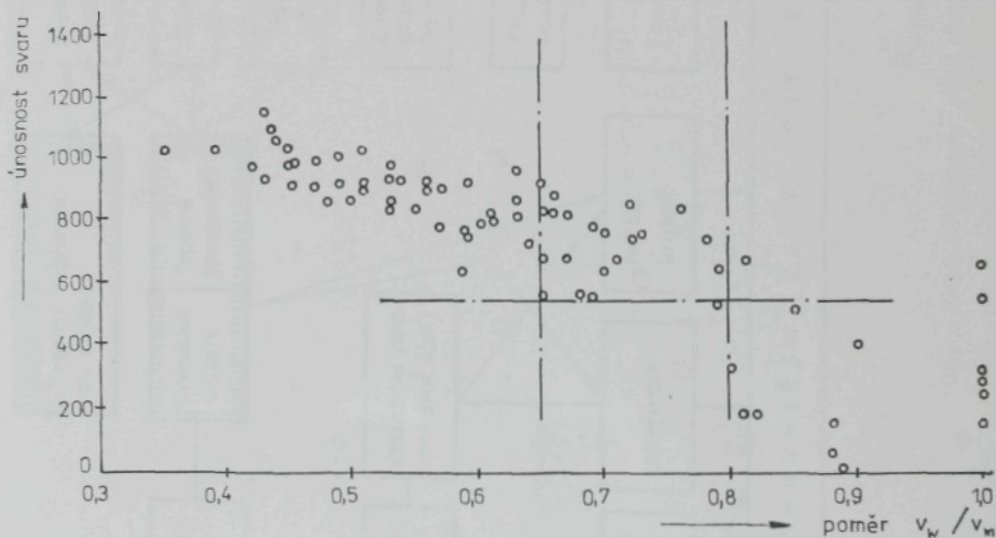
Obr. P-12. Ultrazvukové sondy umístěné v elektrodách

Hodnota pro nesvařený
materiál

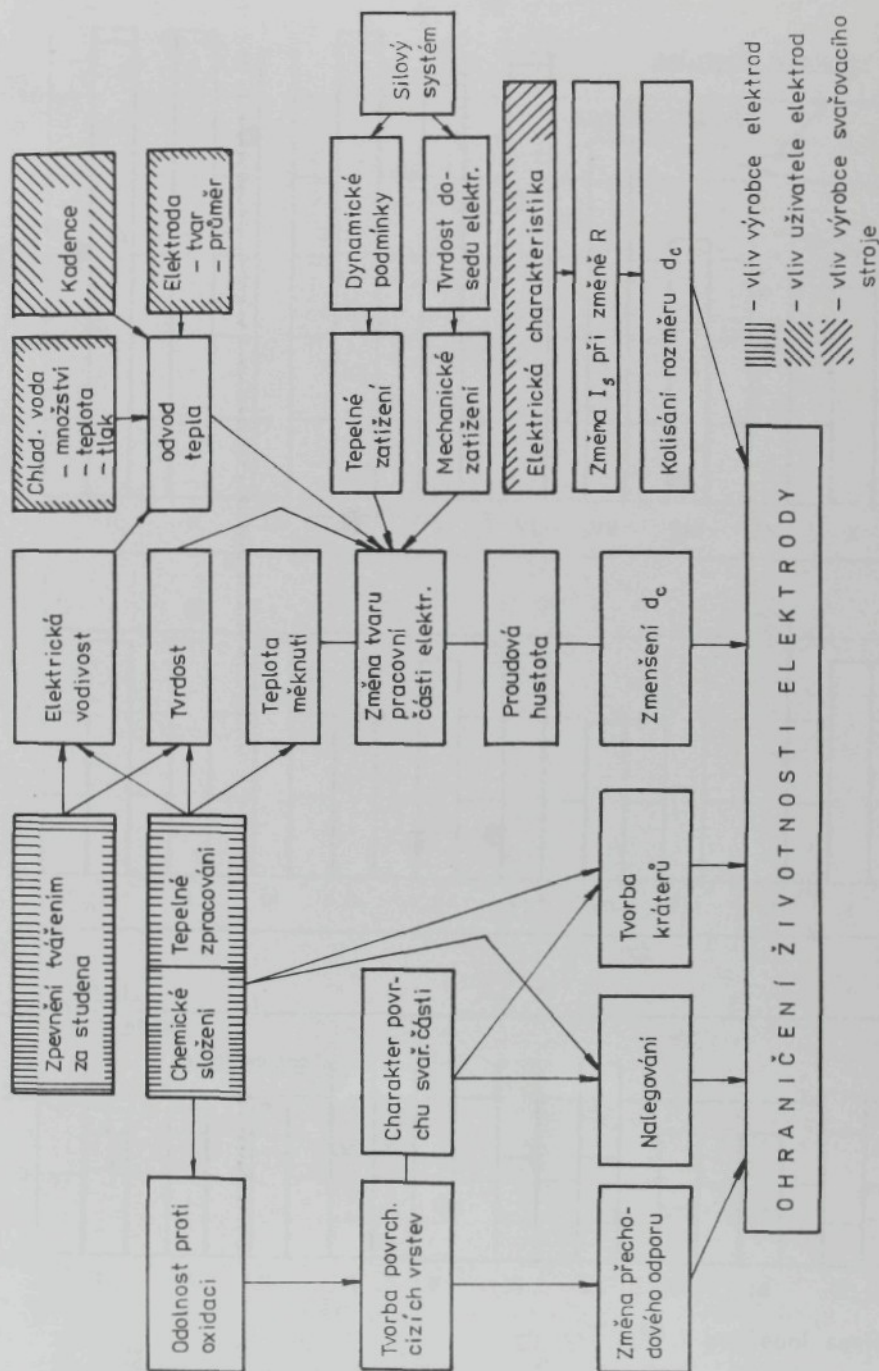
Hodnota pro tavnou oblast
svaru



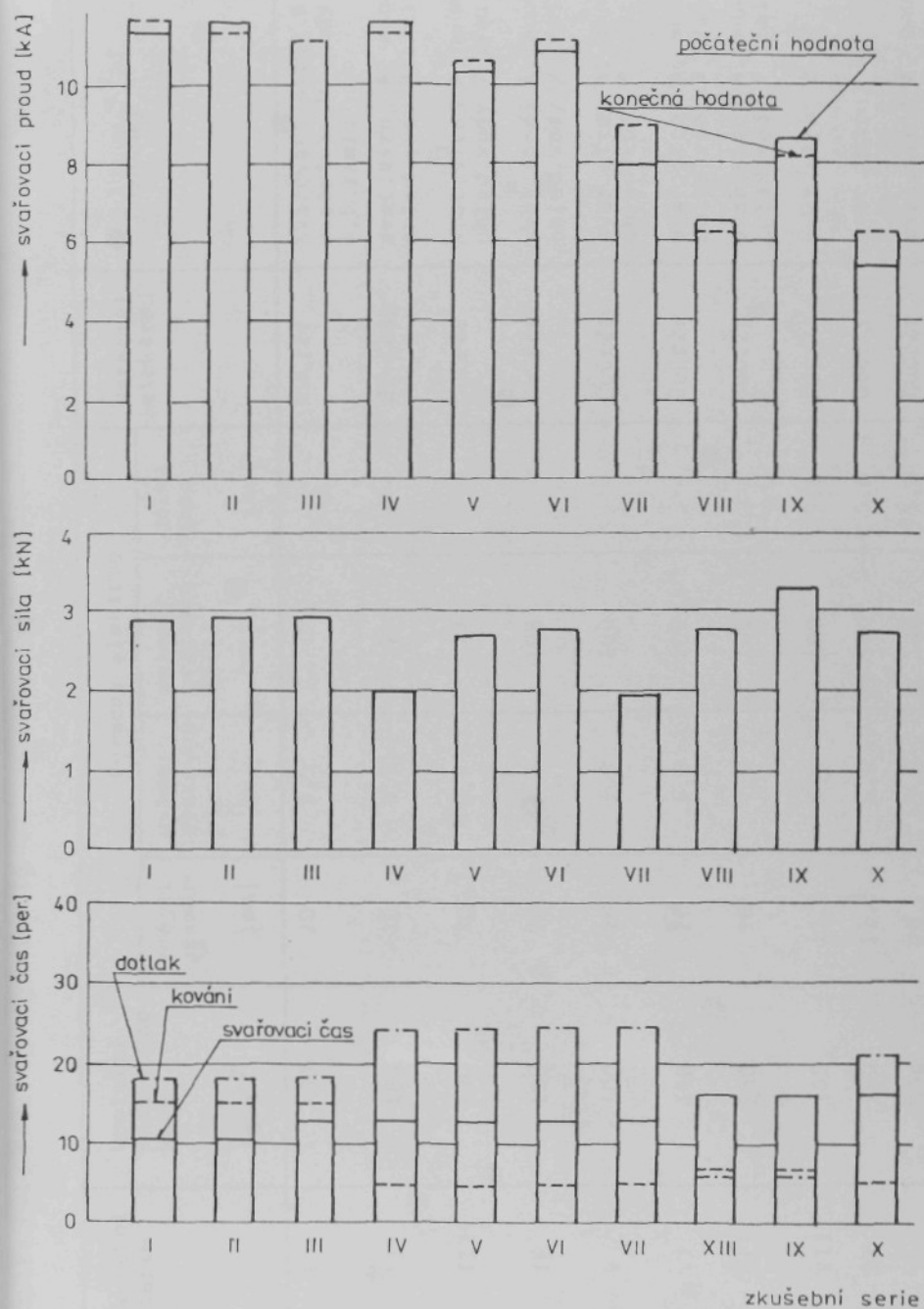
Obr. P-13. Princip stanovení odporu pro nesvařený
materiál a odporu v místě svaru



Obr. P-14. Závislost únosnosti svaru stanovené smykovou
zkouškou na velikosti poměru V_w/V_m

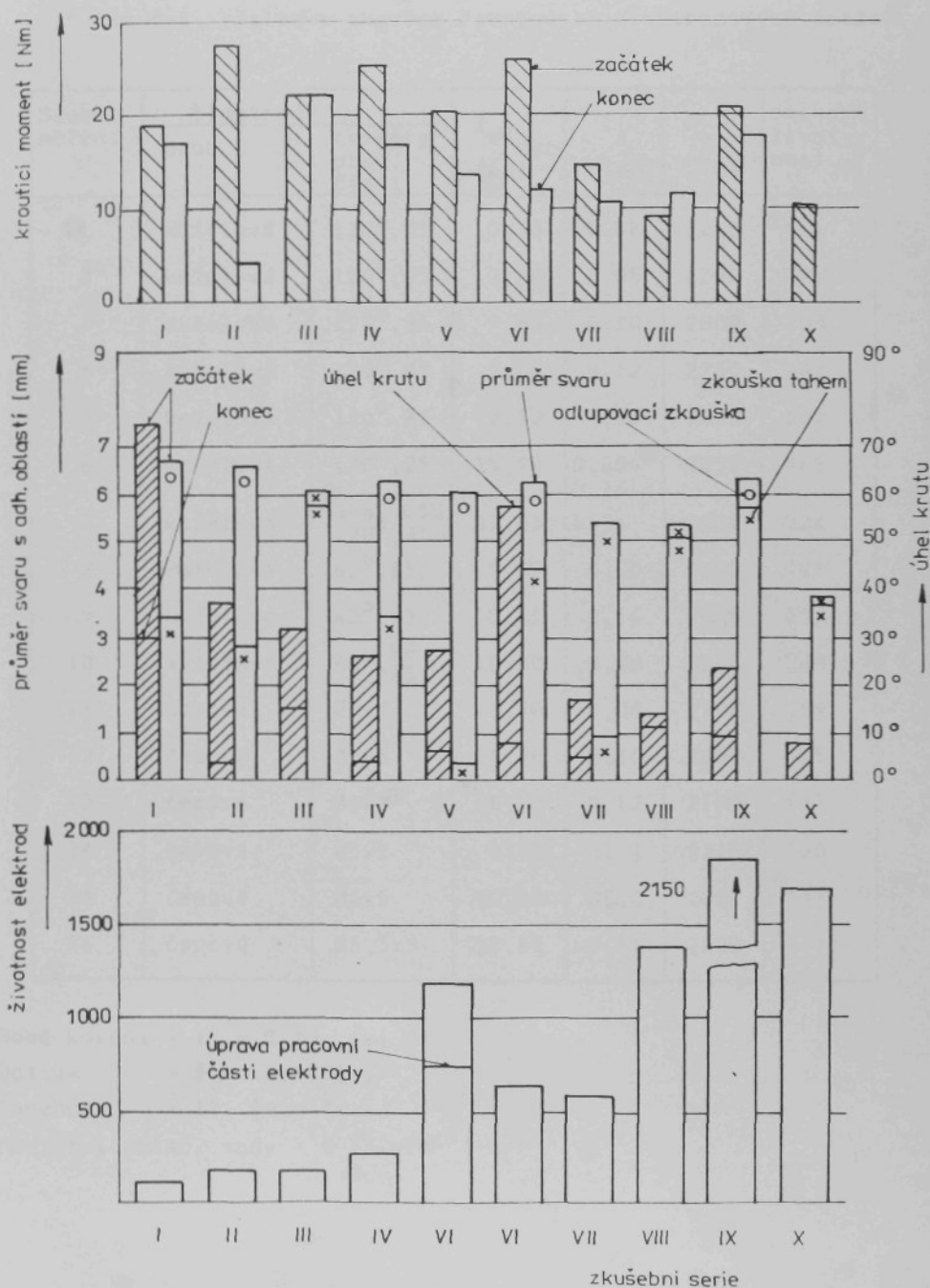


Obz. P-15. Faktory ovlivňující životnost elektrod



Obr. P-16. Technologické parametry experimentů

Zkušební série	Množství naneseného kovu $[\text{g} \cdot \text{m}^{-2}]$	Rozměry elektrod				Materiál elektrod	Poznámky
		vnější průměr $[\text{mm}]$	průměr pracovní plochy $[\text{mm}]$	poloměr pracovní části $[\text{mm}]$	délka čepu $[\text{mm}]$		
I	100	20	8,5	75	-	CuCrZr	svařovací stroj A, množství chl.vody 4,5 l/min
II	100	20	8,5	75	-	SE-CuAg	svař.stroj A, množství chlاد.vody 9 l/min
III	100	20	8,5	75	-	CuCrZr	svař.stroj A, množství chlاد.vody 9 l/min
IV	100	20	6,5	100	-	CuCrZr	svař.stroj A, množství chlاد.vody 9 l/min
V	100	20	5,8	100	-	CuCrZr	svař.stroj A, množství chlاد.vody 9 l/min
VI	150	20	5,8	100	-	CuCrZr	svař.stroj A, množství chlاد.vody 9 l/min
VII	150	20	5,0	100	-	CuCrZr	svař.stroj A, množství chlاد.vody 9 l/min
VIII	150	12,5	5,0	100	5,0	CuCrZr	svař.stroj B
IX	200	12,5	6,0	100	5,0	CuCrZr	svař. stroj B
X	200	20	5,0	100	5,0	CuCrZr	svař.stroj A, množství chlاد.vody 9 l/min



Obr. P-17. Vyhodnocení experimentálních zkoušek

Tabulka P-2. Výsledky zkoušek životnosti elektrodových špiček

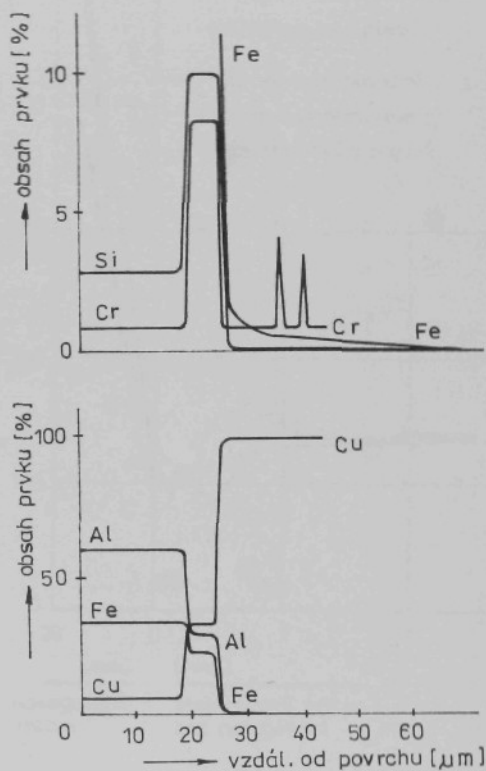
Soubor měření	Elektrody		$I_{ef\ stř}$ kA	t_s s	F_s N	celková životnost
	druh	rozměry prac. části				
1	kuželová	120 ⁰ , Ø5	10,50	0,08	2250	414
2	kuželová	120 ⁰ , Ø5	10,80	0,08	2250	294
3	kuželová	120 ⁰ , Ø5	9,80	0,10	2000	703
4	kuželová	120 ⁰ , Ø5	9,60	0,12	2250	182
5	kuželová	120 ⁰ , Ø5	9,50	0,16	2000	604
6	kuželová	120 ⁰ , Ø5	10,70	0,08-0,16	2250	482
7	kuželová	návar K 50 120 ⁰ , Ø5	11,05	0,16	2000	506
8	kuželová	60 ⁰ , Ø5	9,60	0,10	2000	705
9	kuželová	60 ⁰ , Ø5	9,25	0,16	2000	753
10	kuželová	60 ⁰ , R8 Ø5	10,00	0,08	2250	249
11	čepová	Ø5x5	10,30	0,08	2250	59
12	čepová	Ø5x5	9,50	0,10	2000	65
13	čepová	Ø5x2	8,60	0,12	2250	147
14	čepová	Ø5x2	8,60	0,12	2250	120
15	čepová	Ø6x5	10,60	0,10	2000	555
16	čepová	Ø6,5x5	10,65	0,16	2000	2658

Doba kování - $t_k = 0,20$ |s|

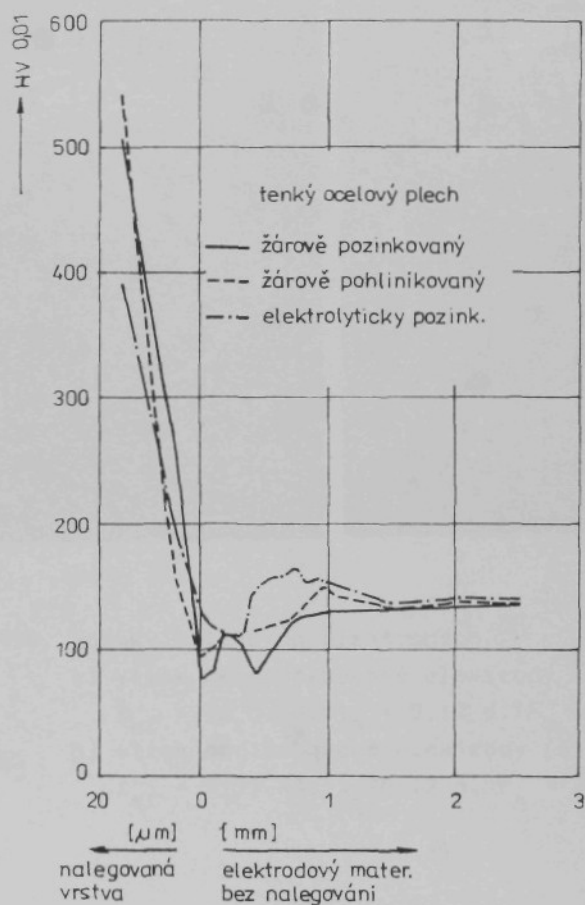
Dotlak - $t_d = 0,42$ |s|

Kadence - 12 |min⁻¹|

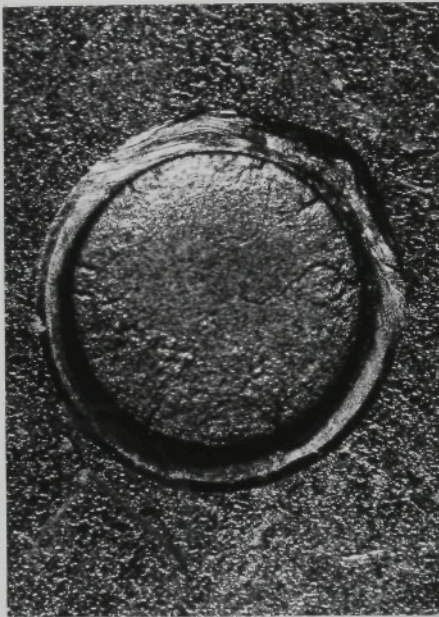
Množství chlad. vody - 4 |l.min⁻¹|



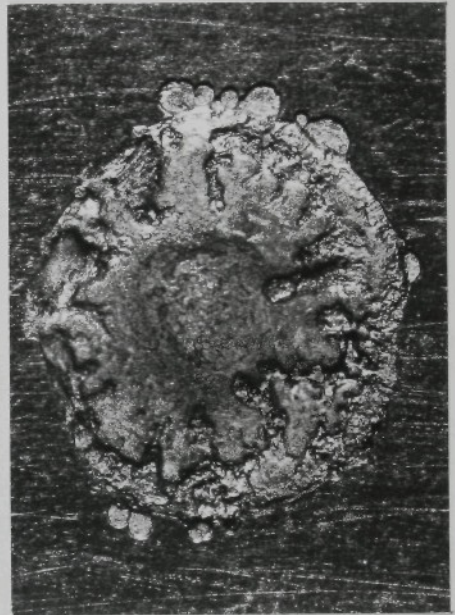
Obr. P-18. Výsledky kvantitativní mikroanalýzy metalurgicky ovlivněné vrstvy na elektrodě, kterou bylo svařeno 5000 svarů na žárově pohliníkováném plechu



Obr. P-19. Změny tvrdosti v oblasti pracovní části elektrody po svaření 5000 svarů tenkých ocelových plechů s různými povrchovými vrstvami



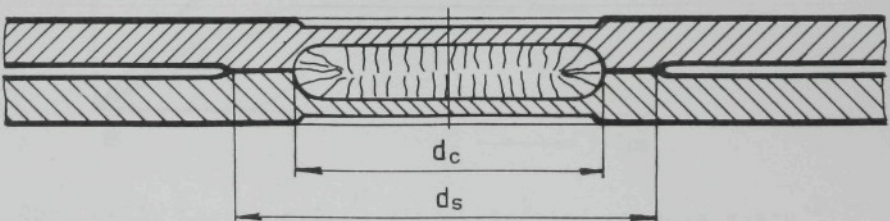
a)



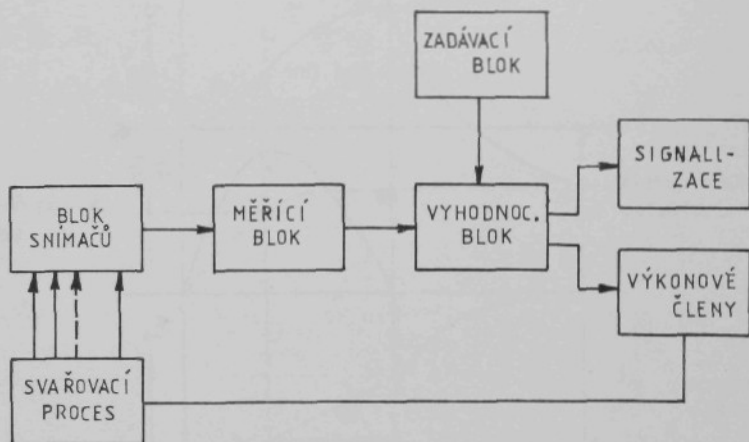
b)

Obr. P-20. Snímky vtisků po elektrodách

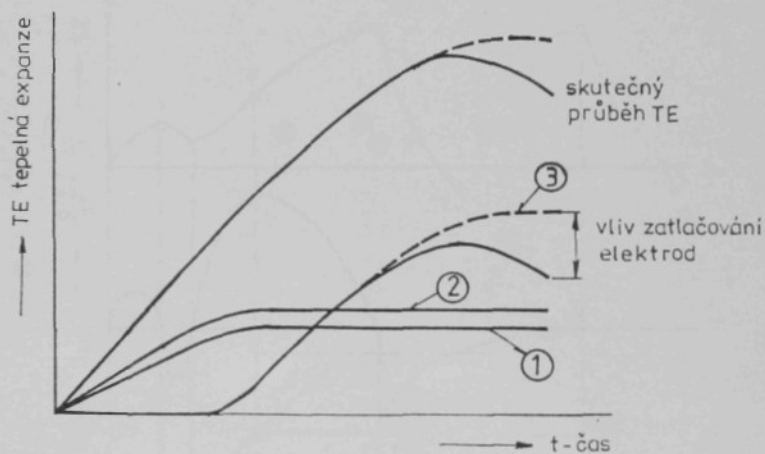
- a) vtisk neopotřebované elektrody (svar č. 9,
 $I_{ef} = 10,0 \text{ kA}$, $t_s = 0,12 \text{ s}$, $F_s = 3000 \text{ N}$)
- b) vtisk opotřebované elektrody (svar č. 1203,
 $I_{ef} = 9,75 \text{ kA}$, $t_s = 0,12 \text{ s}$, $F_s = 3000 \text{ N}$)



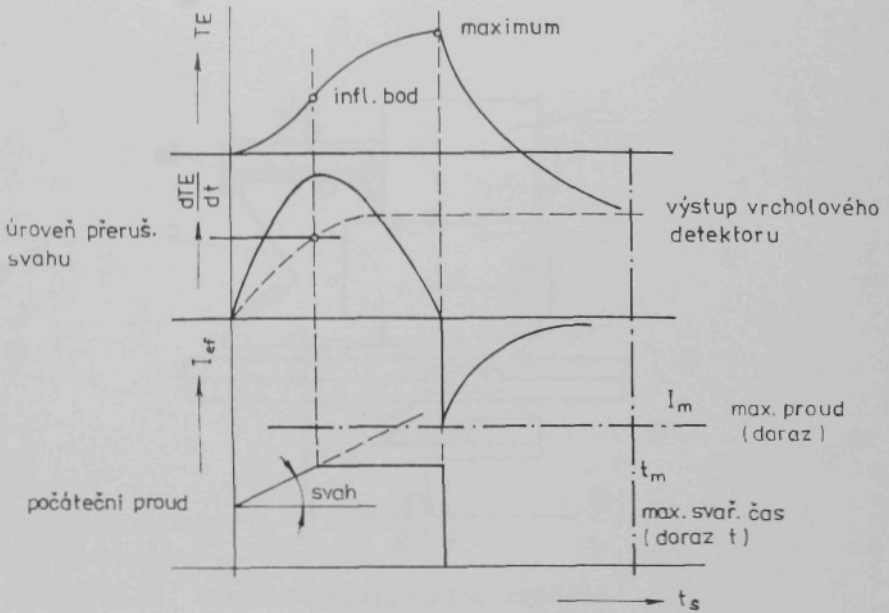
Obr. P- 21. Charakter bodového odporového svaru pokoveného ocelového plechu (d_c - rozměr svarové čočky, d_s - celkový rozměr svaru)



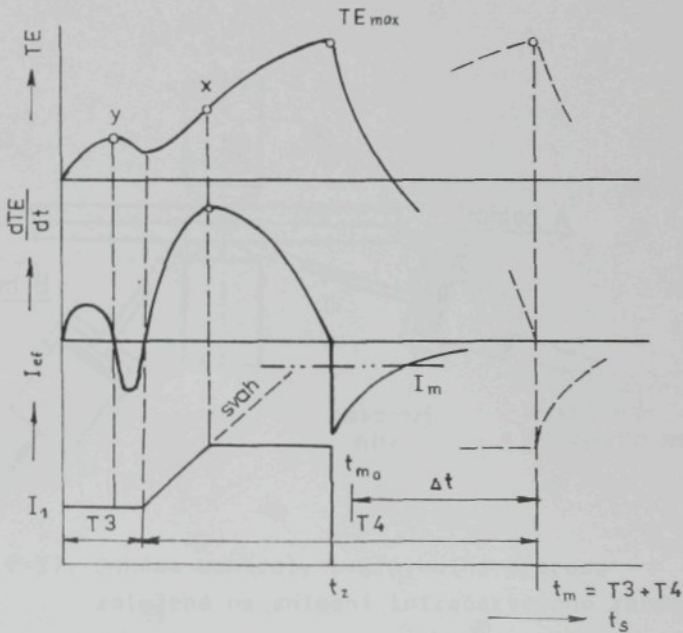
Obr. P-22. Blokové schéma hlavních částí monitorů (nemají výkonové členy) a korekčních systémů



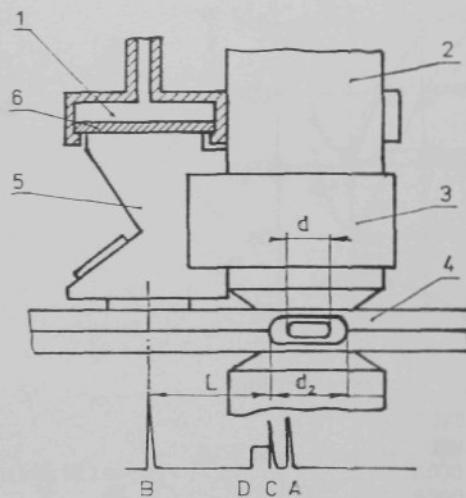
Obr. P-23. Časový průběh složek tepelné expanze svaru
 1 - složka od lineární teplotní roztažnosti,
 2 - složka od přírůstku objemu, 3 - složka od natavení materiálu



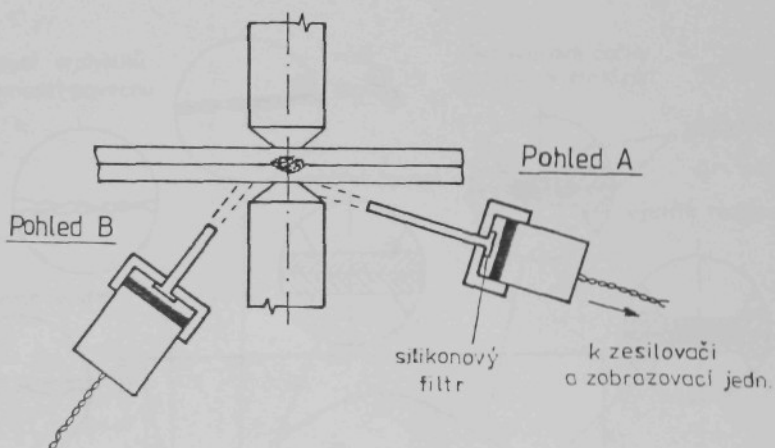
Obr. P-24. Schéma funkce systému VÚZ-AUTOSET TE



Obr. P-25. Schéma funkce systému VÚZ-AUTOSET TE Zn.



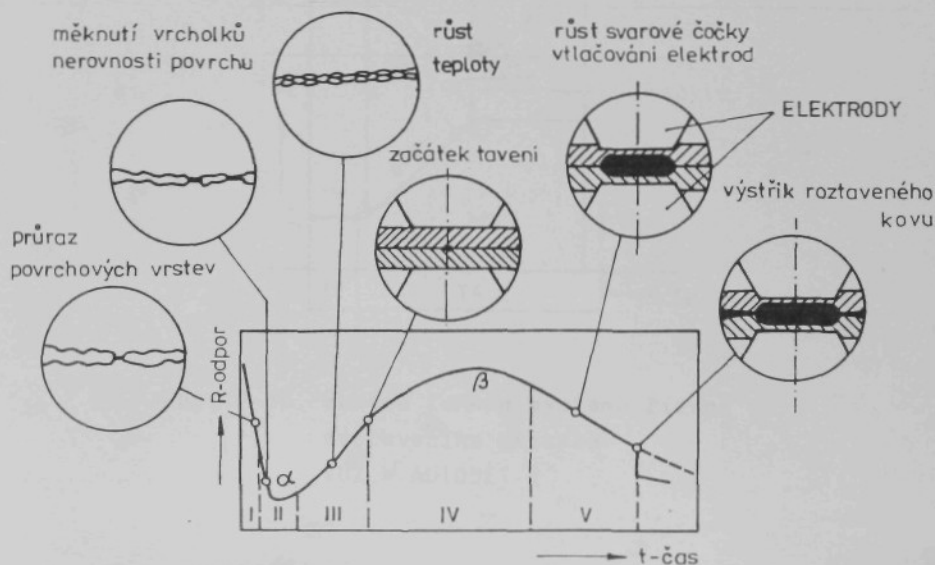
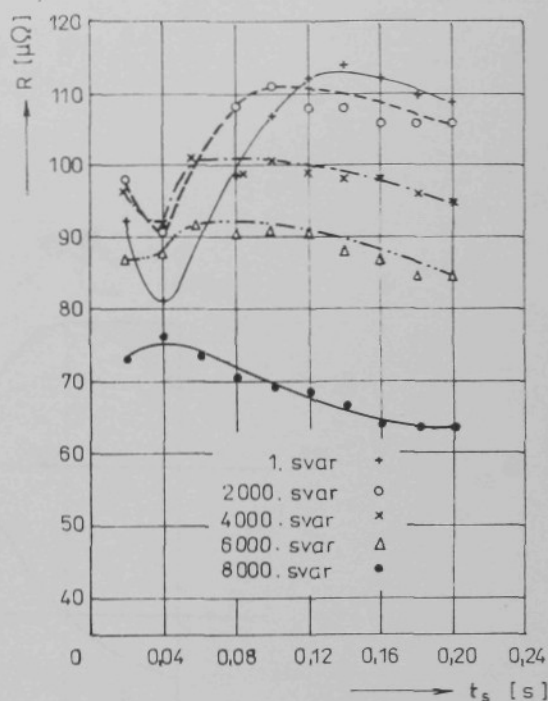
Obr. P-26. Kontrola svařovacího procesu
s využitím ultrazvuku



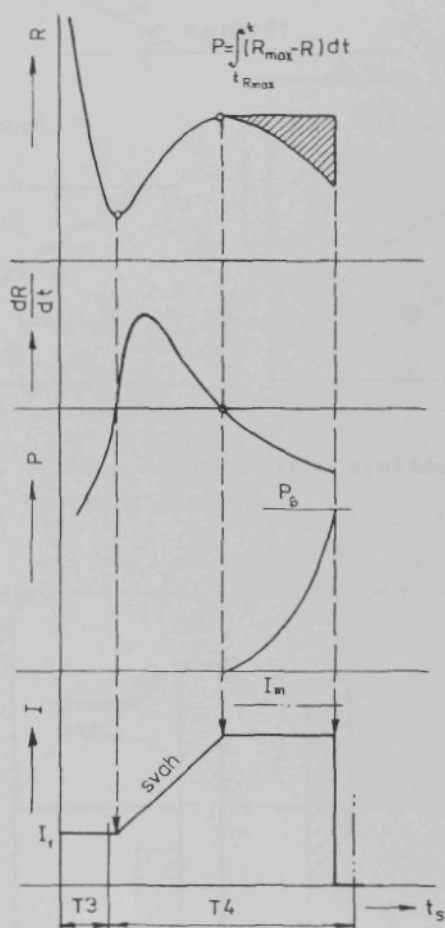
Obr. P-27. Schéma kontroly svařovacího procesu
založené na snímání infračerveného záření

Obr. P-28.

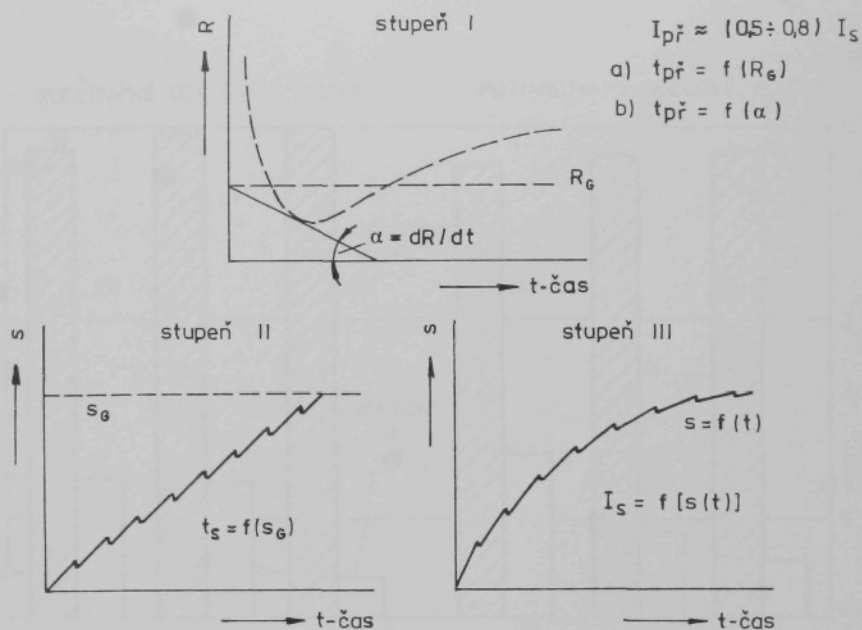
Změny průběhu elektrického odporu svaru s rostoucím opotřebováním elektrod při korekci svařovacího proudu



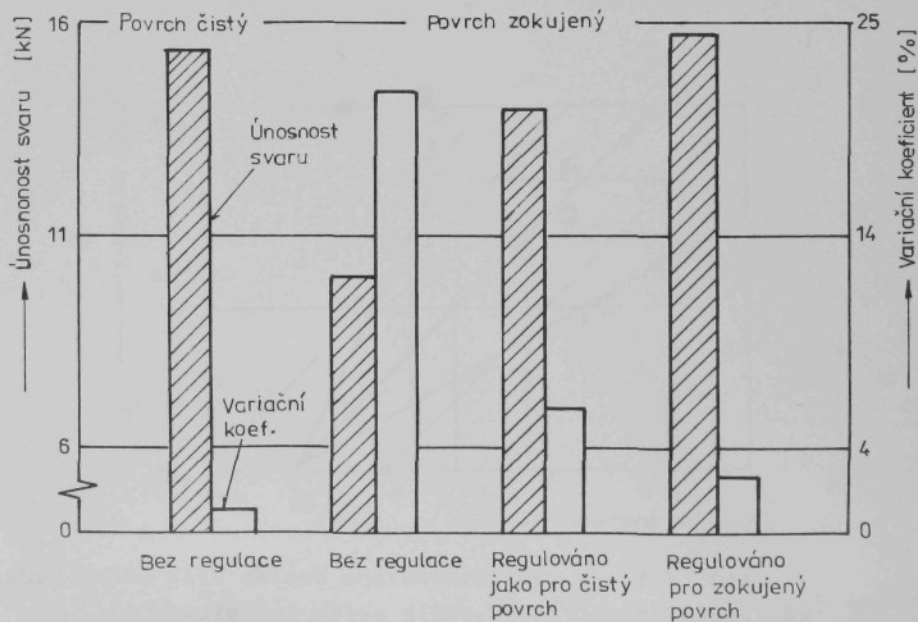
Obr. P-29. Vývojové fáze průběhu elektrického odporu svaru



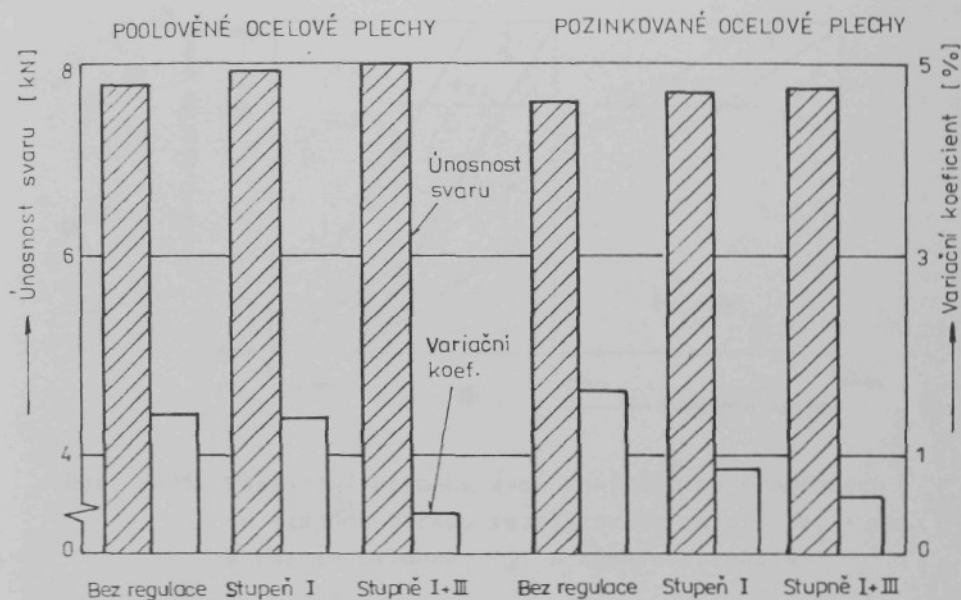
Obr. P-30. Schéma funkce systému řízení
svaro vacího procesu
VÚZ - AUTOSET R



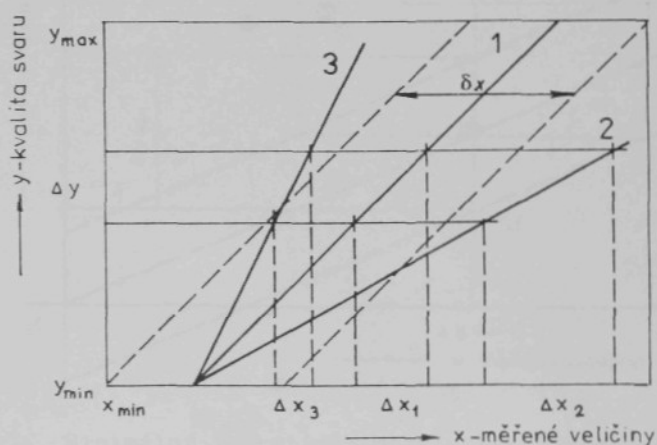
Obr. P-31, Princip třístupňového systému řízení bodového svařování



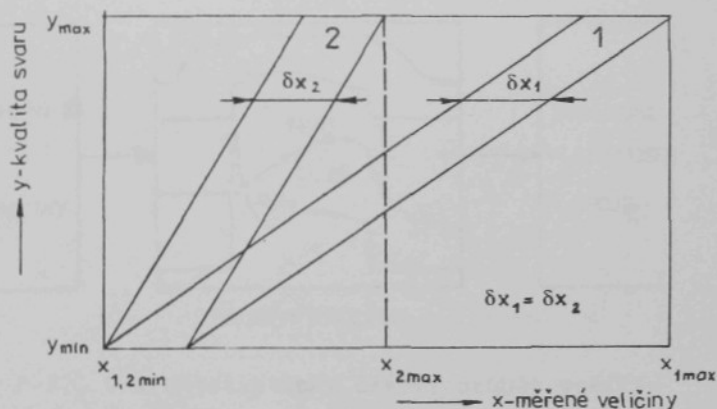
Obr. P-32. Vliv regulace na únosnost svarů při svařování čistého a zokoujeného ocelového plechu



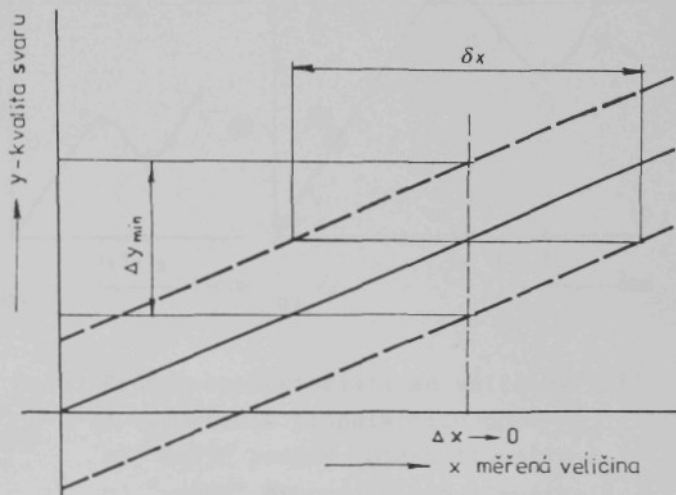
Obr. P-33. Vliv regulace na únosnost svarů při svařování poolověných a pozinkovaných ocelových plechů



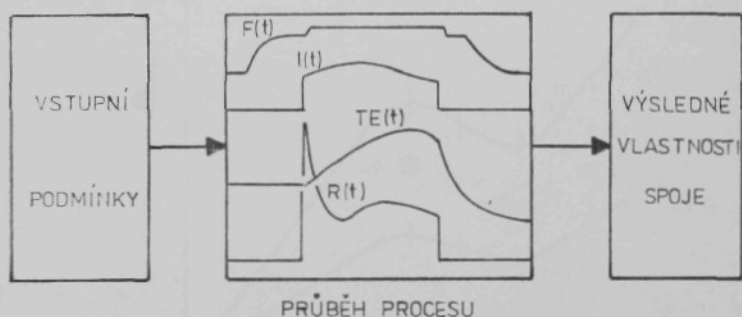
Obr. P-34. Vliv sklonu charakteristiky $y = f(x)$ bez uvažování vlivu šířky rozptylového pásma δx



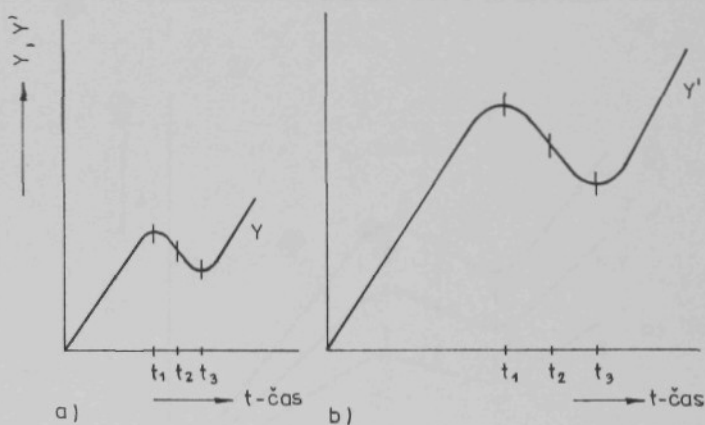
Obr. P-35. Porovnání průběhu dvou kontrolních proměnných se stejnou šířkou rozptylového pásma $\delta x_1 = \delta x_2$ a různým sklonem, tj. s různým rozpětím $x_{max} - x_{min}$



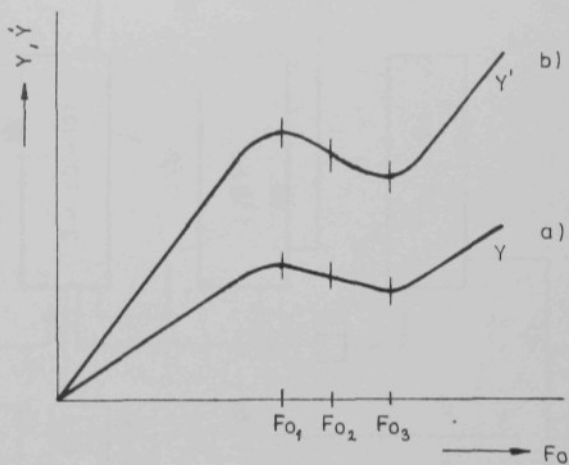
Obr. P-36. Minimální teoreticky možná šířka tolerance kvality svaru Δy pro $\Delta x \rightarrow 0$



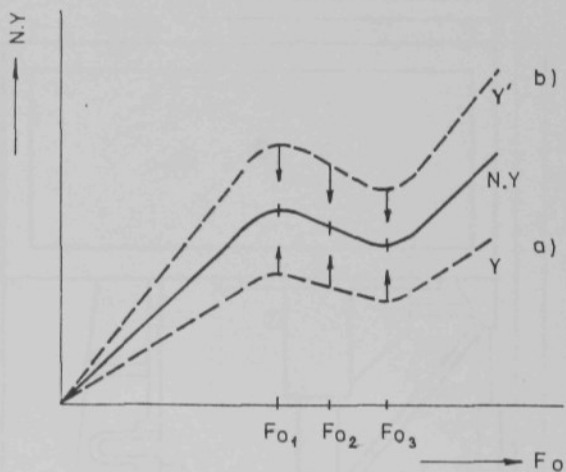
Obr. P-37. Charakteristický časový průběh veličin svařovacího procesu



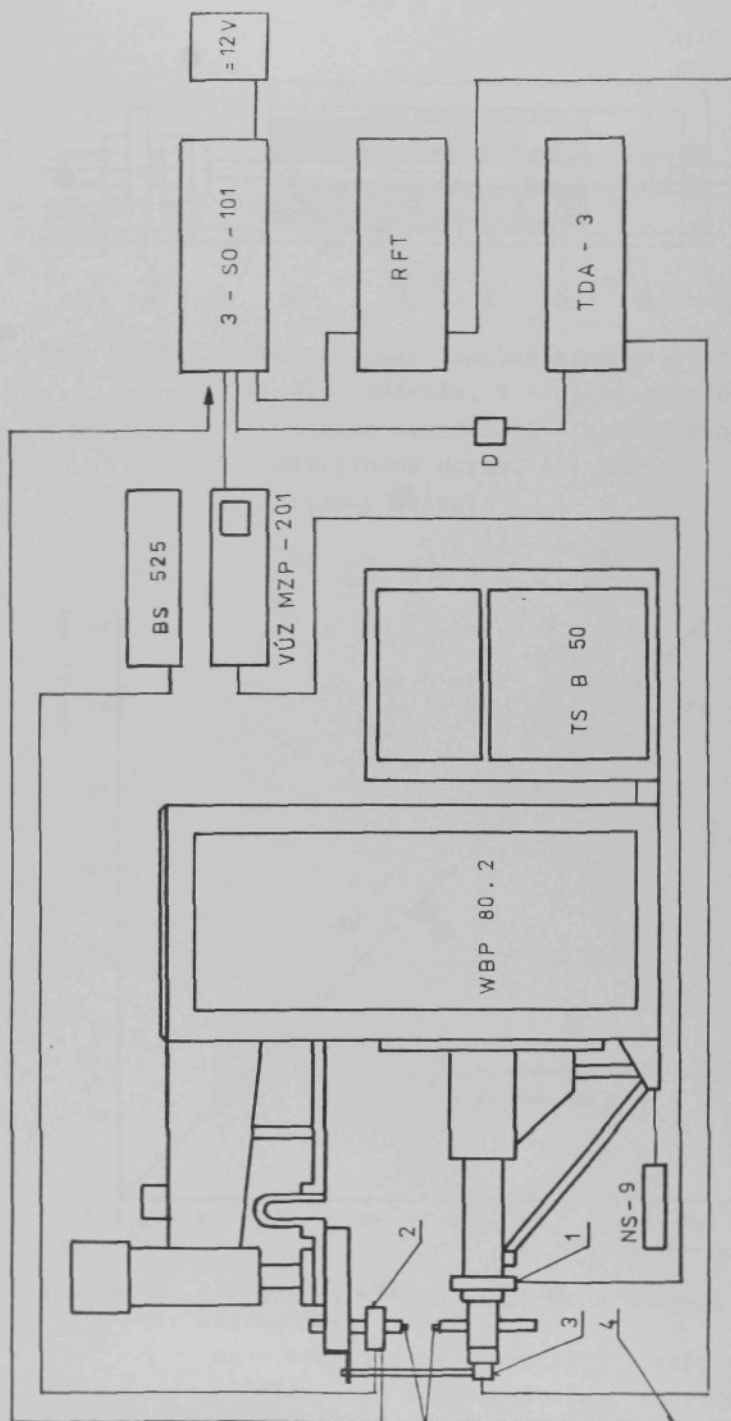
Obr. P-38. Průběh charakteristické veličiny $Y(t)$ s vyznačením singulárních bodů
 a) "malý" proces (plech tloušťky s_1)
 b) "velký" proces (plech tloušťky $s_2 > s_1$)



Obr. P-39. Průběh procesu a) a b) z předchozího obrázku po transformaci na společnou časovou základnu - Fourierovo kritérium

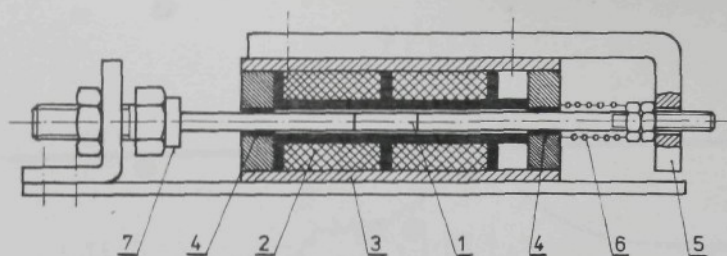


Obr. P-40. Průběhy procesu a) a b) po transformaci na normovanou proměnnou $N.Y = f(F_0)$ splynou

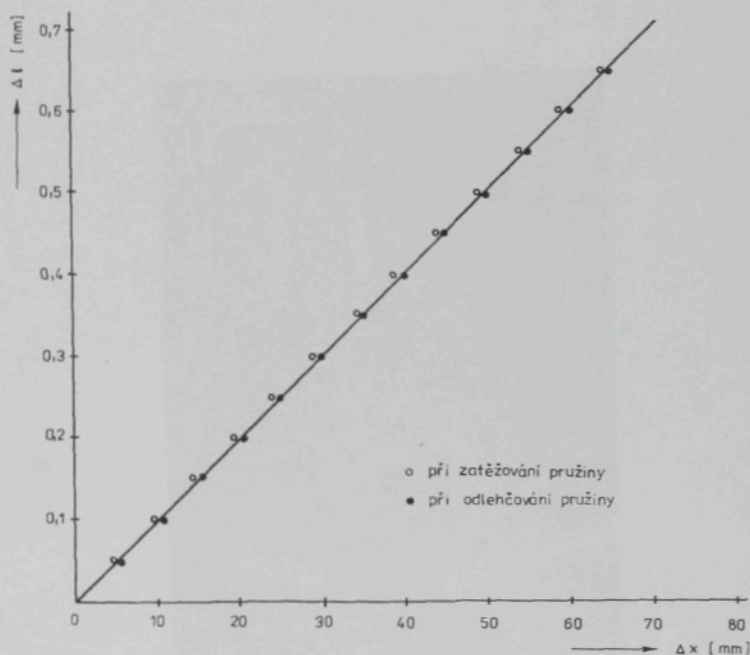


Obr. P-41. Blokové schéma svařovacího pracoviště

- 1 - snímač přístroje VÚZ MZP-201
- 2 - elektroda se zabudovaným snímačem síly
- 3 - snímač tepelné expanze svaru
- 4 - snímání napětí mezi elektrodami

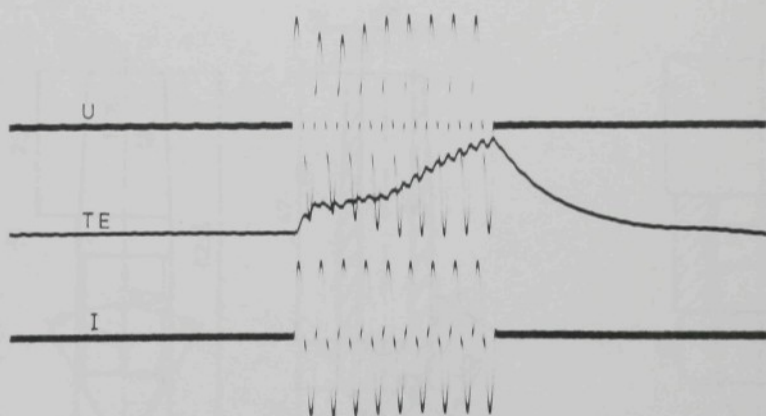


Obr. P-42. Indukční snímač tepelné expanze svaru
(1 - jádro snímače, 2 - cívka snímače,
3 - mosazné pouzdro, 4 - kluzné vedení,
5 - stavitelný doraz, 6 - pružina,
7 - pryžový doraz)

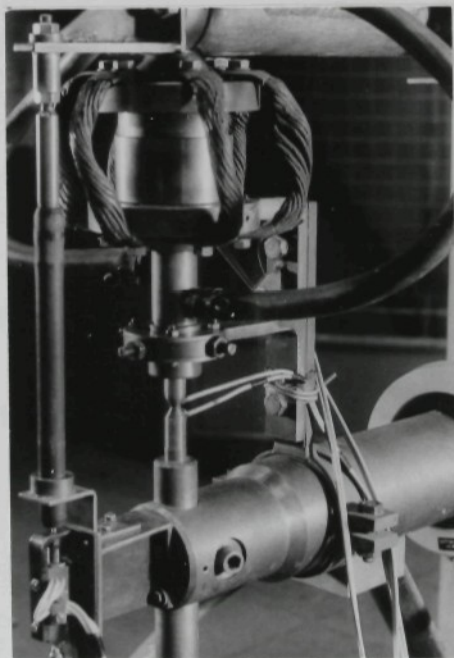


Obr. P-43. Kalibrační křivka indukčního snímače tepelné expanze svarů

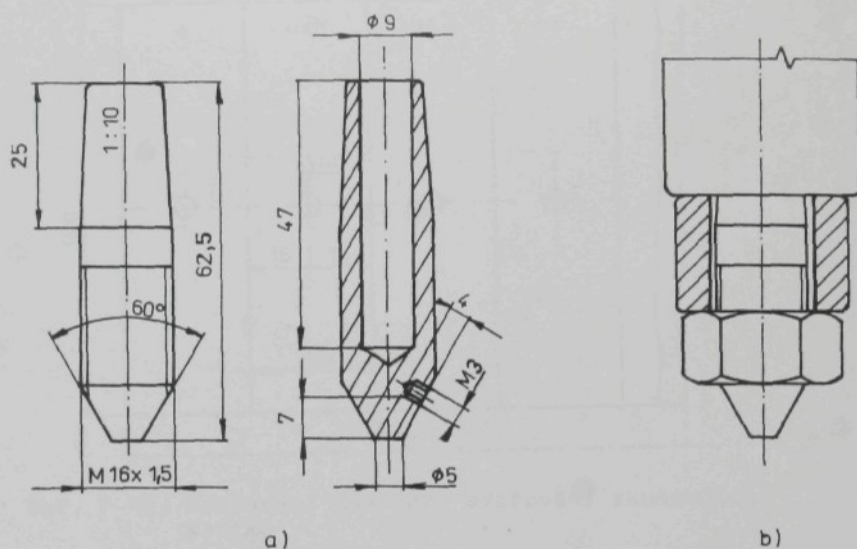
Δx - výchylka na registračním zařízení [mm]
 Δl - tepelná expanze svaru (výchylka jádra snímače) [mm]



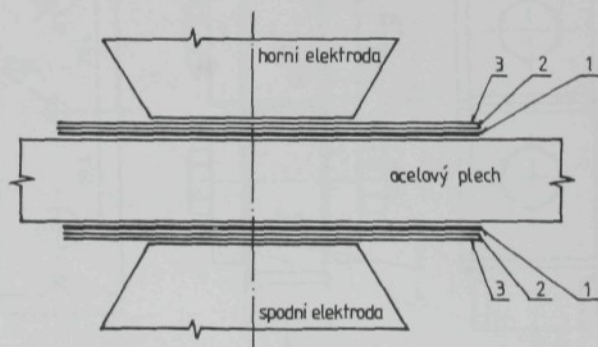
Obr. P-44. Oscillografický záznam sledovaných veličin svařovacího procesu



Obr. P-45. Celkový pohled na držák horní elektrodové špičky

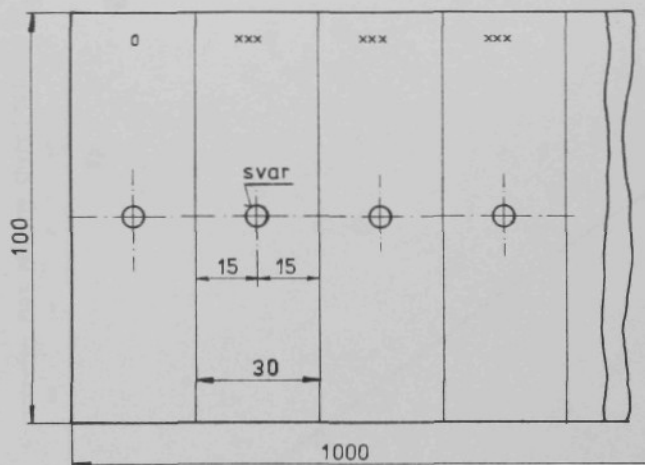


Obr. P-46. a) Tvar a hlavní rozměry elektrodových špiček
b) Způsob výměny elektrodové špičky



Obr. P-47 Provedení otisku pracovní části elektrodové špičky

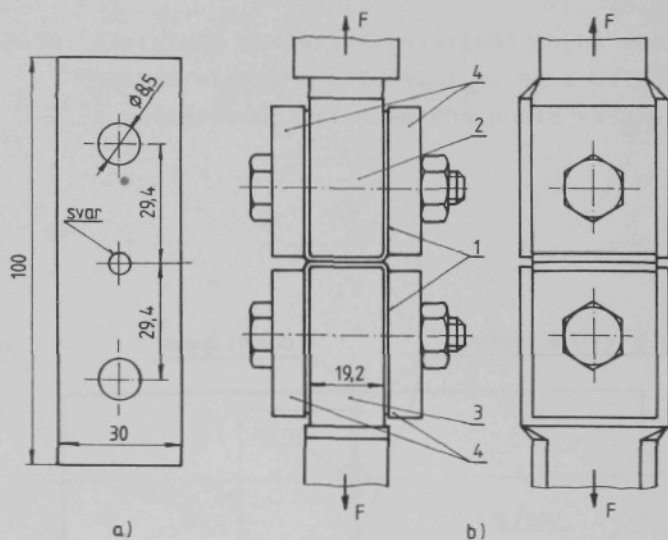
- 1 - bílý karton
- 2 - černý kopírovací papír
- 3 - hliníková fólie (Alobal)



Obr. P-48. Sestavení pásů pro svařování zkušebních vzorků

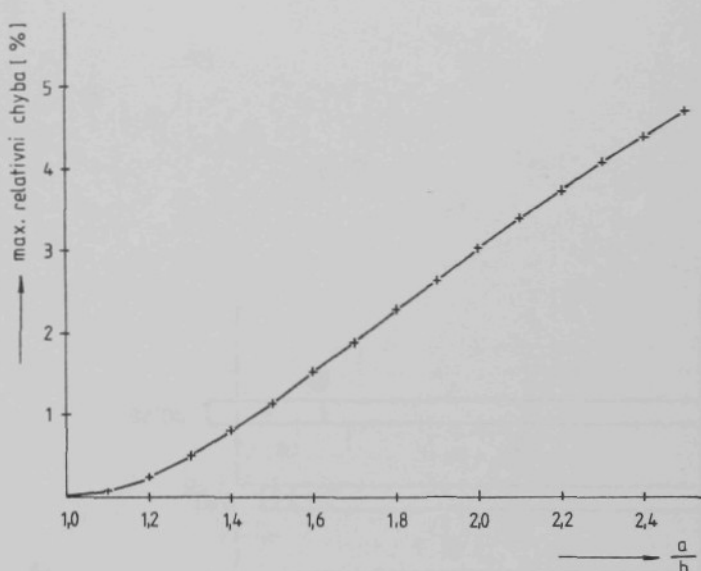
xxx - vyražené číslo vzorku

0 - první svar (kvalita se nevyhodnocuje)

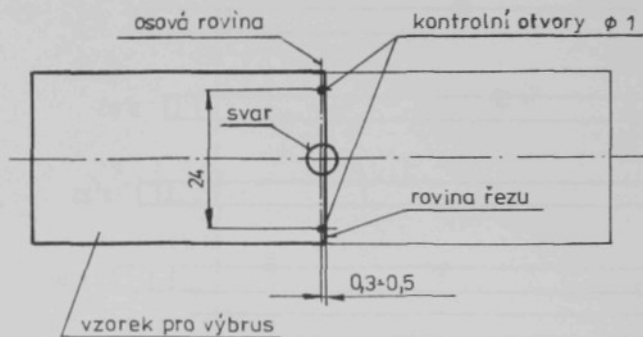


Obr. P-49. Zkouška tahem na odtržení plechů

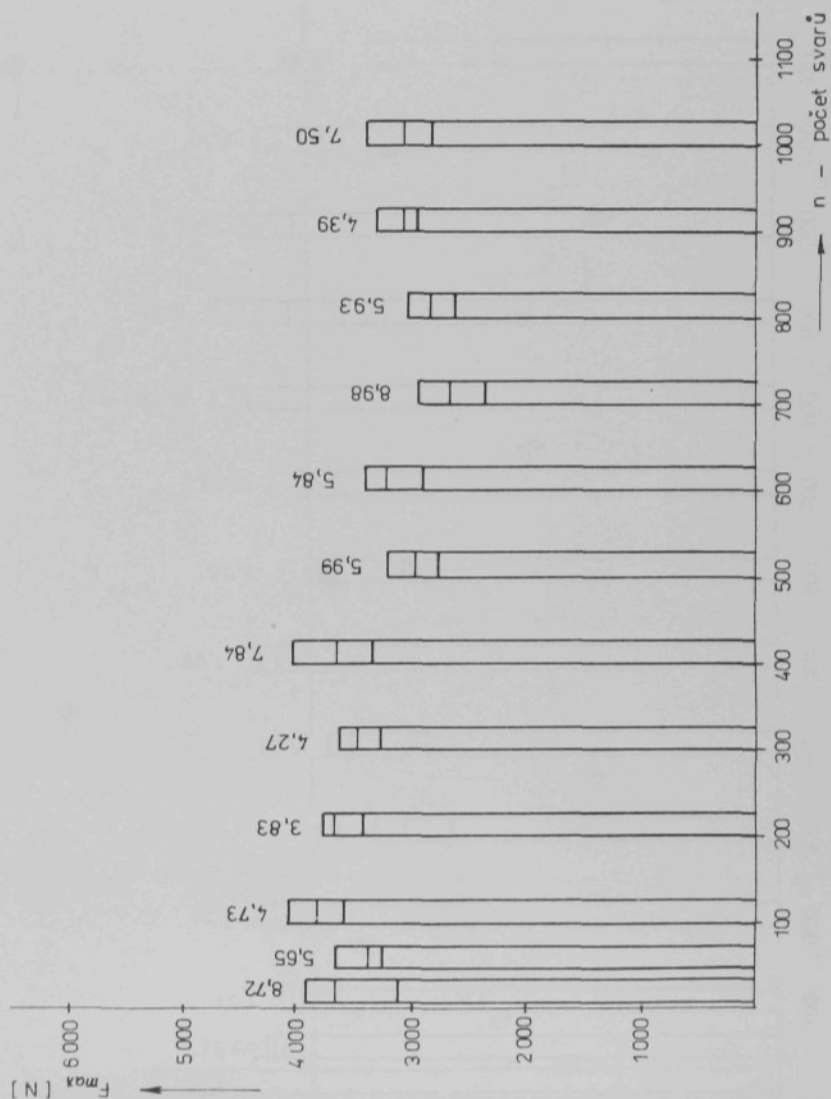
- a) tvar a rozměry zkušebního tělesa před ohnutím do tvaru U
b) Schéma provedení zkoušky (1 - zkušební vzorek, 2, 3 - horní a dolní těleso přípravku, 4 - příložka)



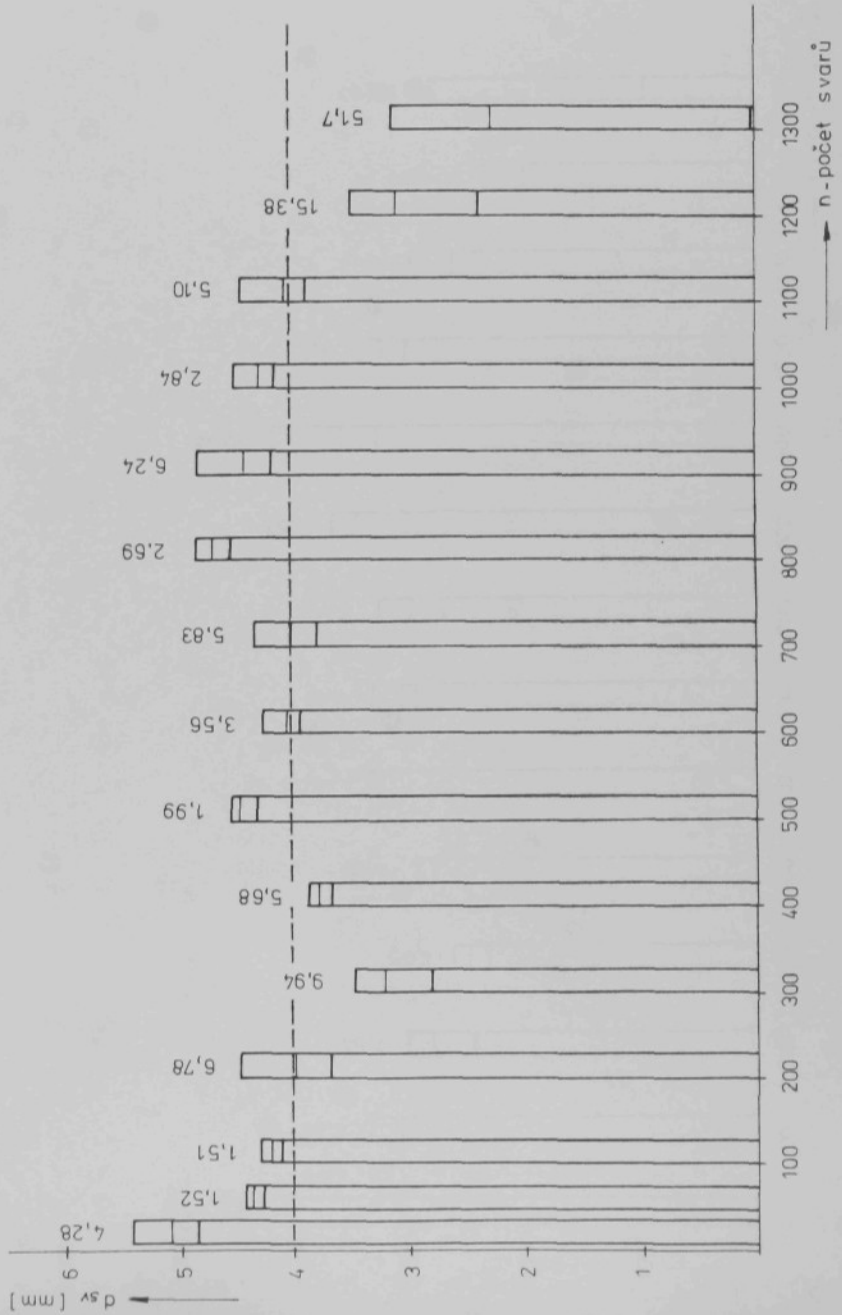
Obr. P-50. Závislost maximální relativní chyby mezi délkou obvodu elipsy s poloosami a , b , a délkou kruhu s průměrem d_{sv} stanoveného podle vztahu (44)



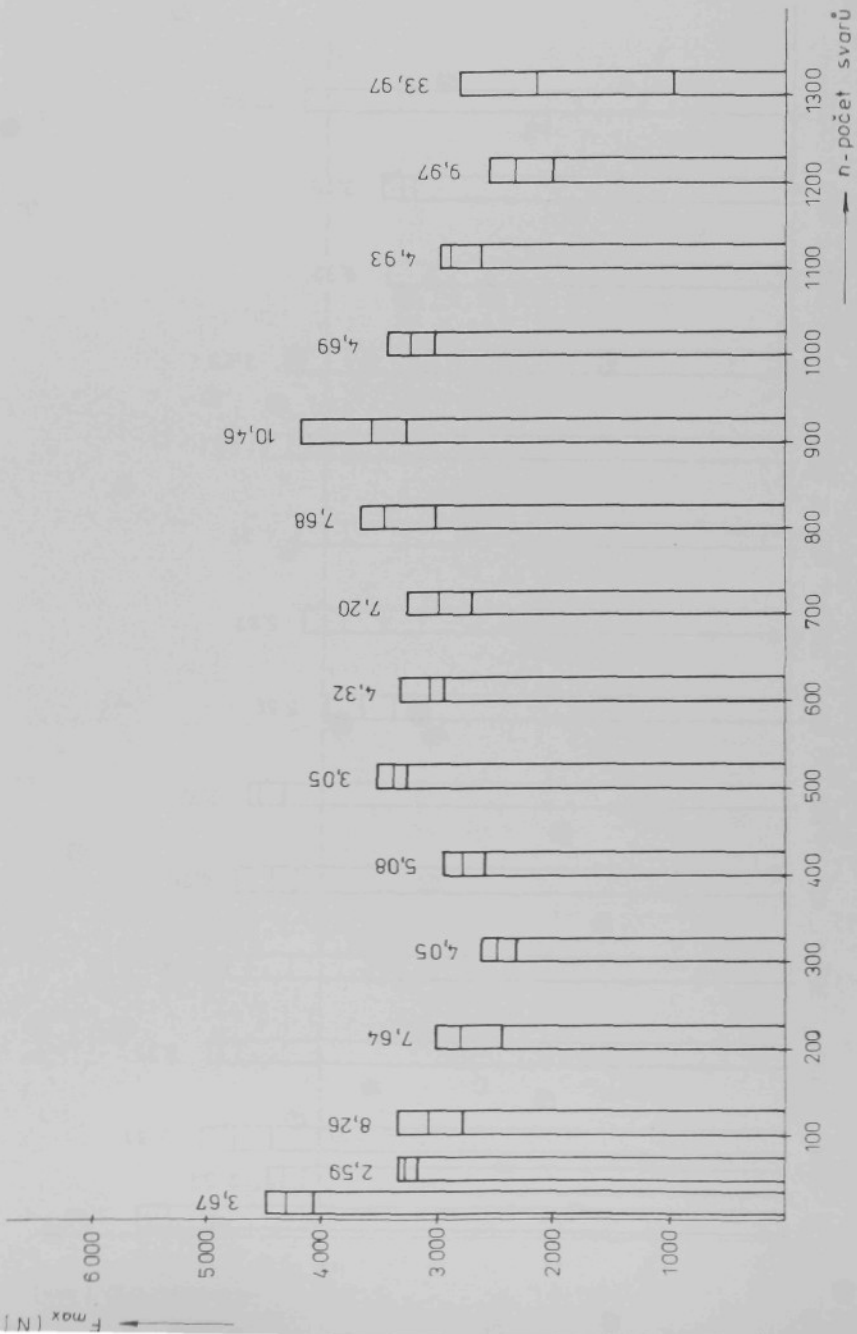
Obr. P-51. Odběr vzorku pro metalografický rozbor



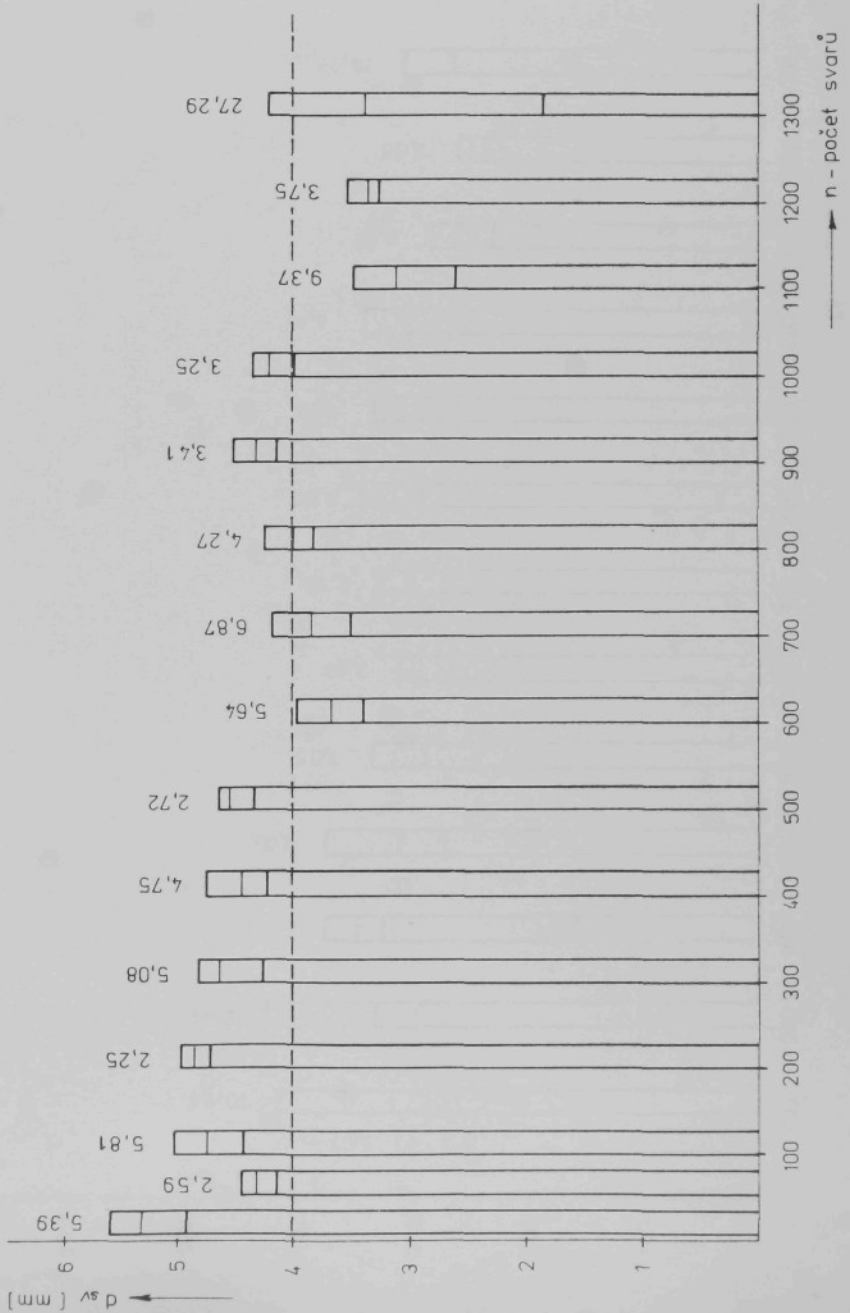
Obr. P-53. Závislost únosnosti svarů na počtu zhotovených svarů - soubor měření č.1



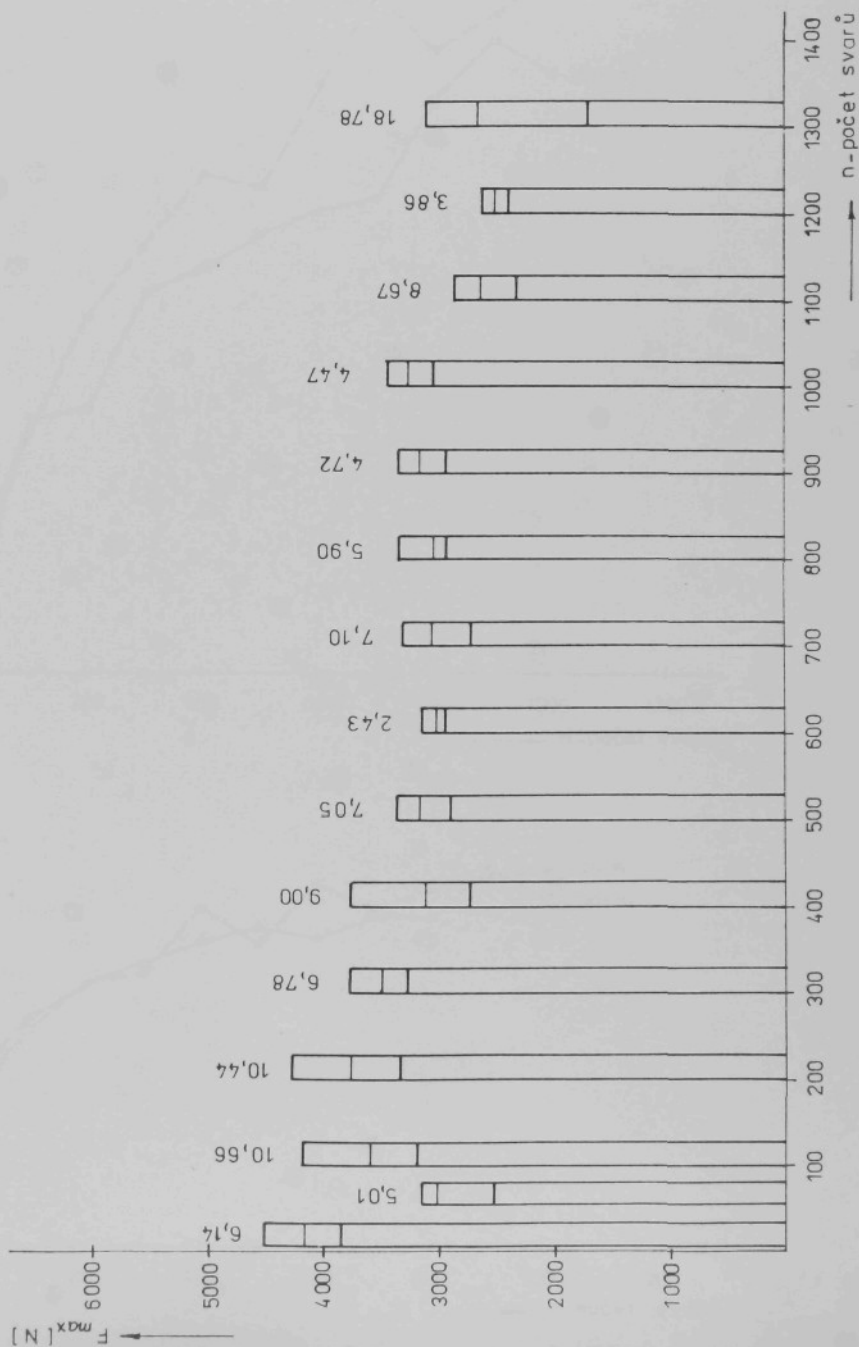
Obr. P-54. Závislost rozměru svarů na počtu zhotovených svarů - soubor měření č.2



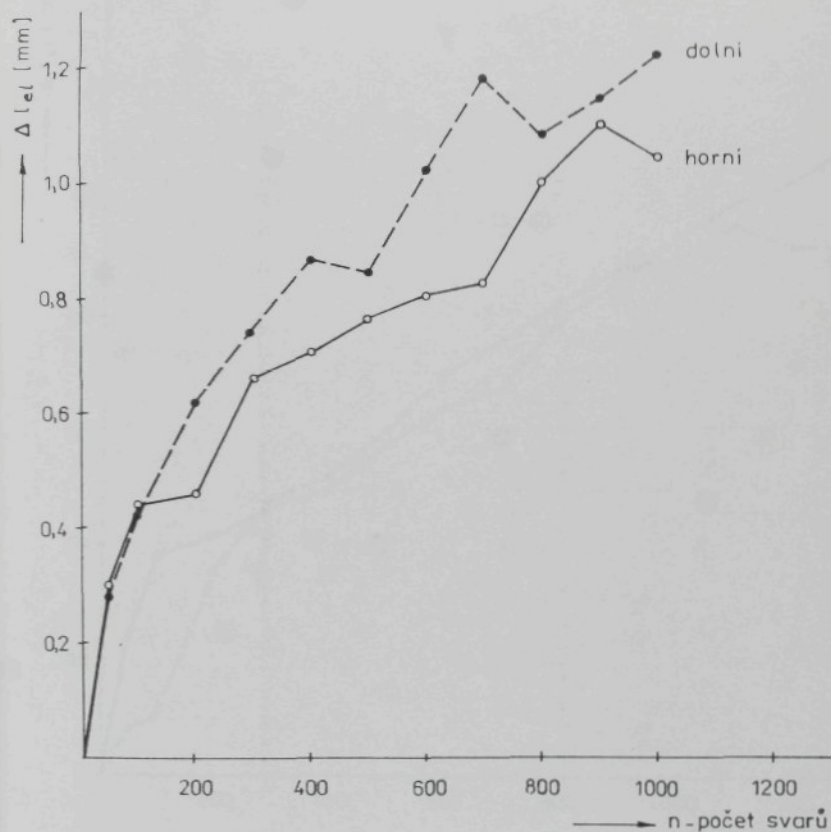
Obr. P-55. Závislost únosnosti svarů na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 2



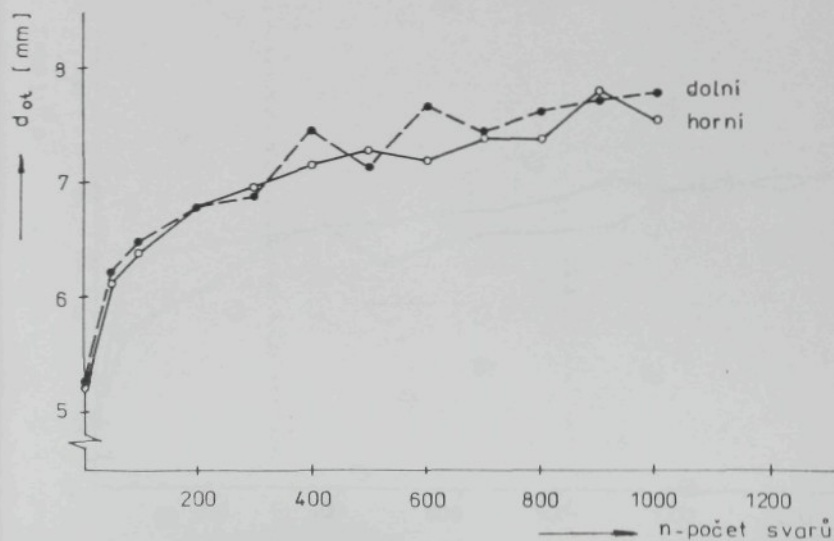
Obz. P-56. Závislost rozměru svarů na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 3



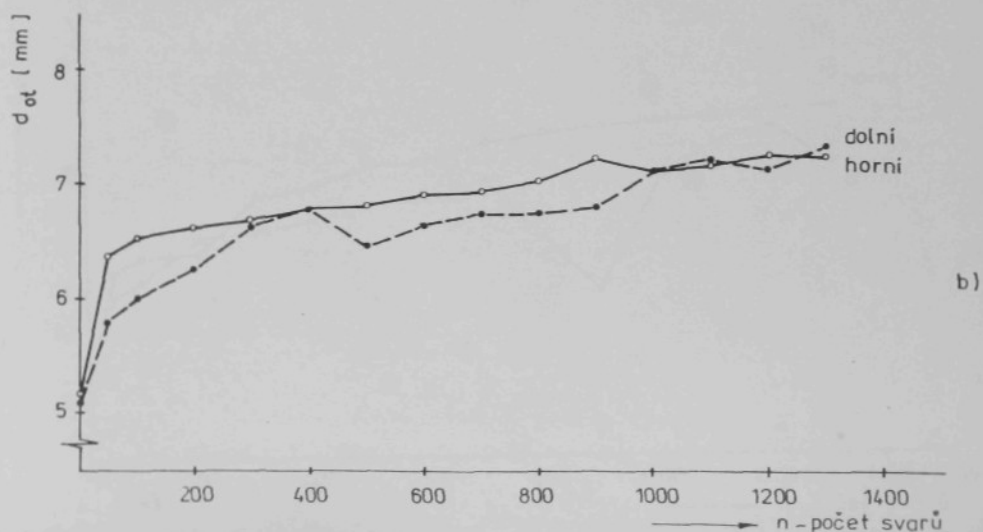
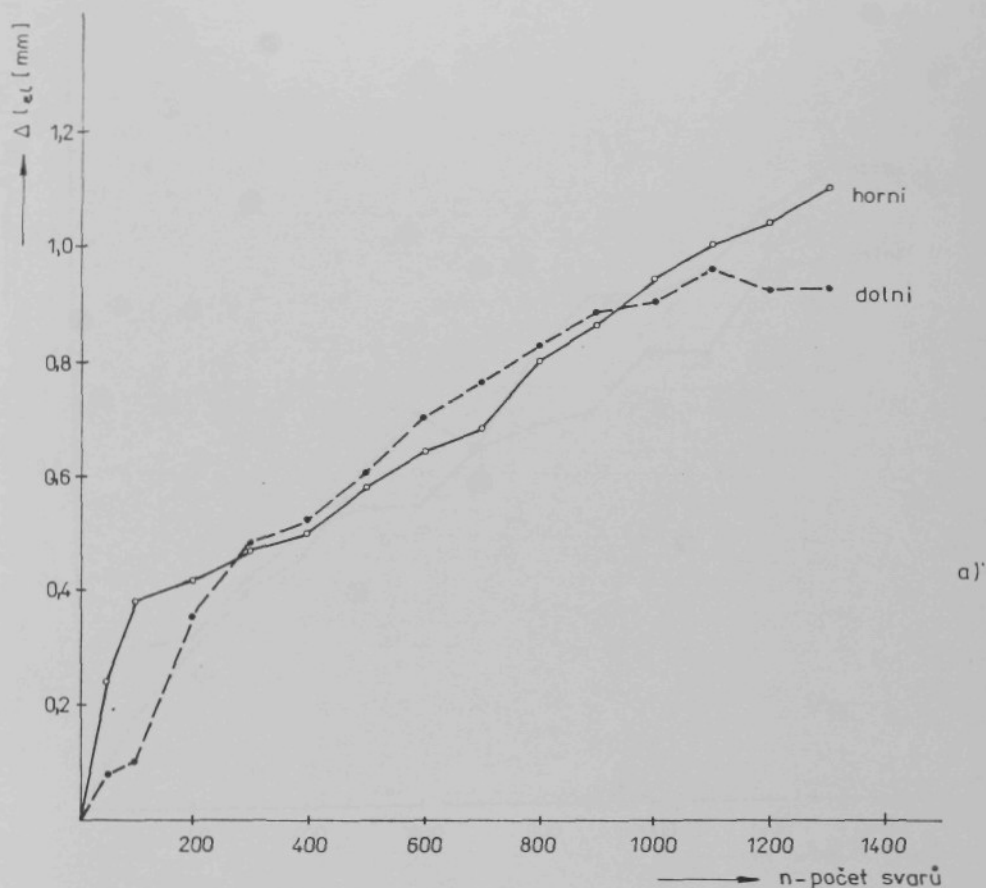
Obr. P-57. Závislost únosnosti svarů na počtu zhotovených svarů - soubor měření č.3



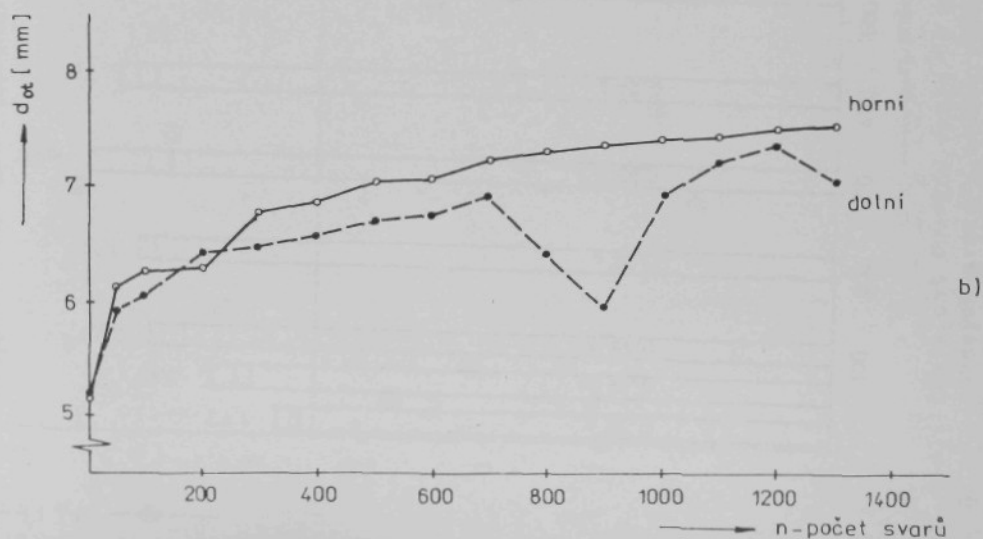
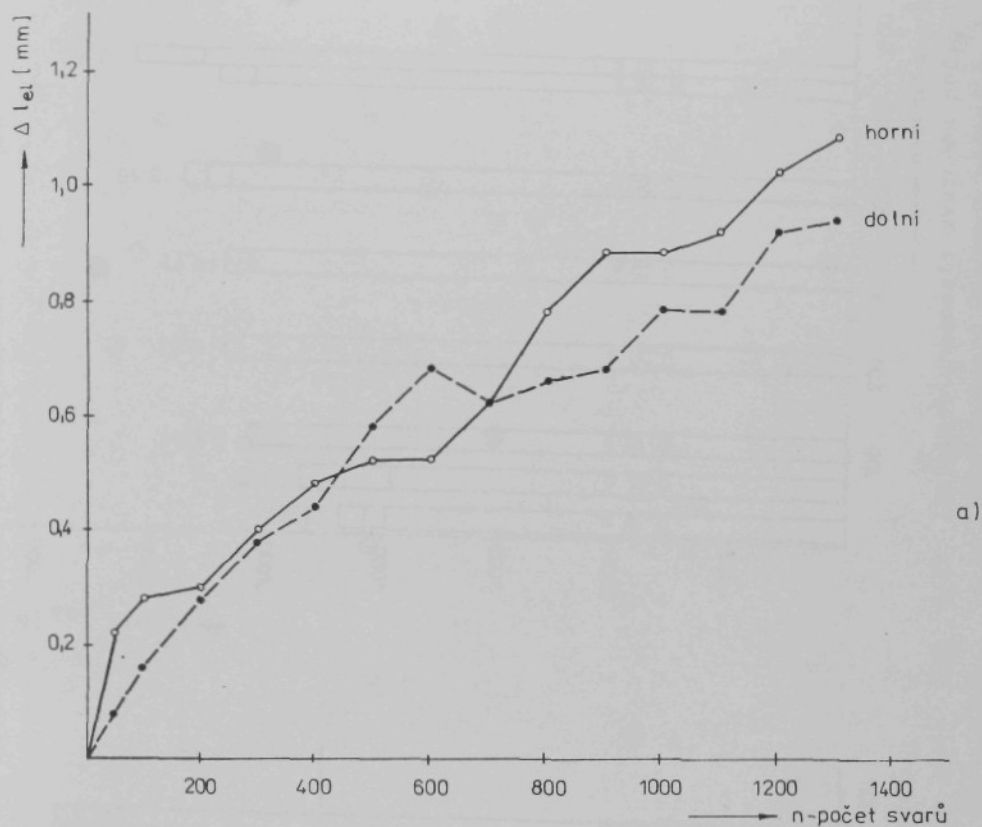
a)



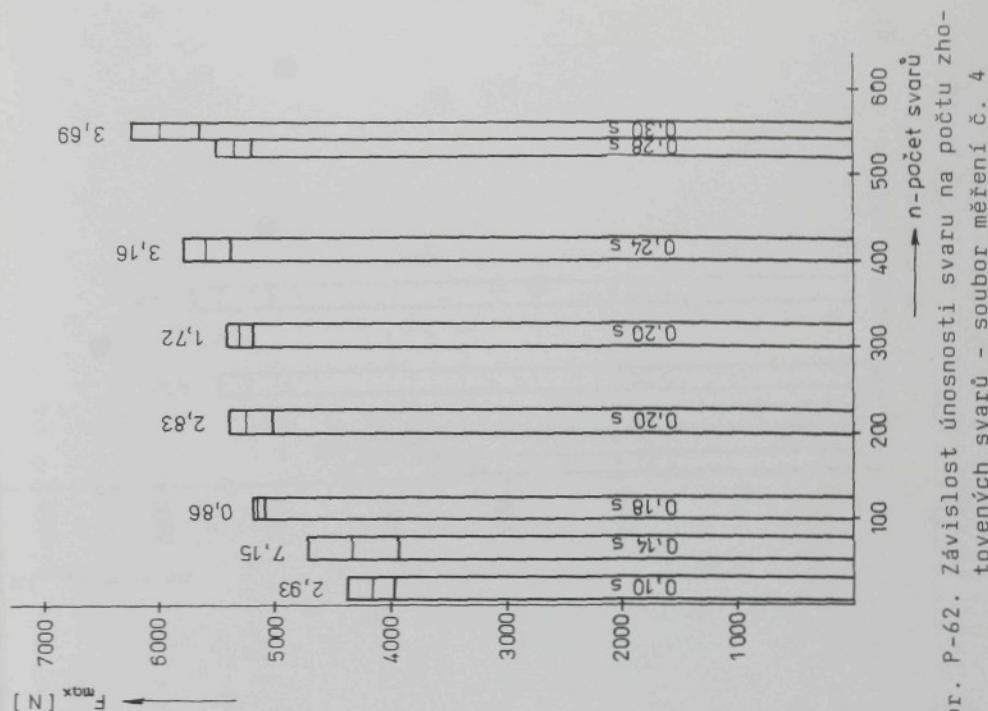
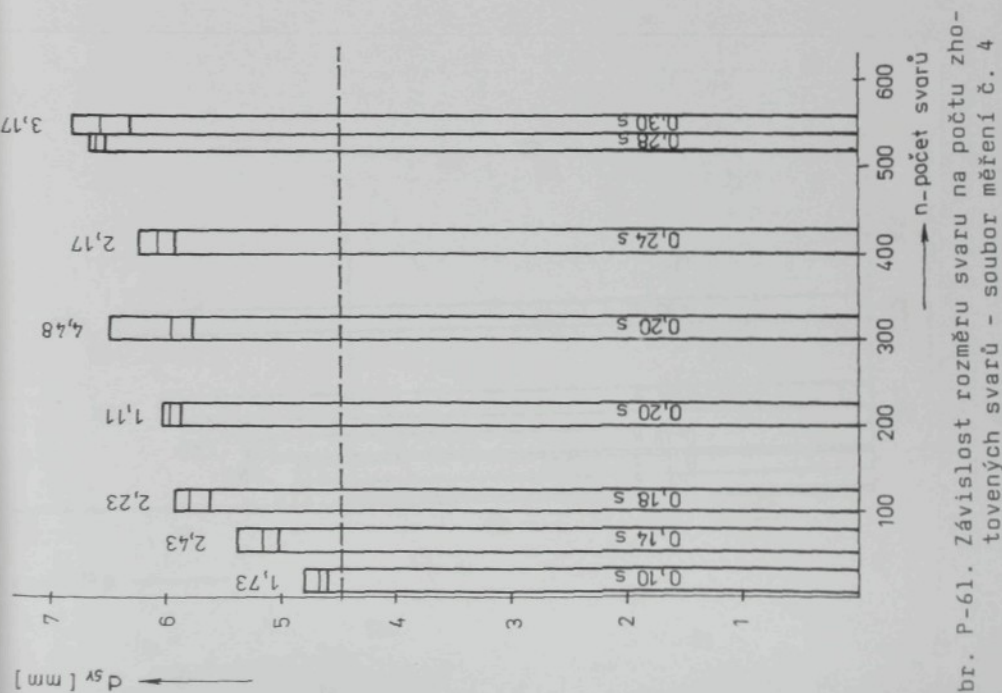
b)

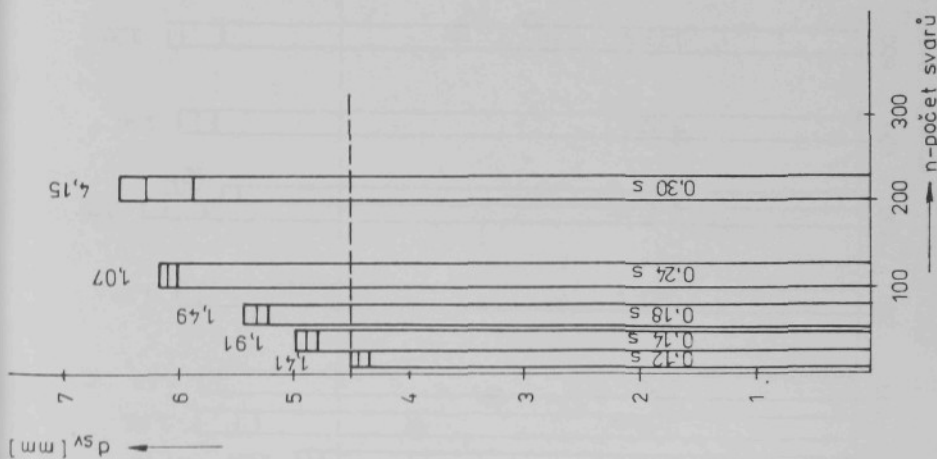


Obr. P-59. Průběh opotřebení elektrod - soubor měření č. 2

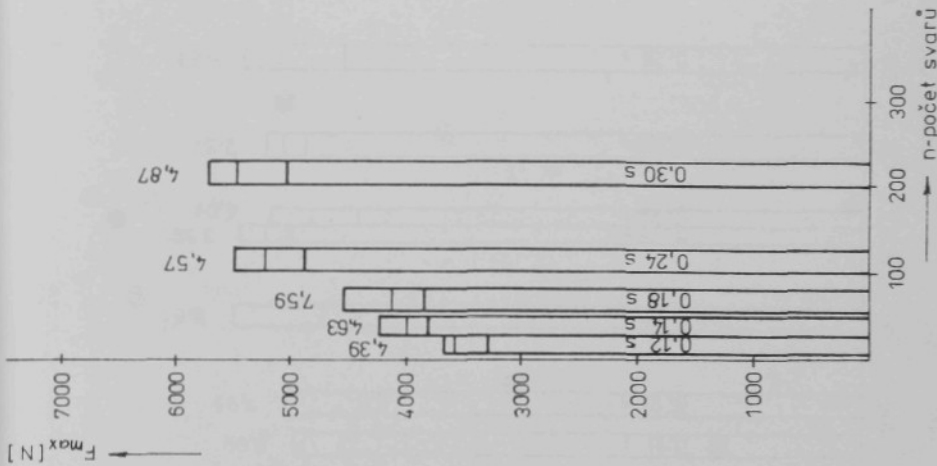


Obr. P-60. Průběh opotřebení elektrod - soubor měření č. 3

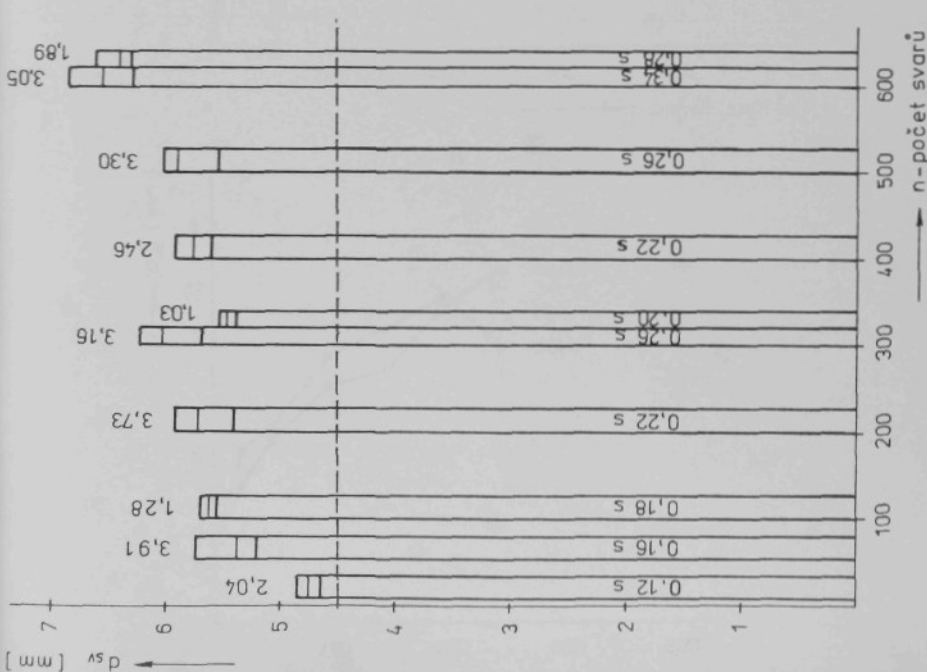




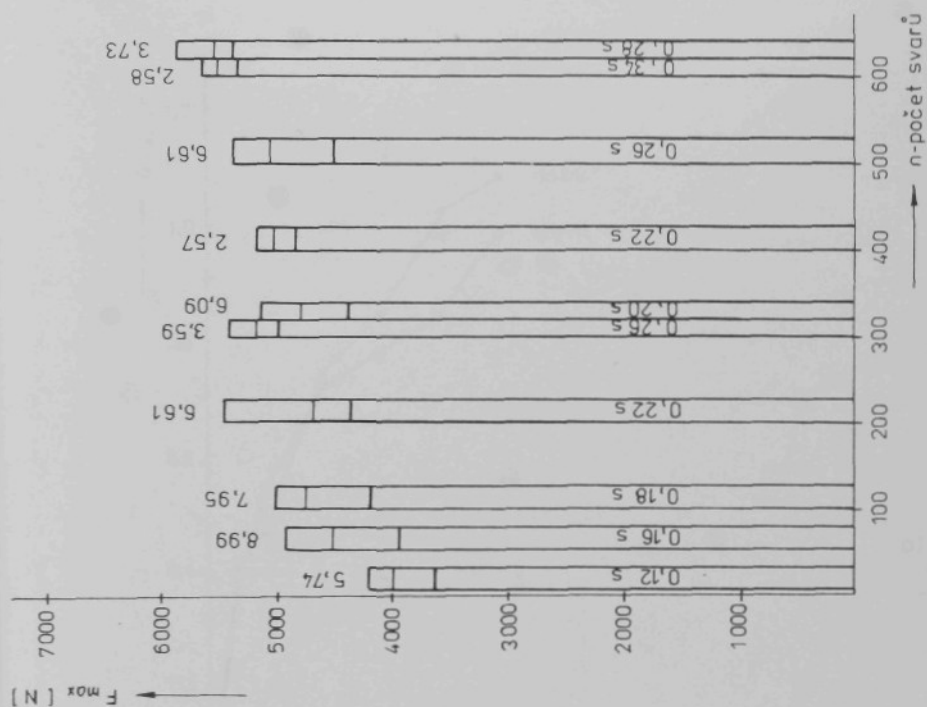
Obr. P-63. Závislost rozměru svaru na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 5



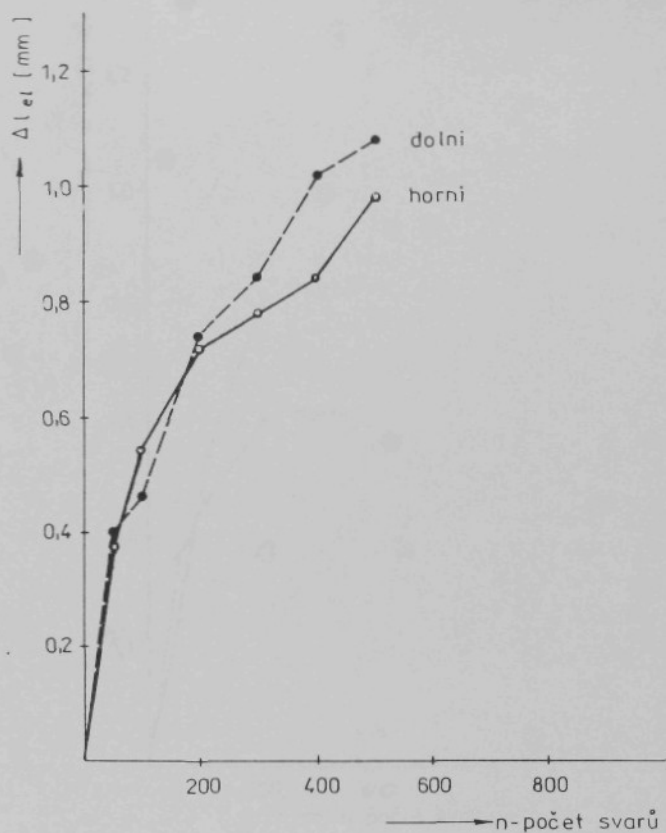
Obr. P-64. Závislost únosnosti svaru na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 5



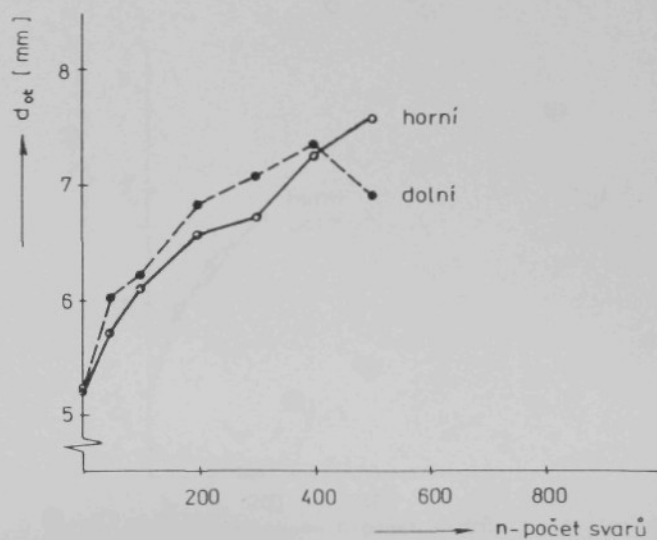
Obr. P-65. Závislost rozměru svaru na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 6



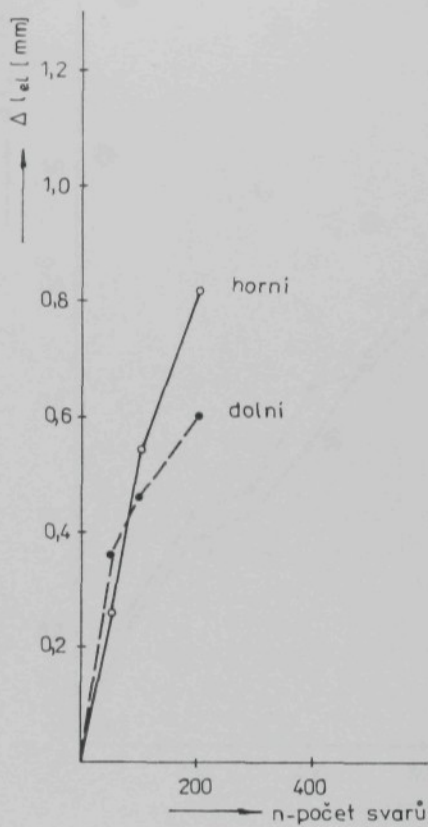
Obr. P-66. Závislost únosnosti svaru na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 6



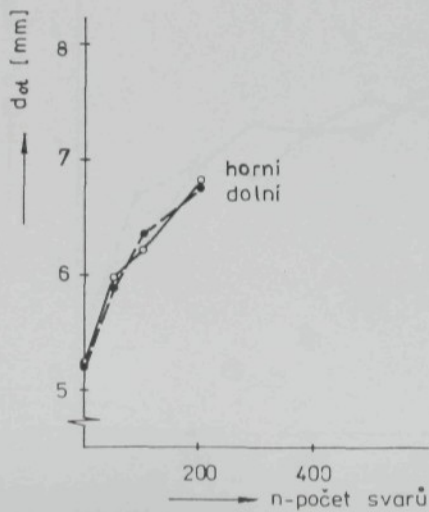
a)



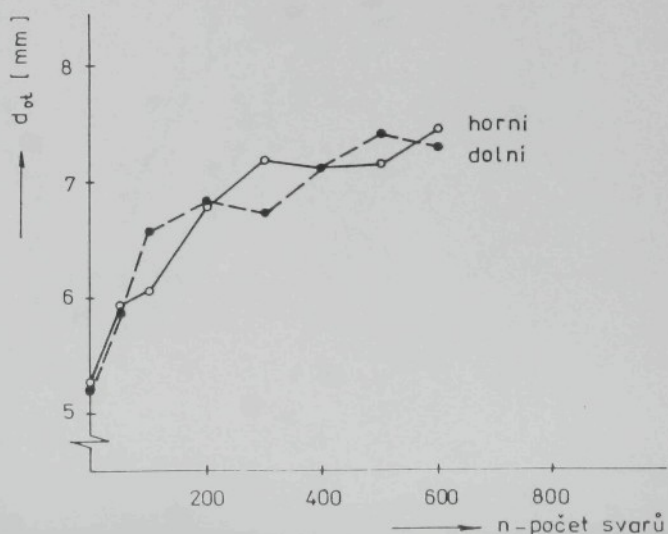
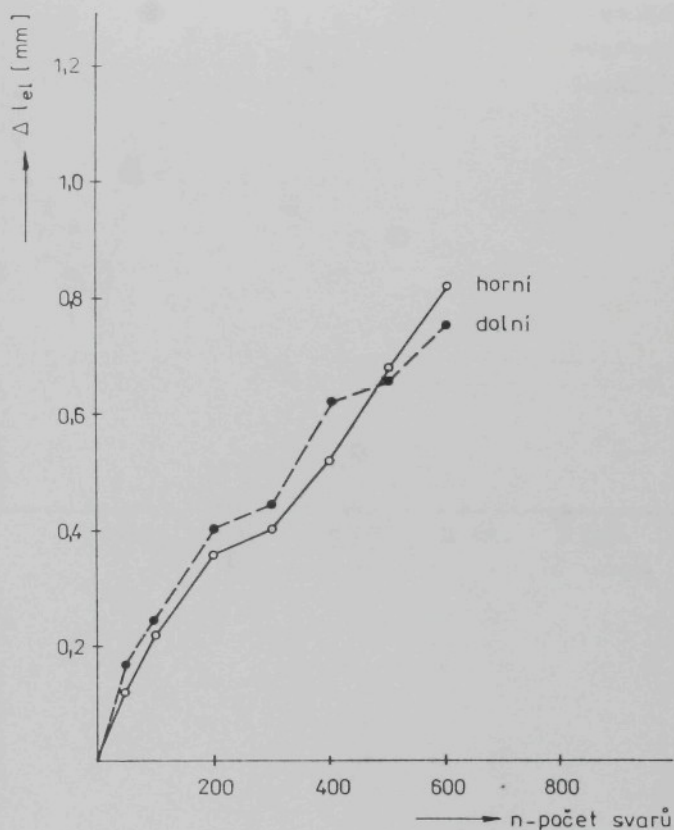
b)



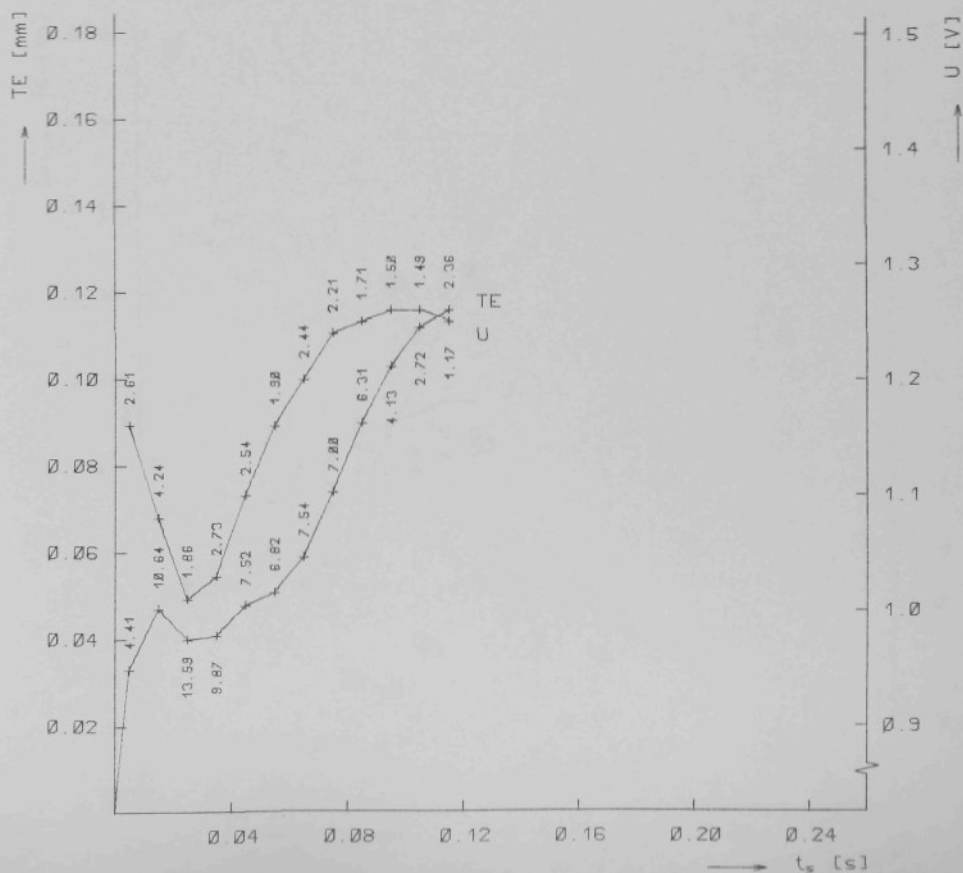
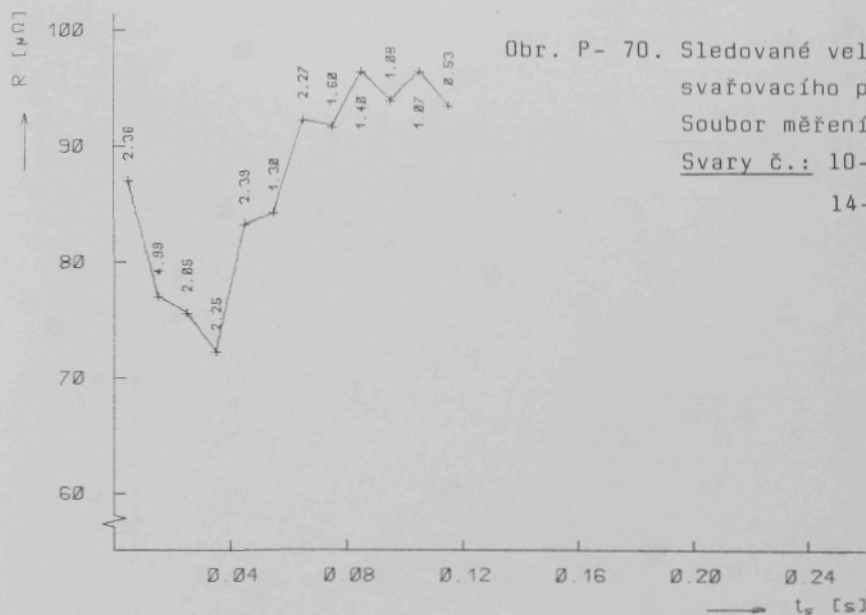
a)



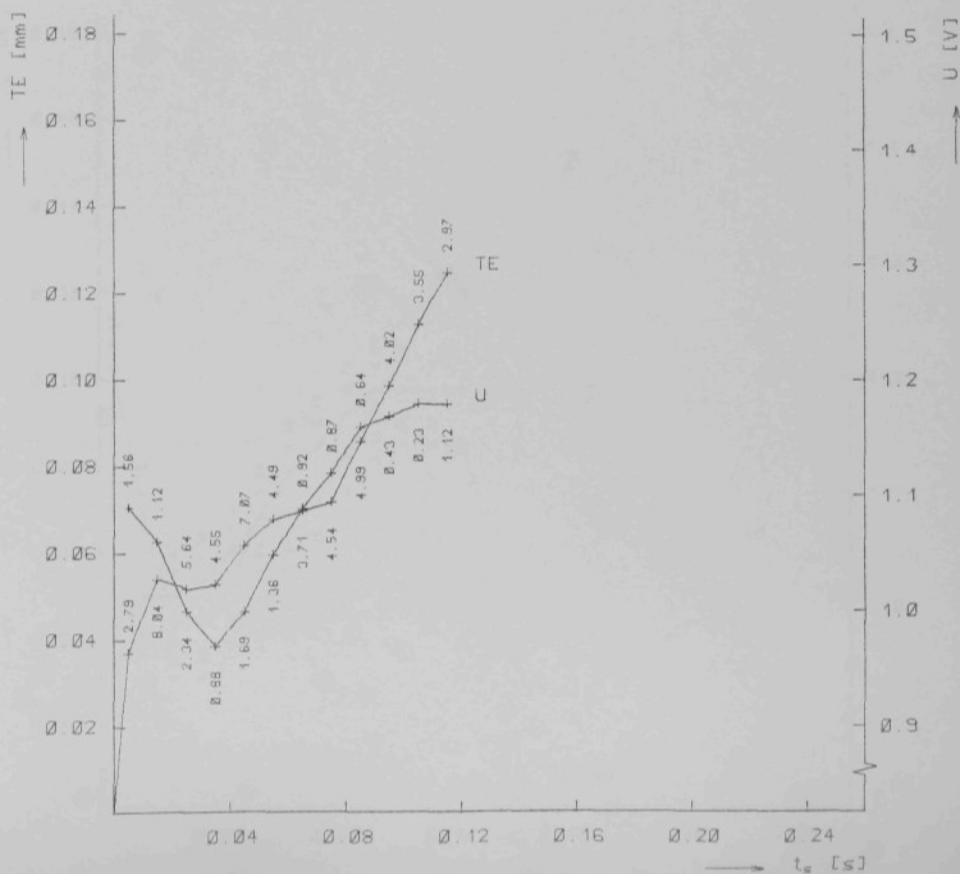
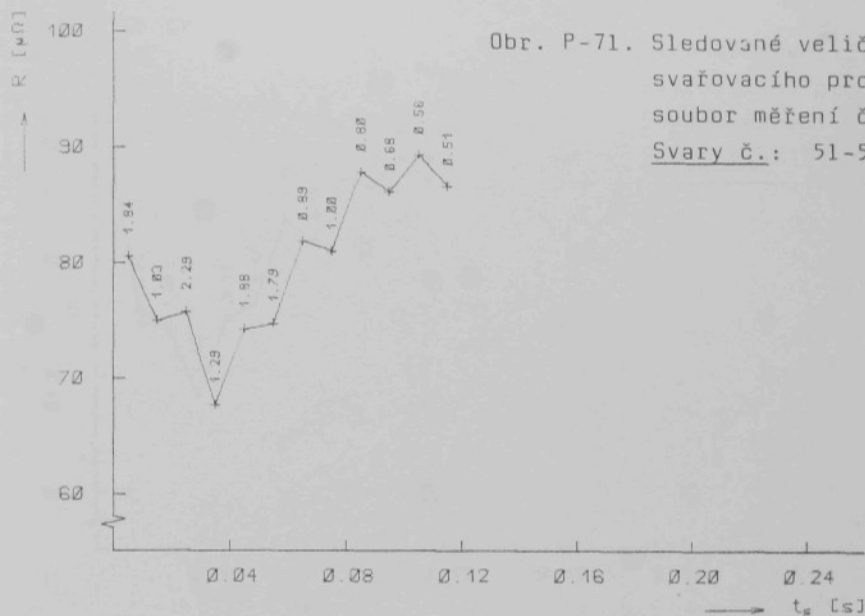
b)



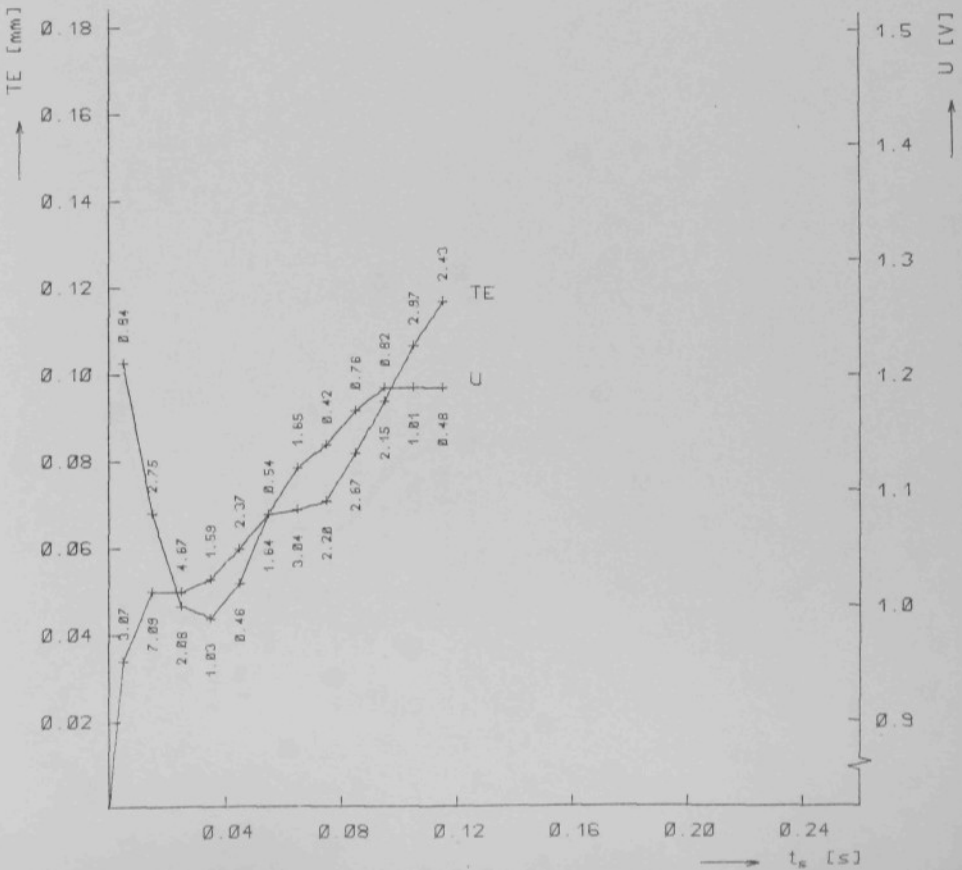
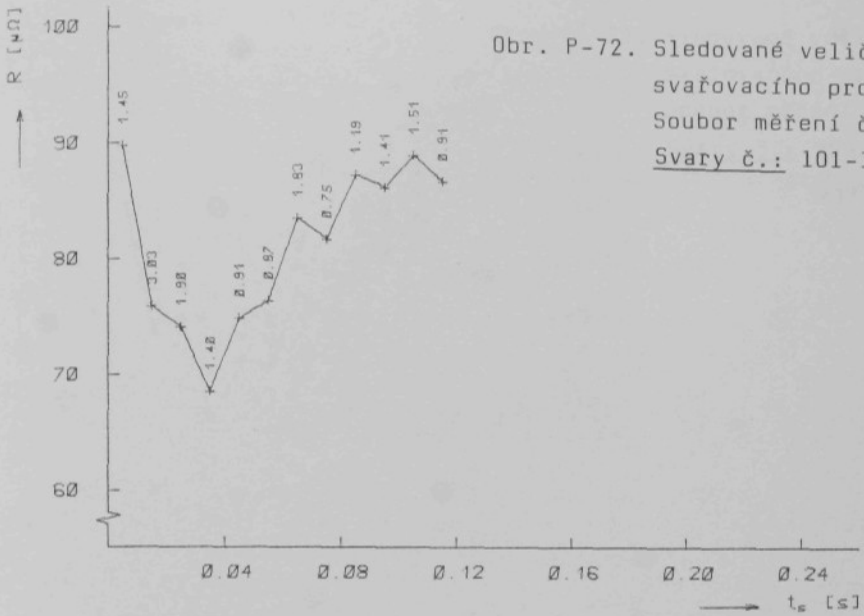
Obr. P-69. Průběh opotřebení elektrod - soubor měření č. 6



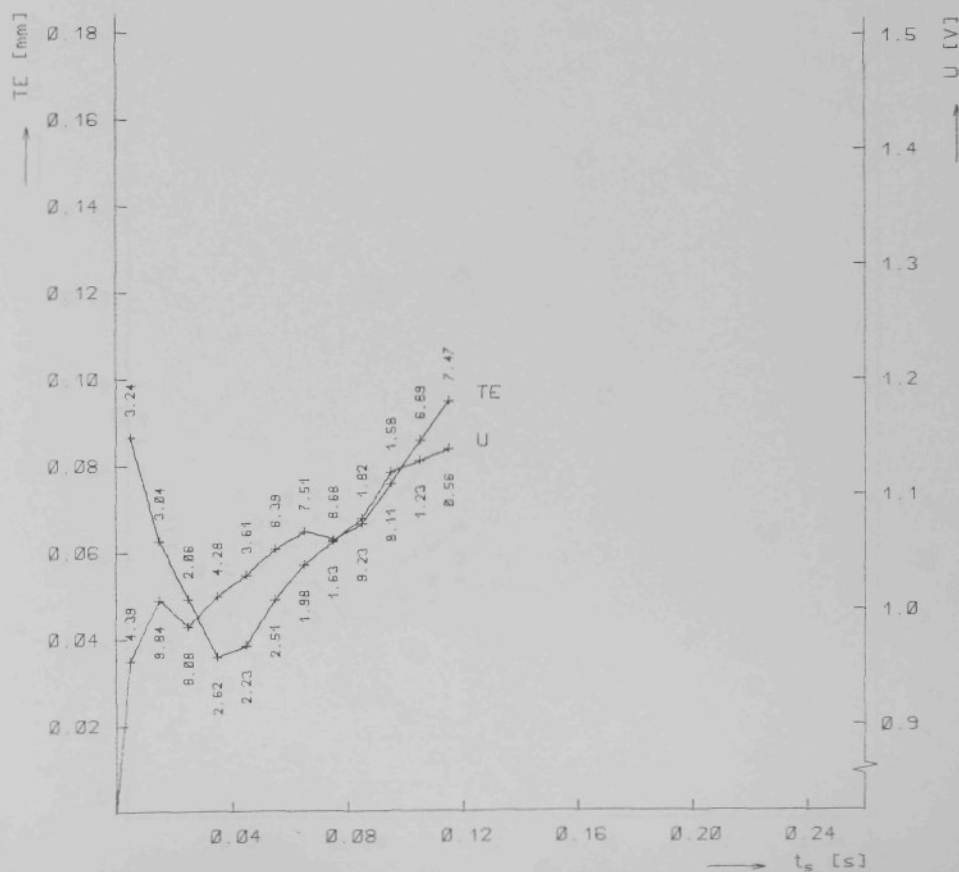
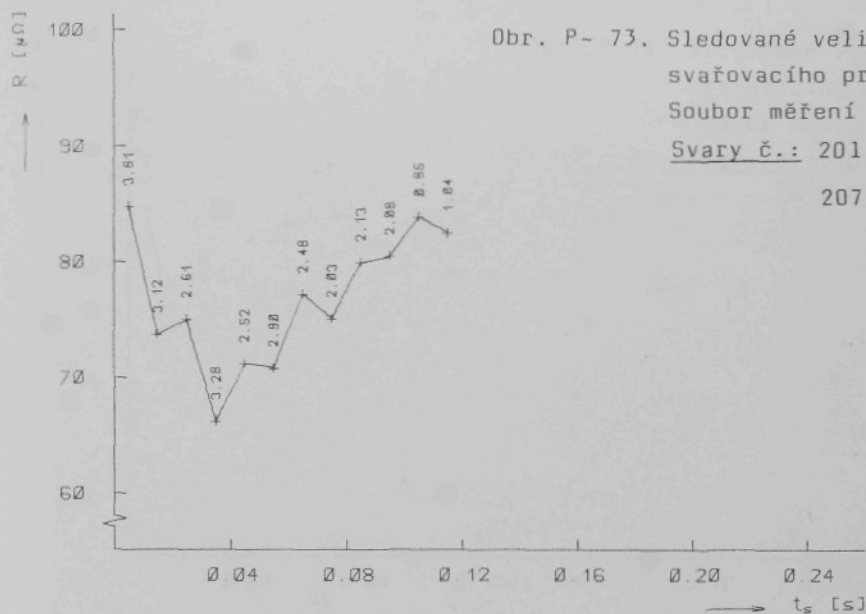
Obr. P-71. Sledované veličiny
svařovacího procesu -
soubor měření č. 2
Svary č.: 51-56



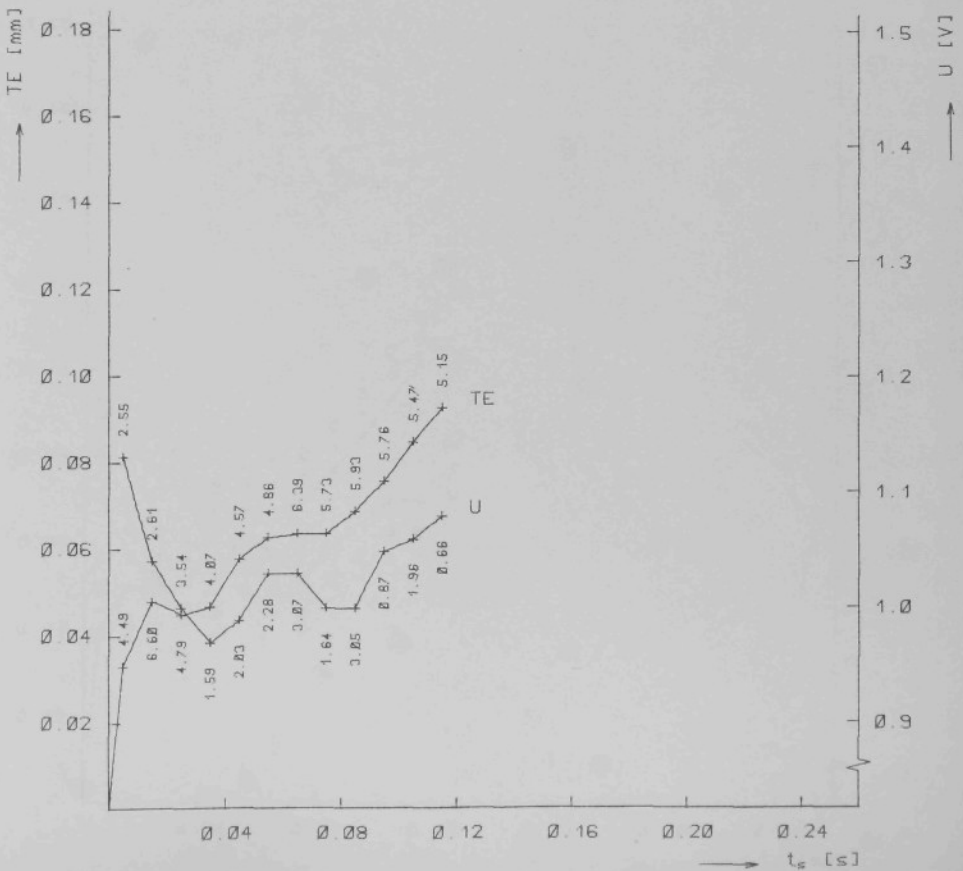
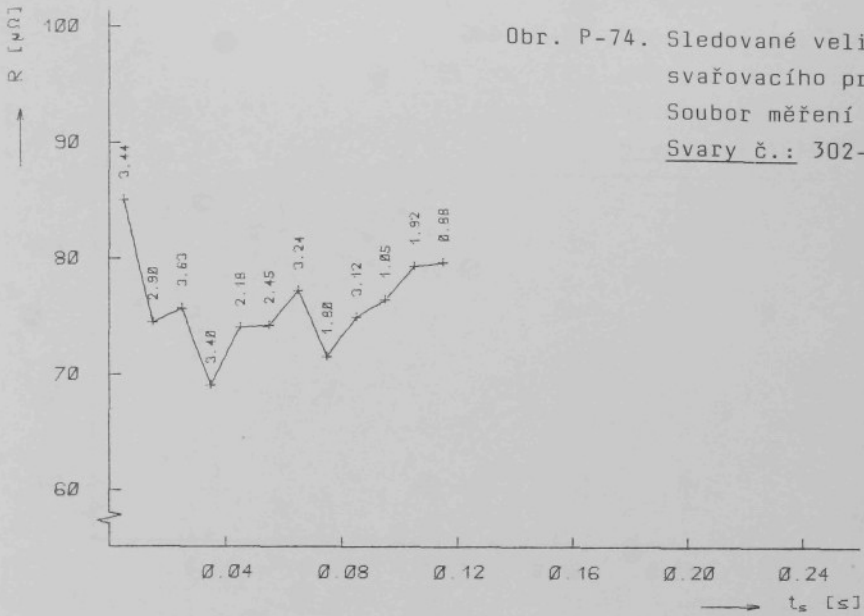
Obr. P-72. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 2
Svary č.: 101-106



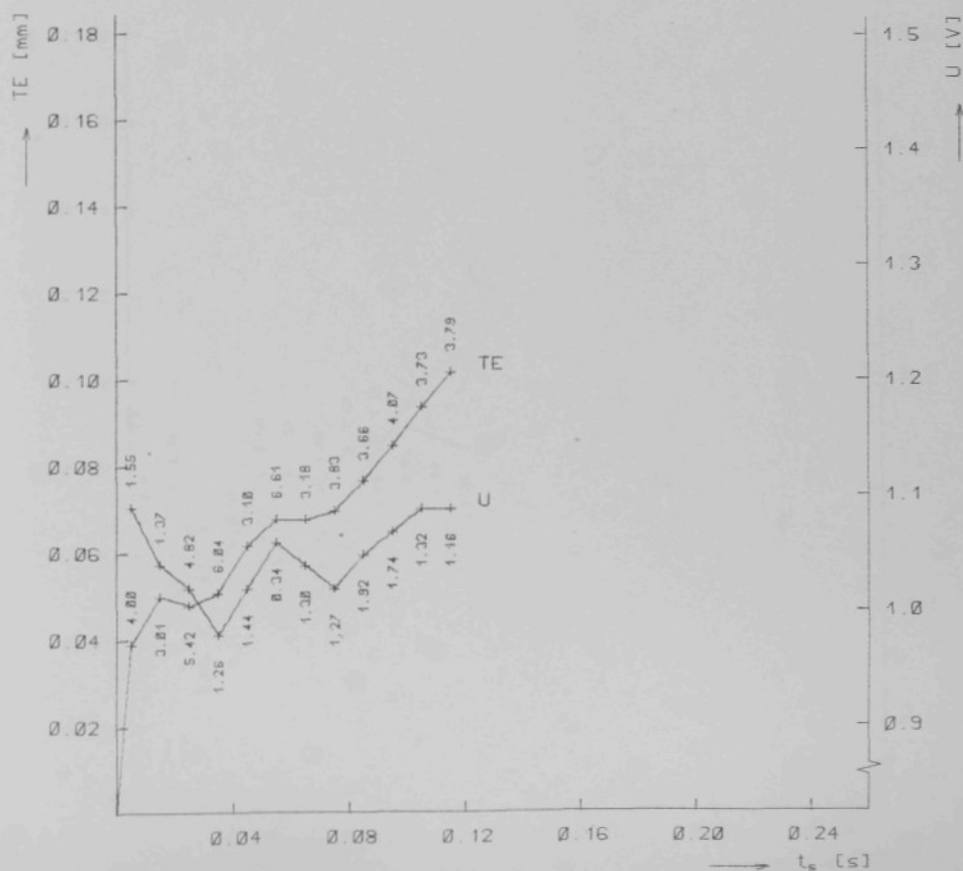
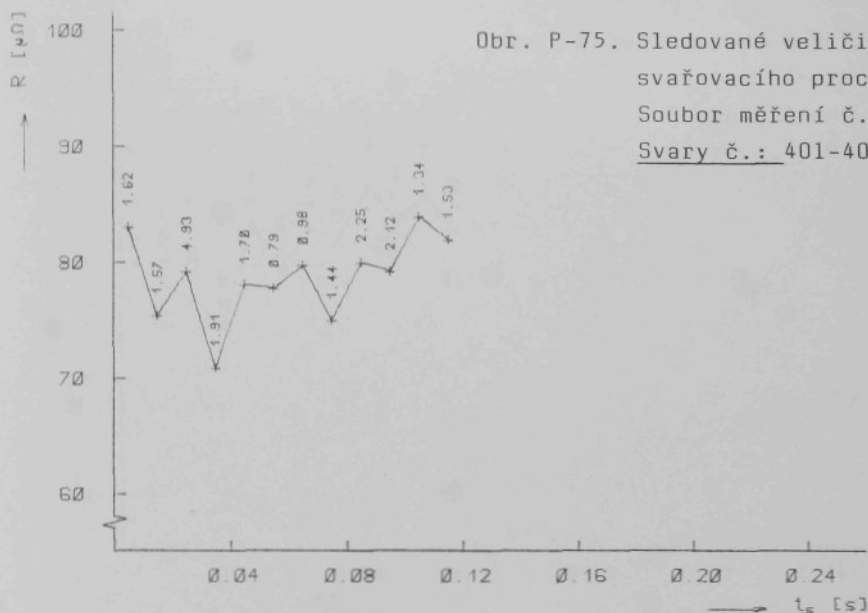
Obr. P- 73. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 2
Svary č.: 201, 205 -
207



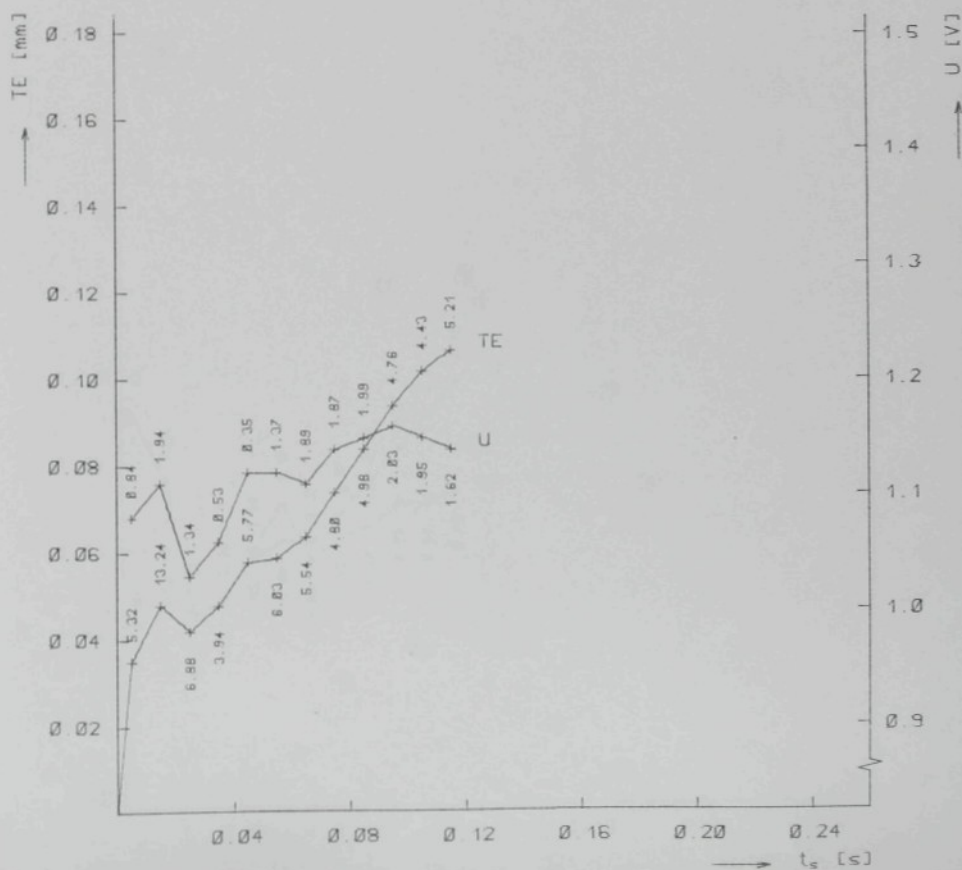
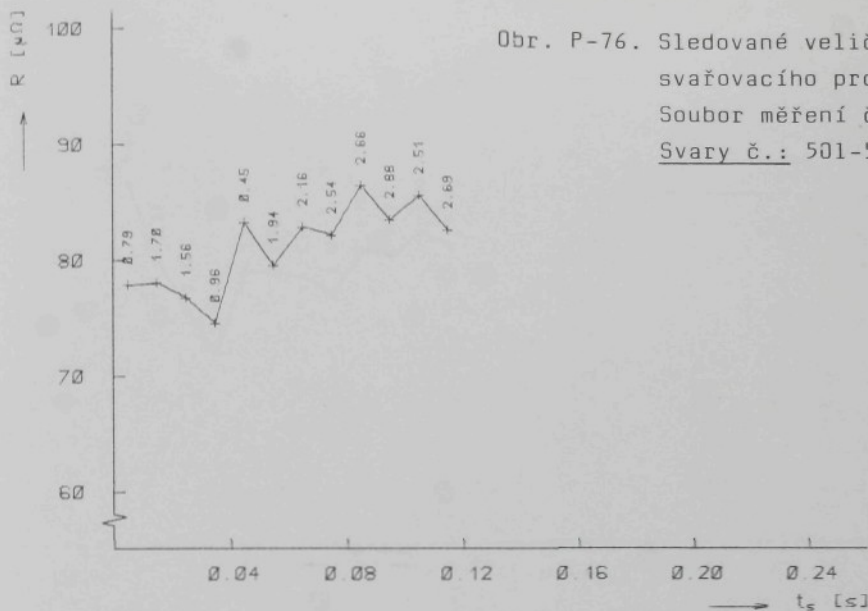
Obr. P-74. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 2
Svary č.: 302-307



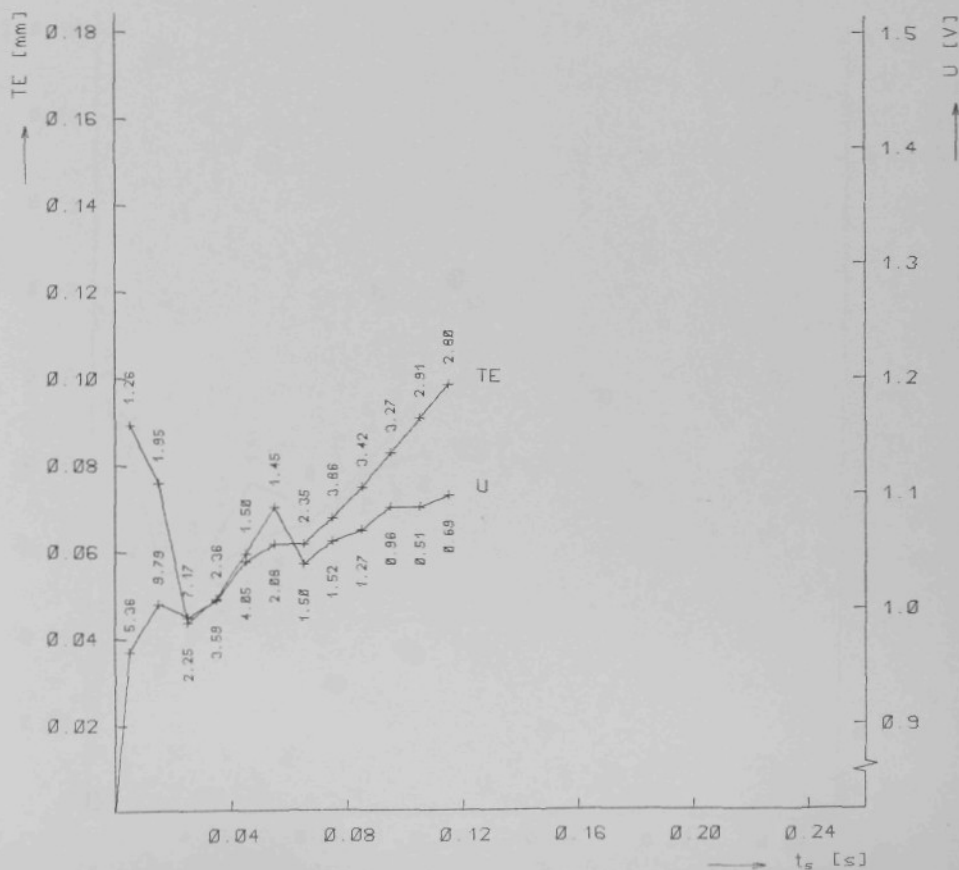
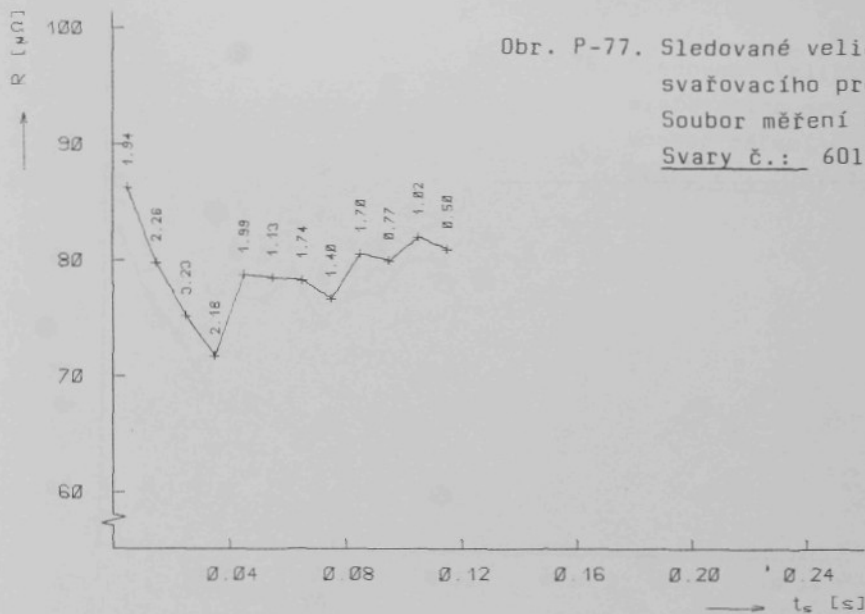
Obr. P-75. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 2
Svary č.: 401-406



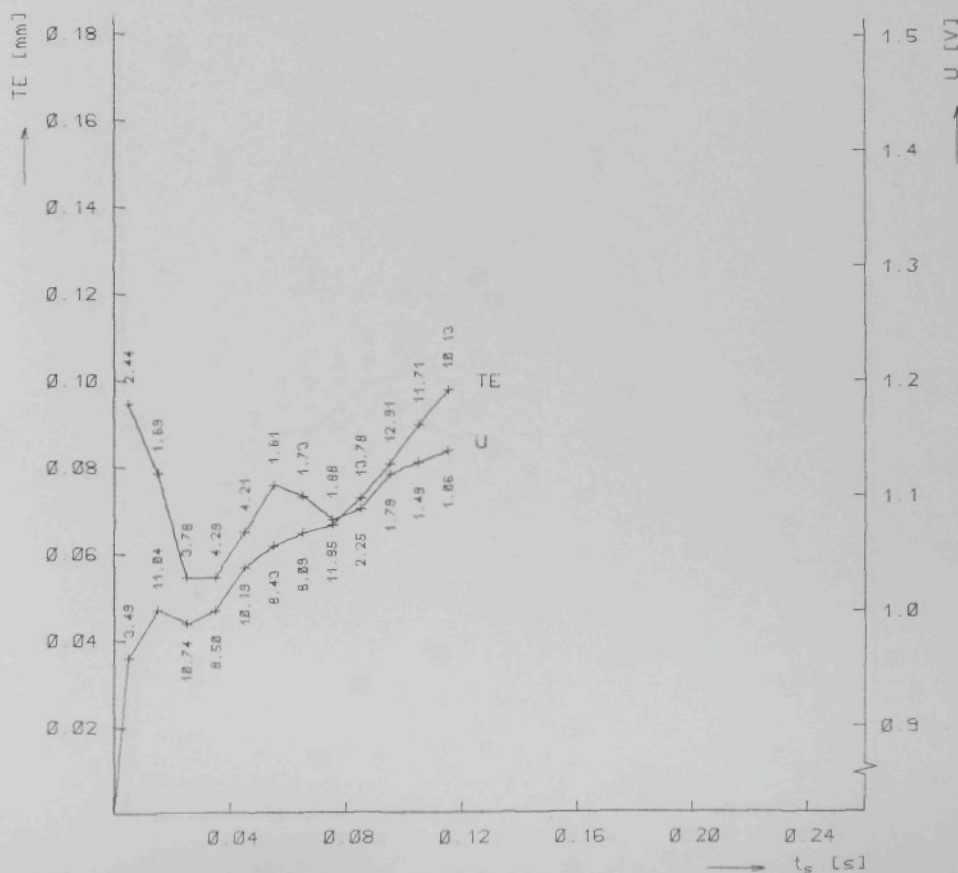
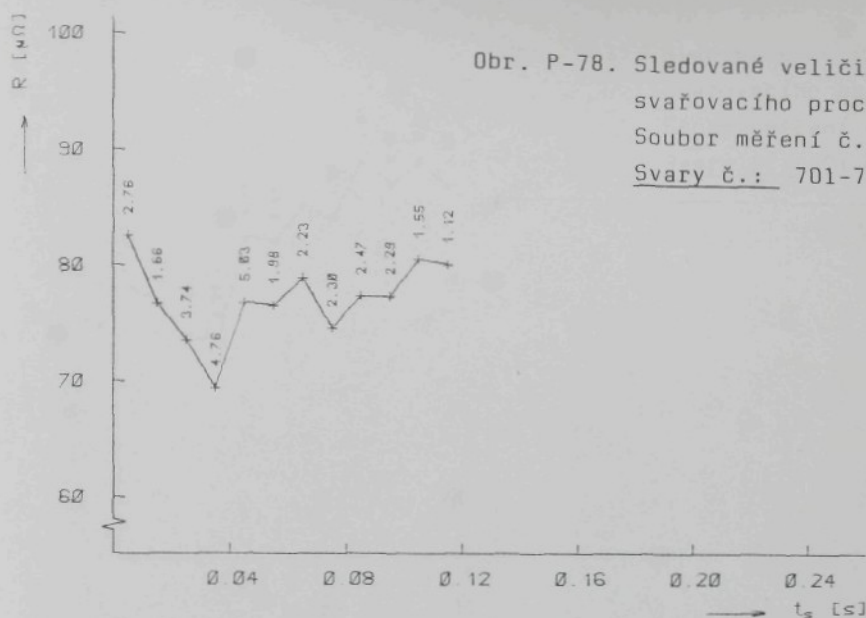
Obr. P-76. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 2
Svary č.: 501-506



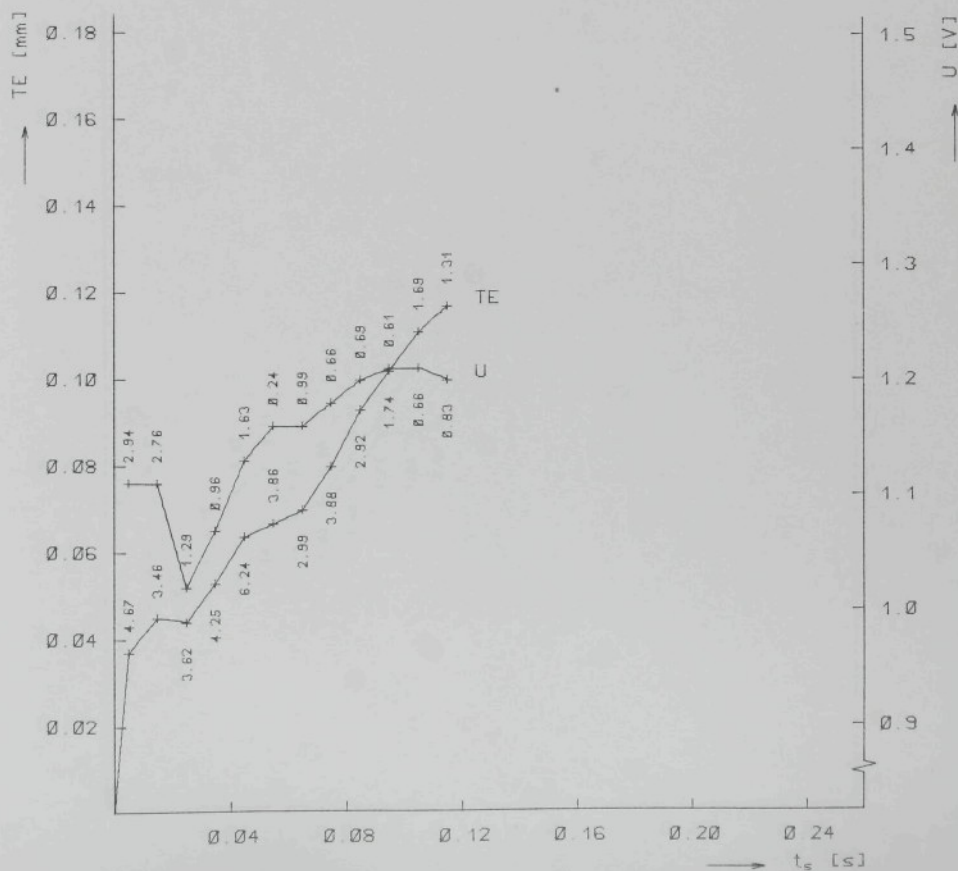
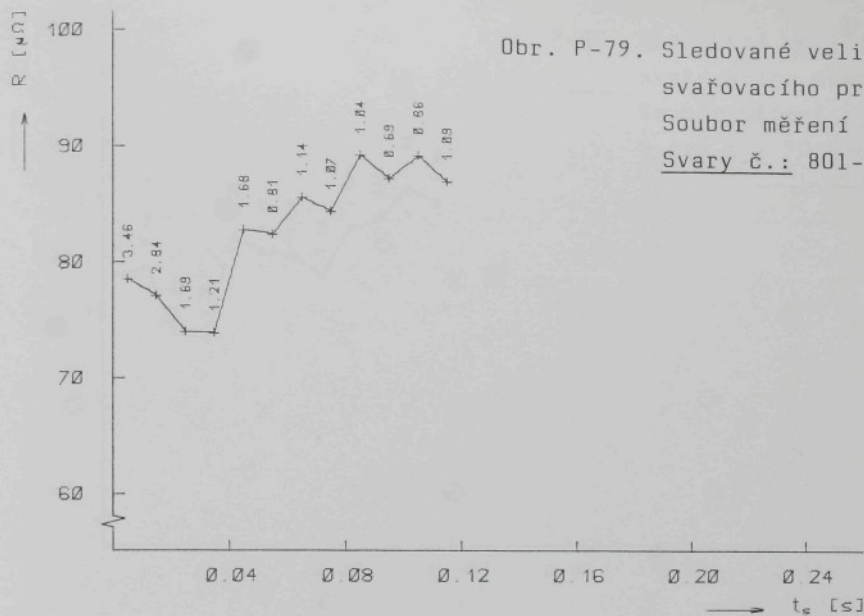
Obr. P-77. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 2
Svary č.: 601-607



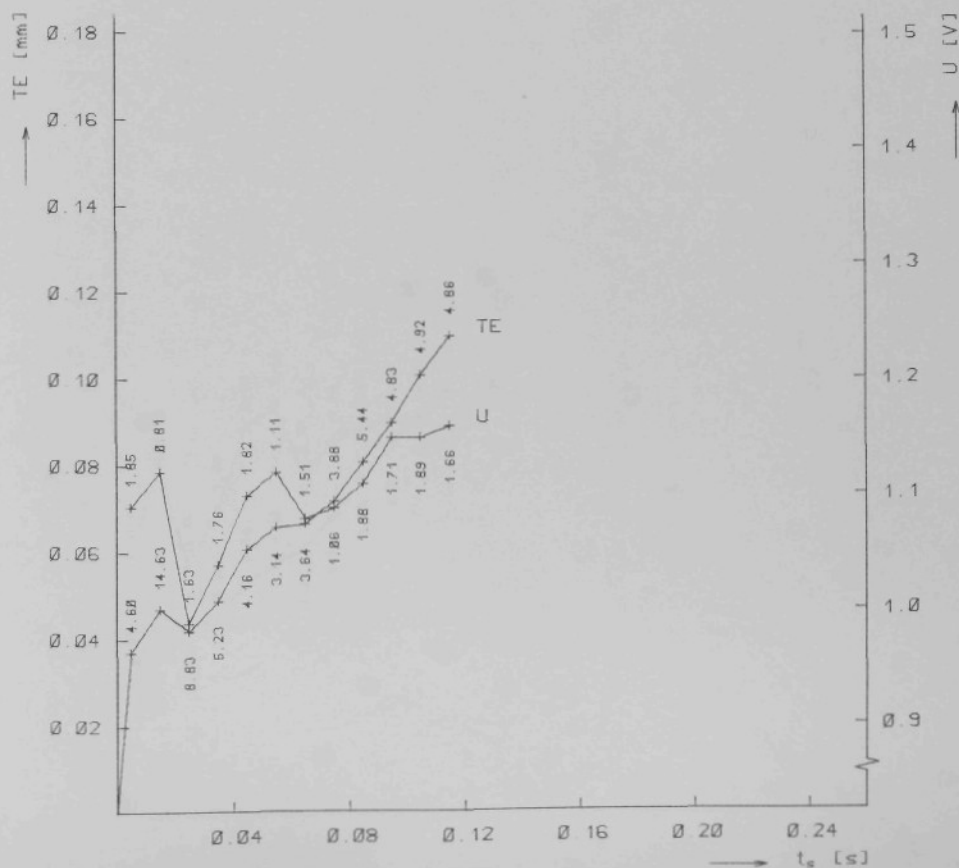
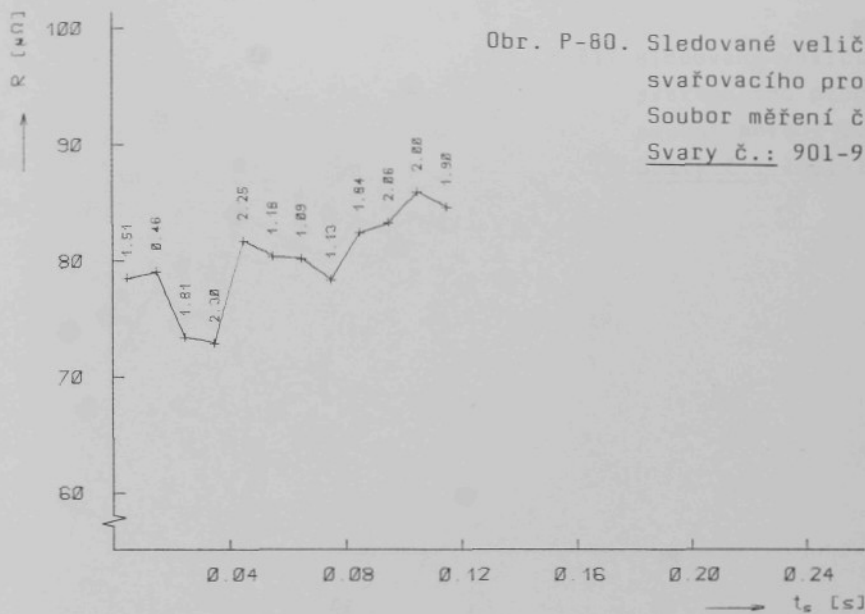
Obr. P-78. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 2
Svary č.: 701-705, 707



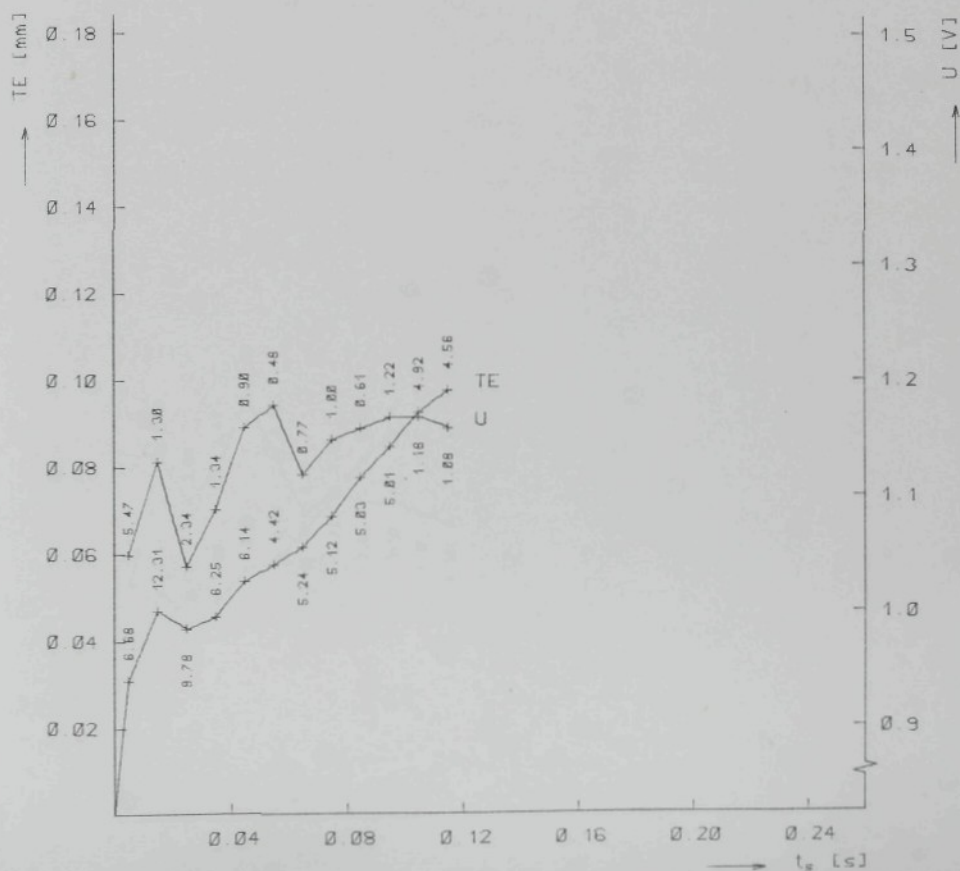
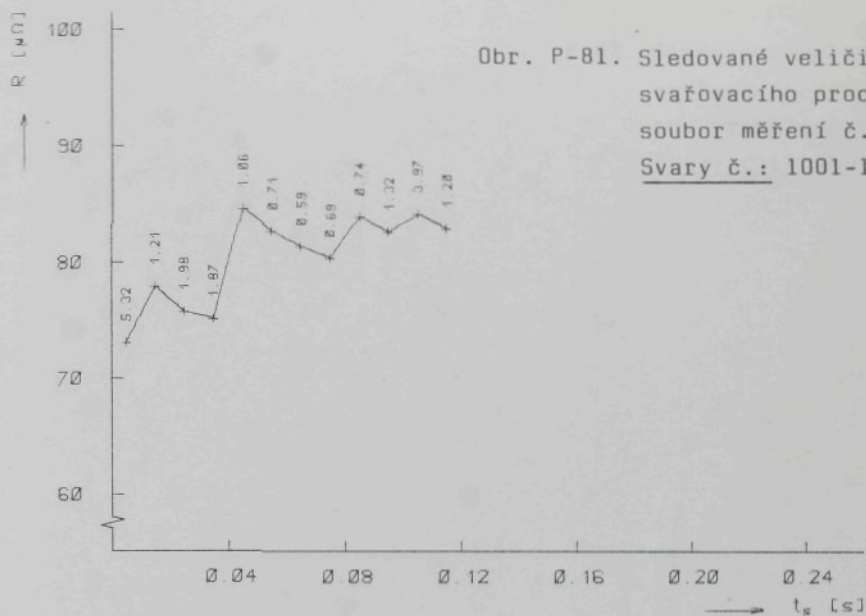
Obr. P-79. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 2
Svary č.: 801-806



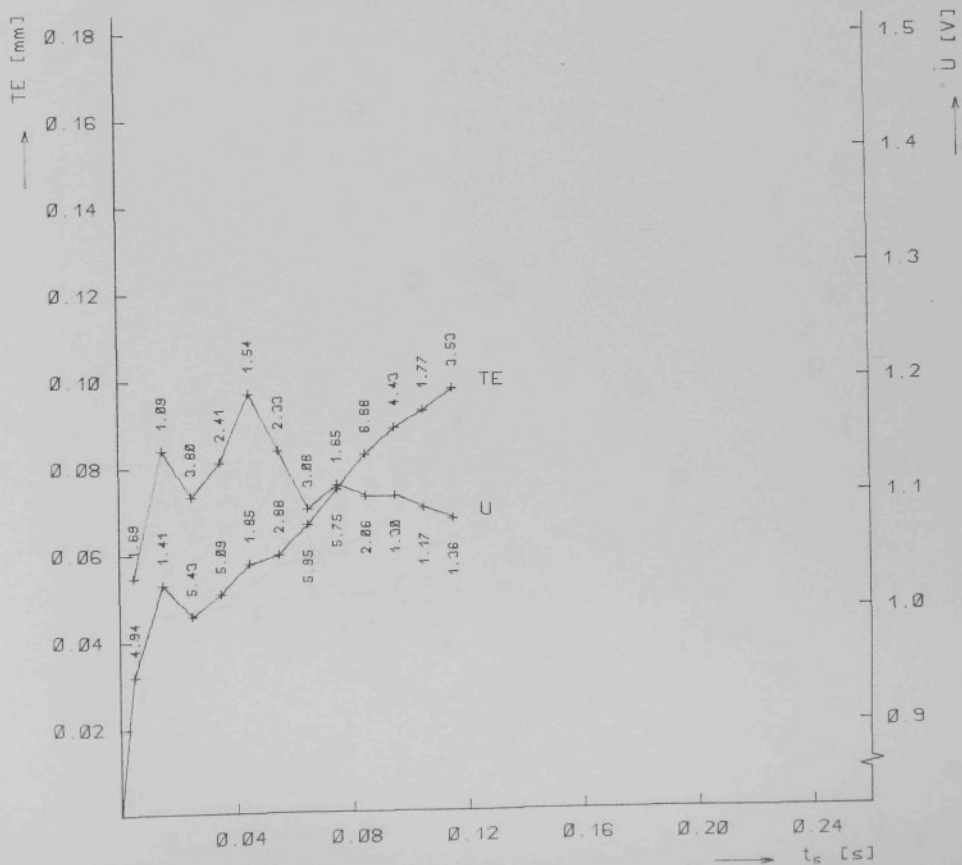
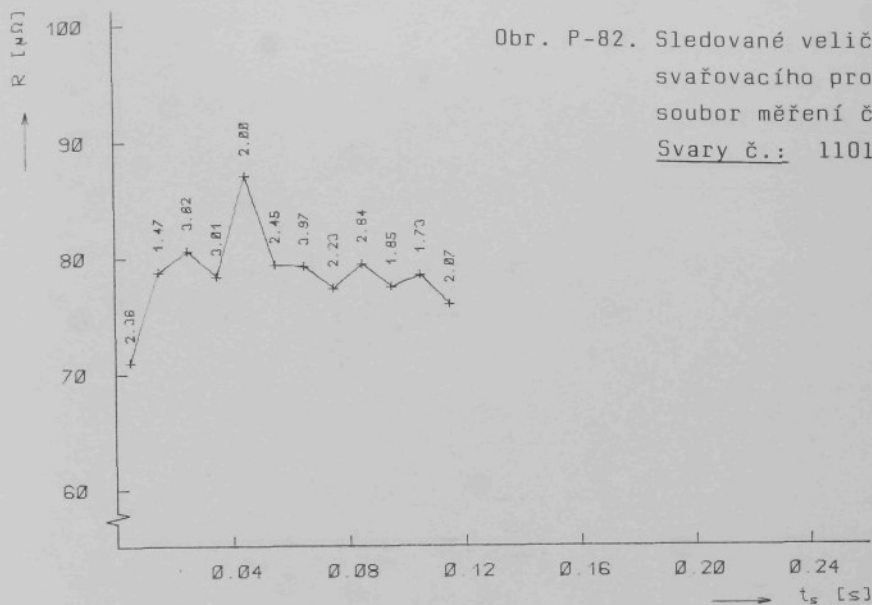
Obr. P-60. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 2
Svary č.: 901-906



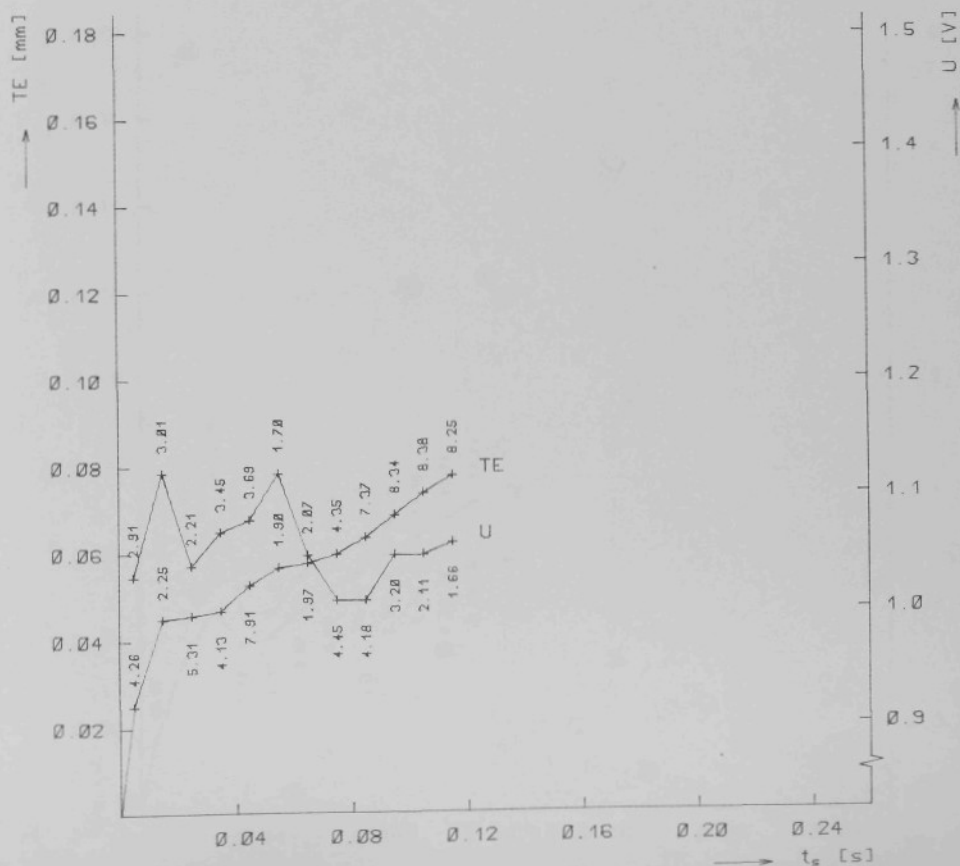
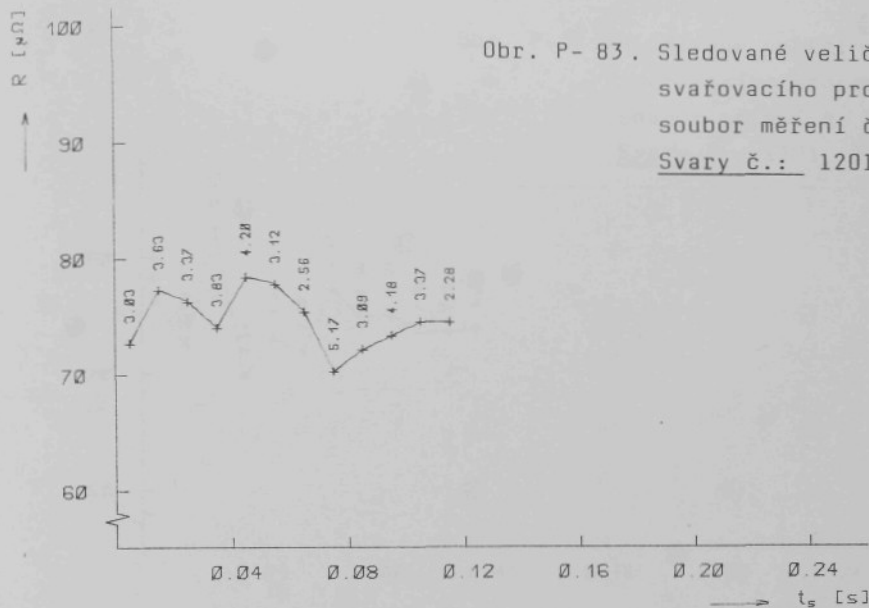
Obr. P-81. Sledované veličiny
svařovacího procesu
soubor měření č. 2
Svary č.: 1001-1006



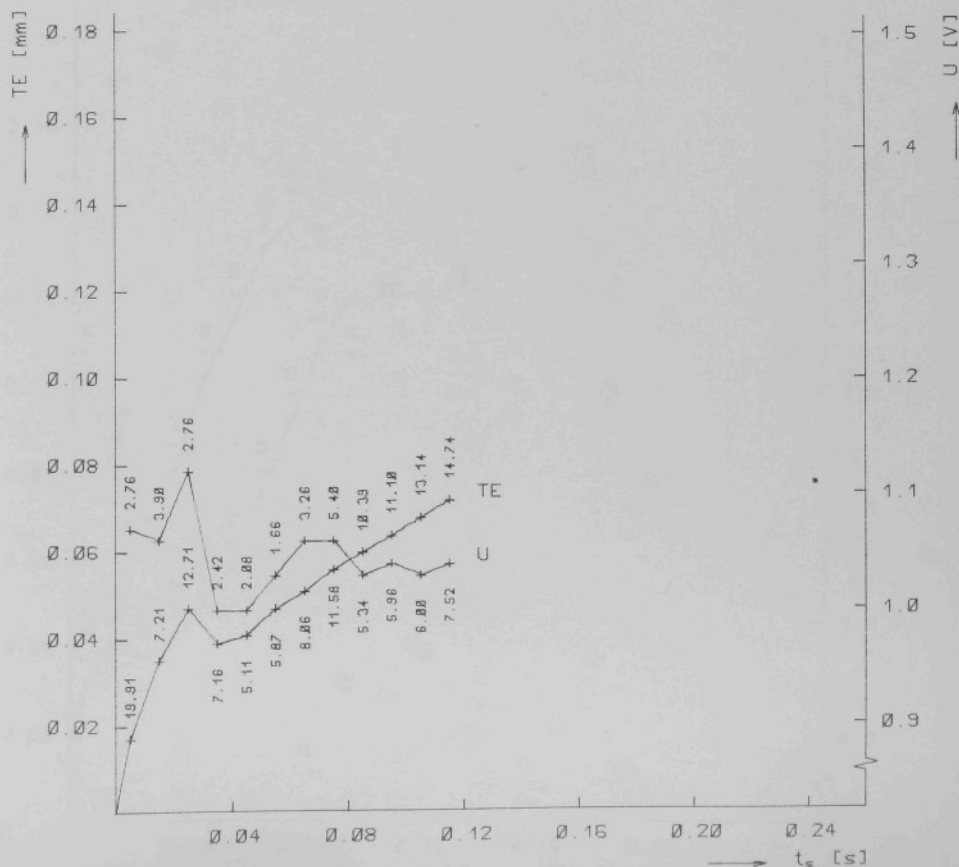
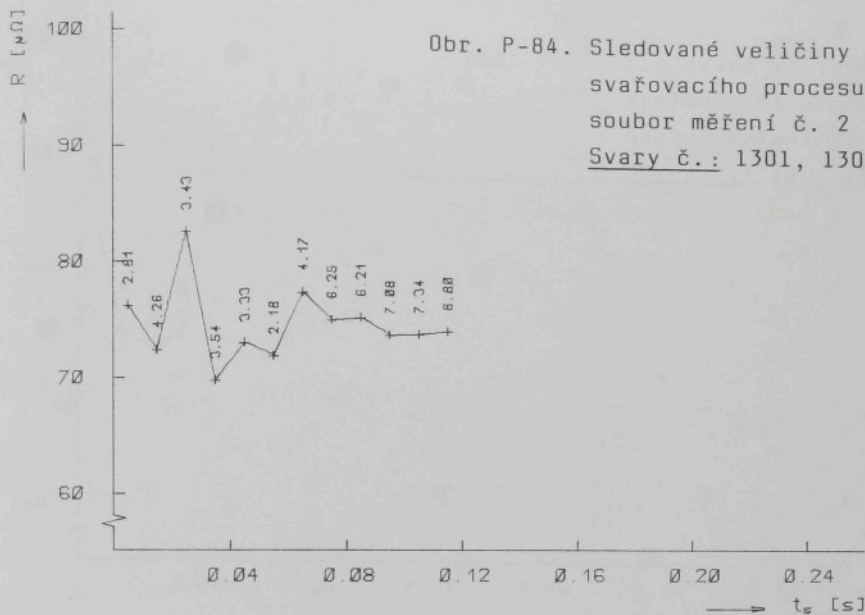
Obr. P-82. Sledované veličiny
svařovacího procesu -
soubor měření č. 2
Svary č.: 1101-1106



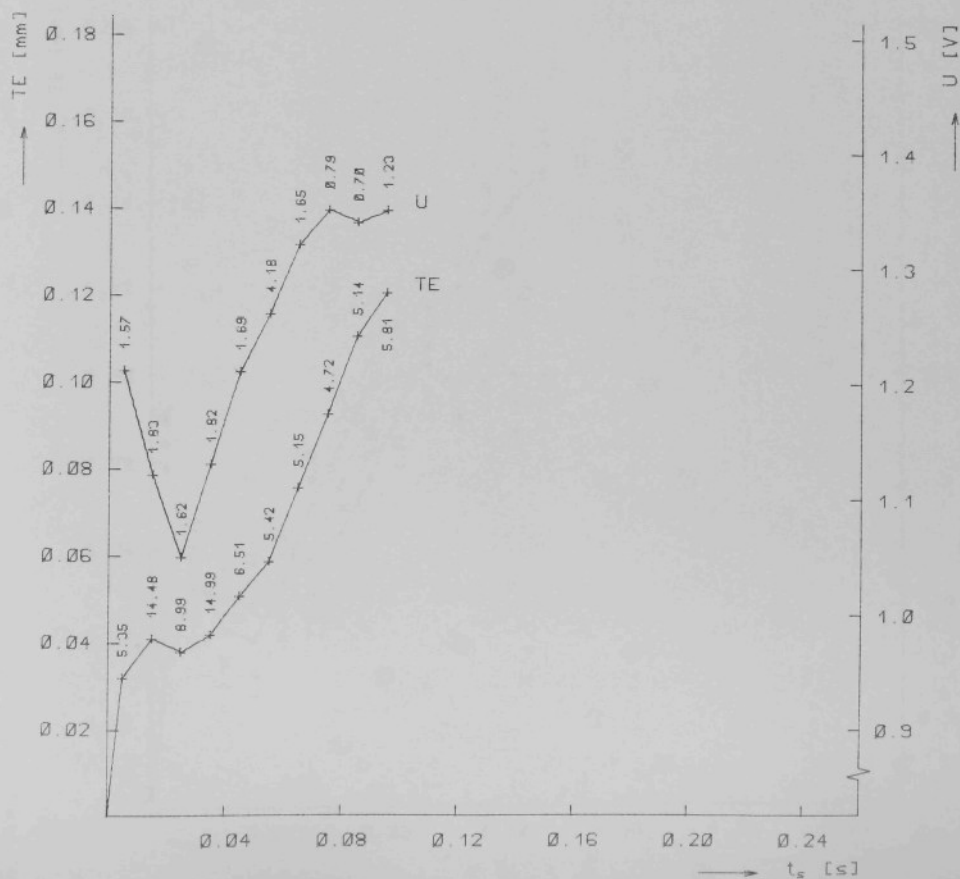
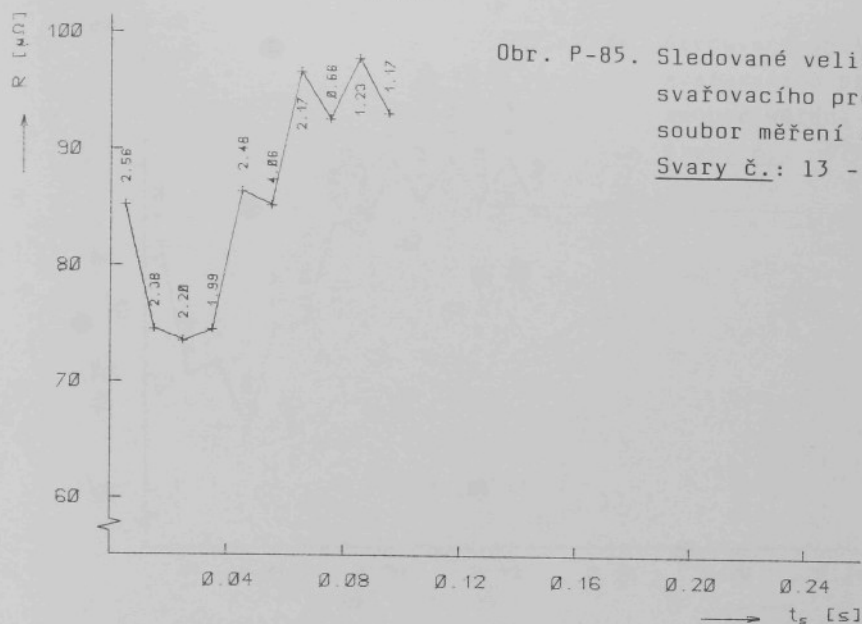
Obr. P- 83. Sledované veličiny
svařovacího procesu
soubor měření č. 2
Svary č.: 1201-1206



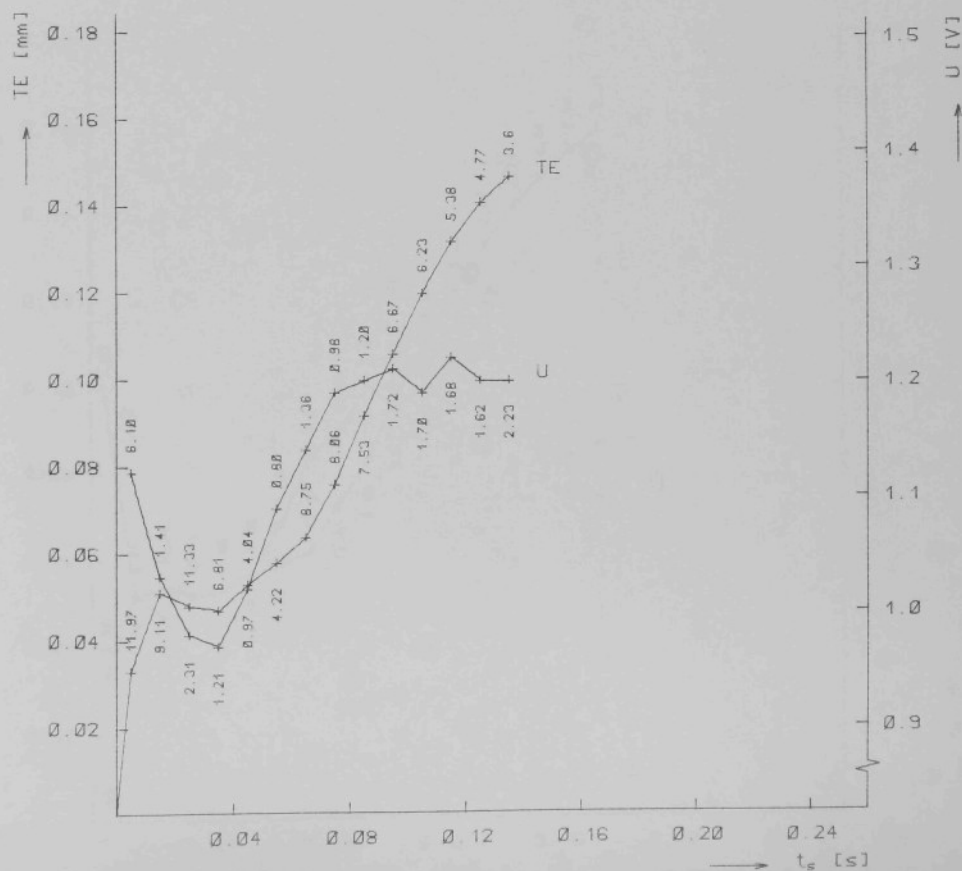
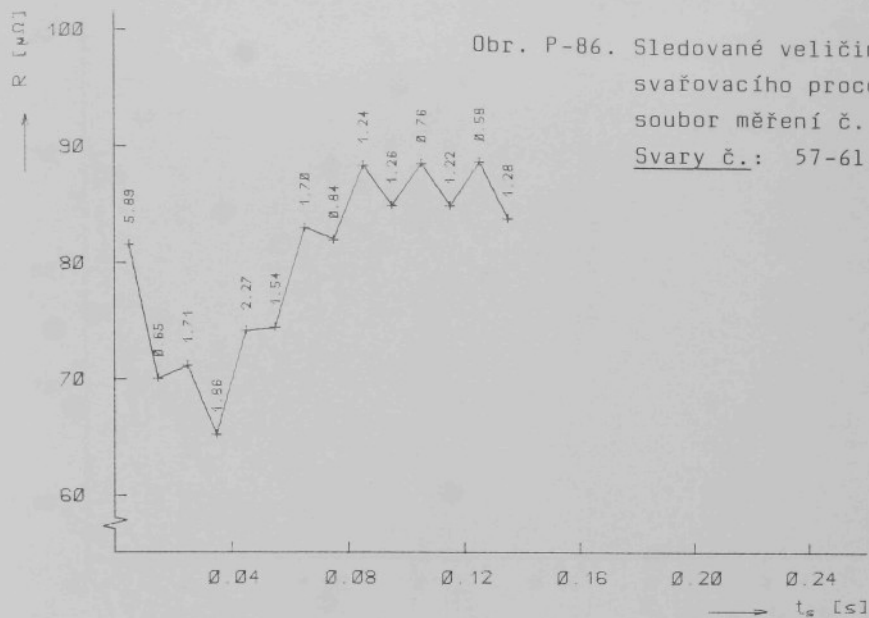
Obr. P-84. Sledované veličiny
svařovacího procesu -
soubor měření č. 2
Svary č.: 1301, 1303-1307



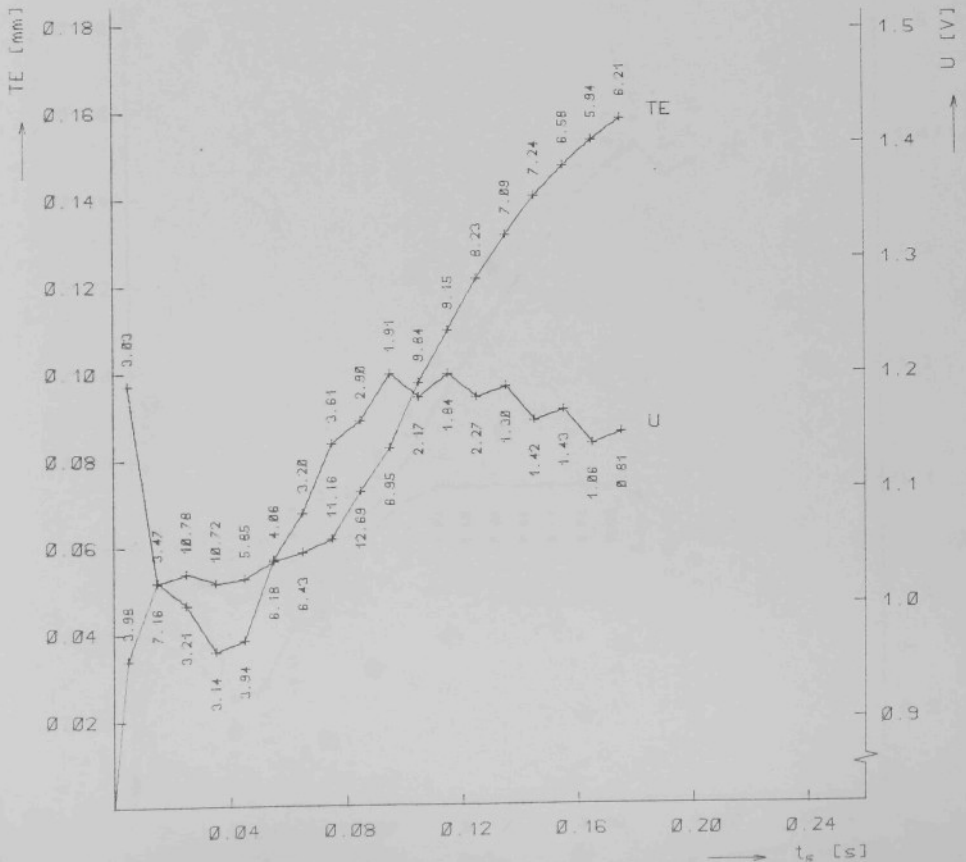
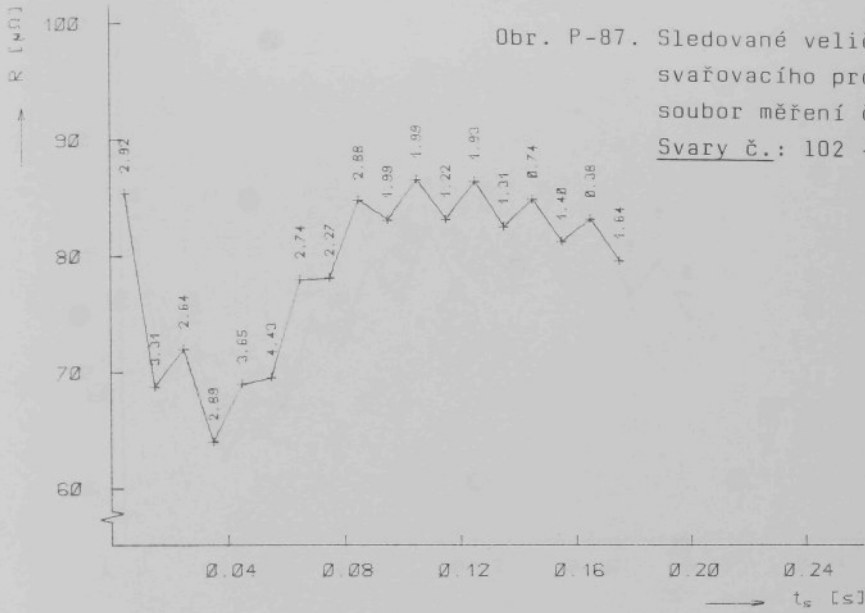
Obr. P-85. Sledované veličiny
svařovacího procesu -
soubor měření č. 4
Svary č.: 13 - 18



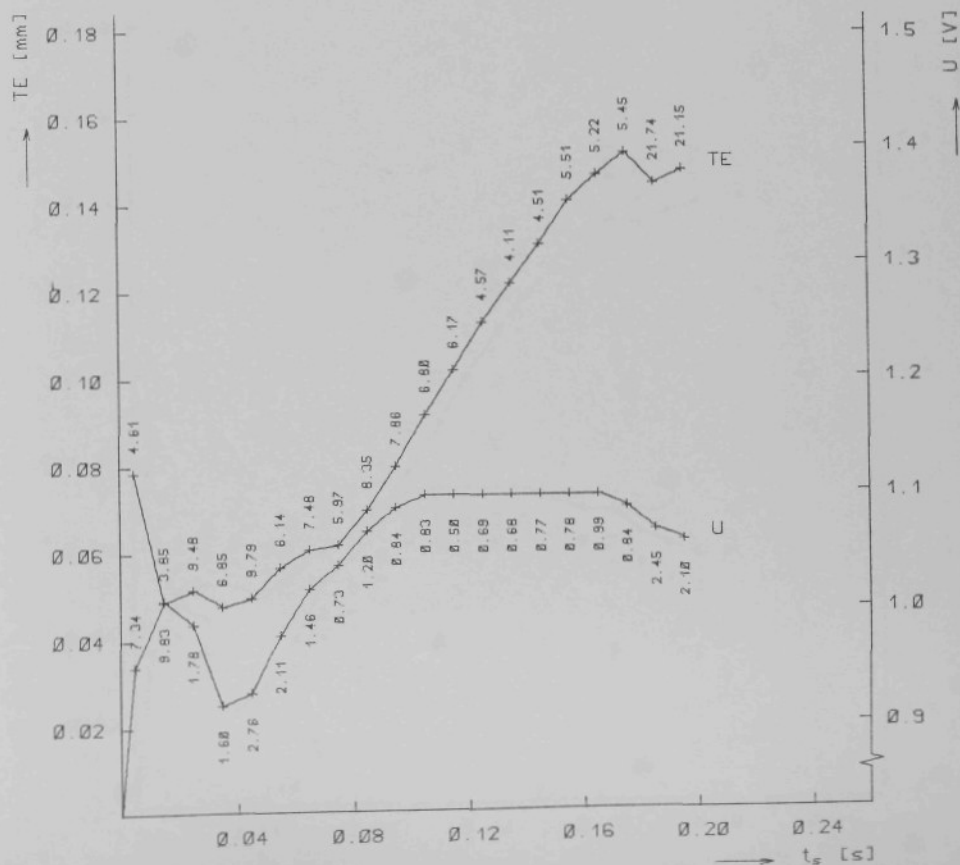
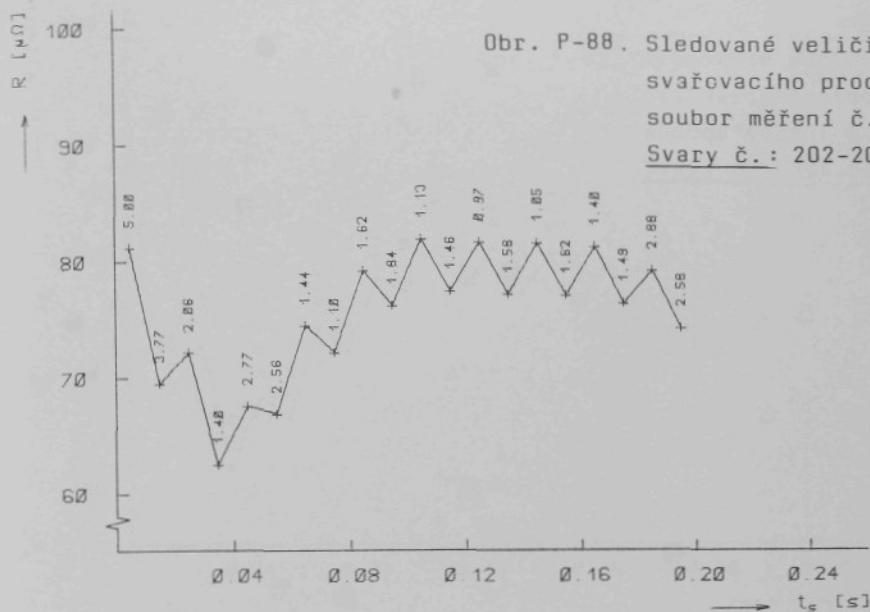
Obr. P-86. Sledované veličiny
svařovacího procesu -
soubor měření č. 4
Svary č.: 57-61, 64

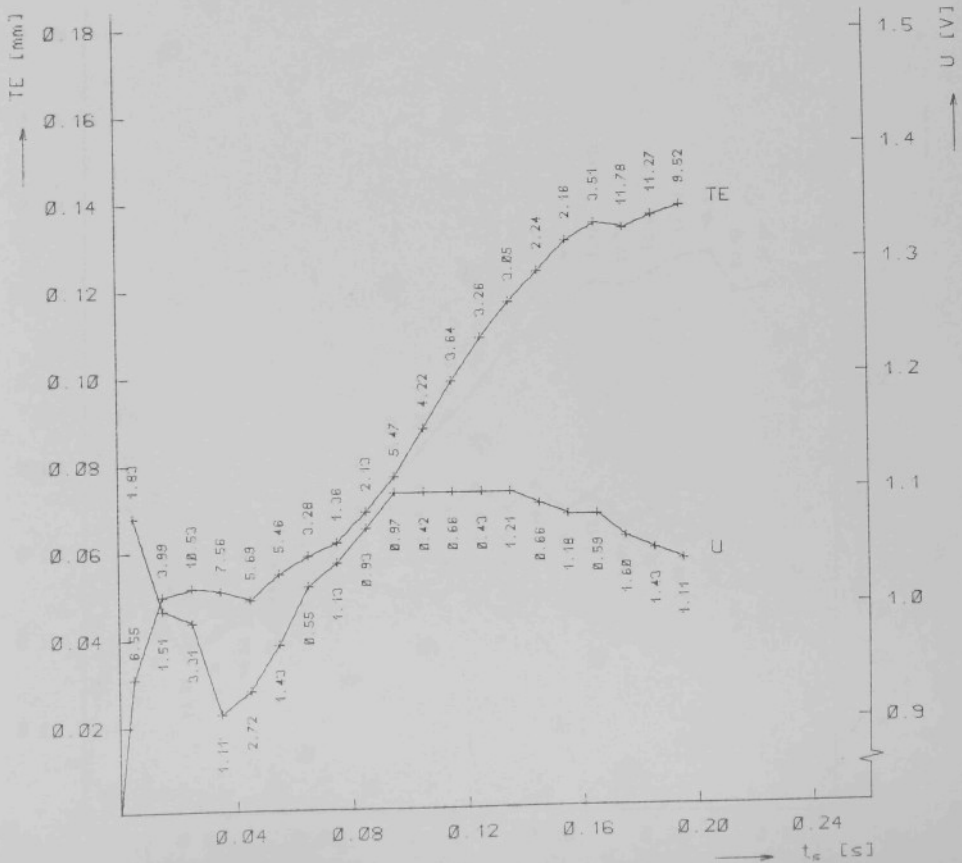
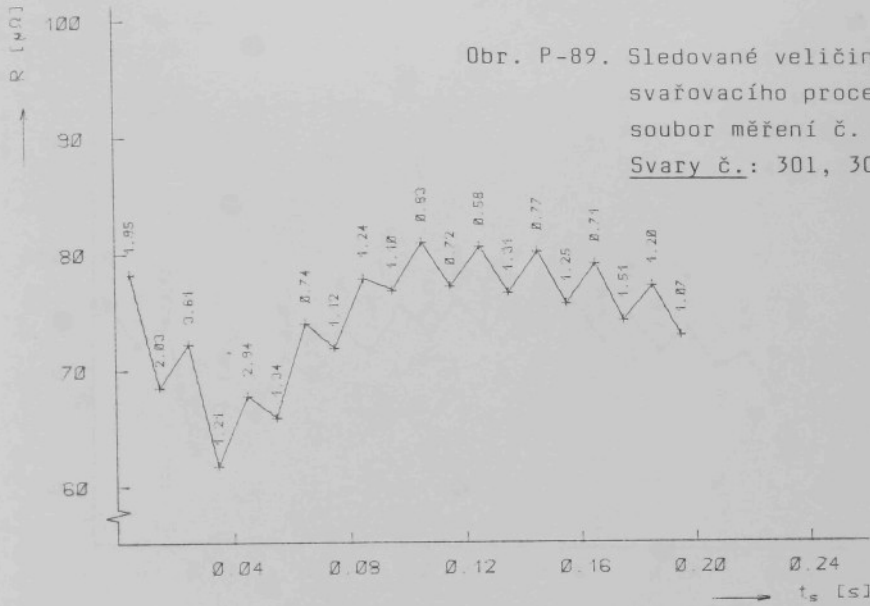


Obr. P-87. Sledované veličiny
svařovacího procesu -
soubor měření č. 4
Svary č.: 102 - 107

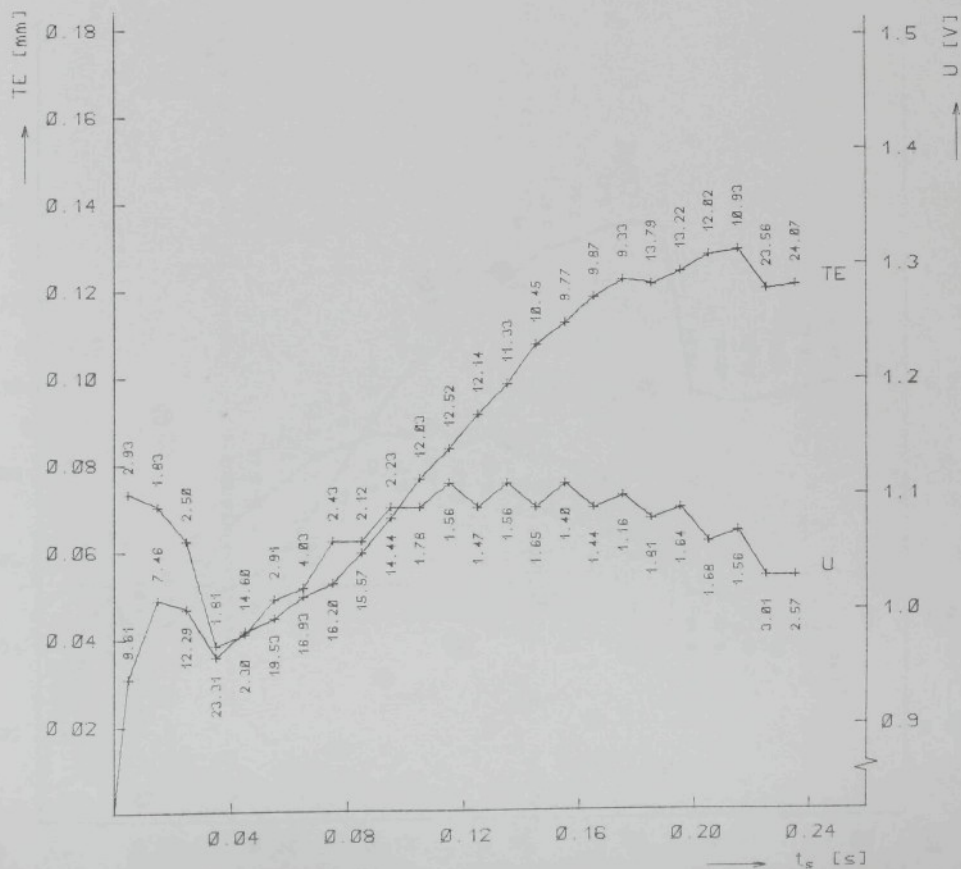
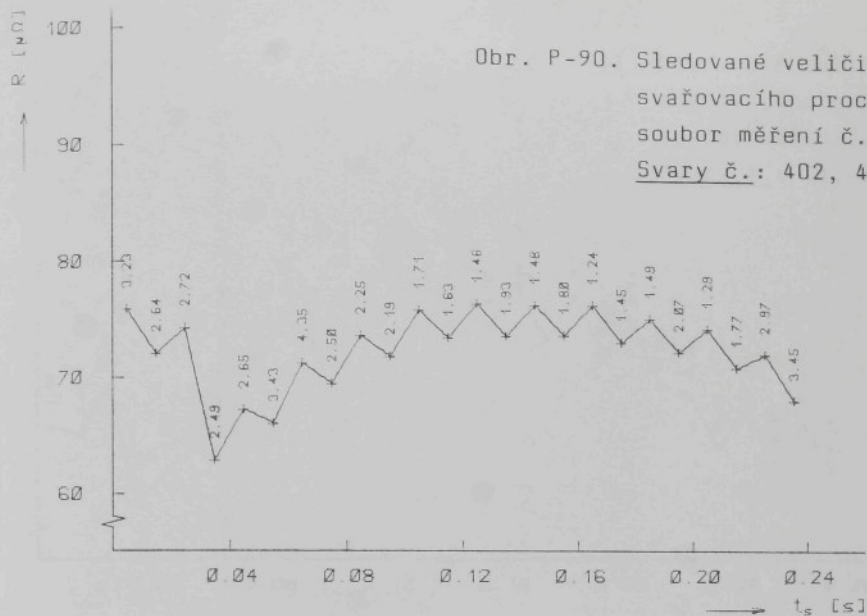


Obr. P-88. Sledované veličiny
svařovacího procesu -
soubor měření č. 4
Svary č. : 202-207

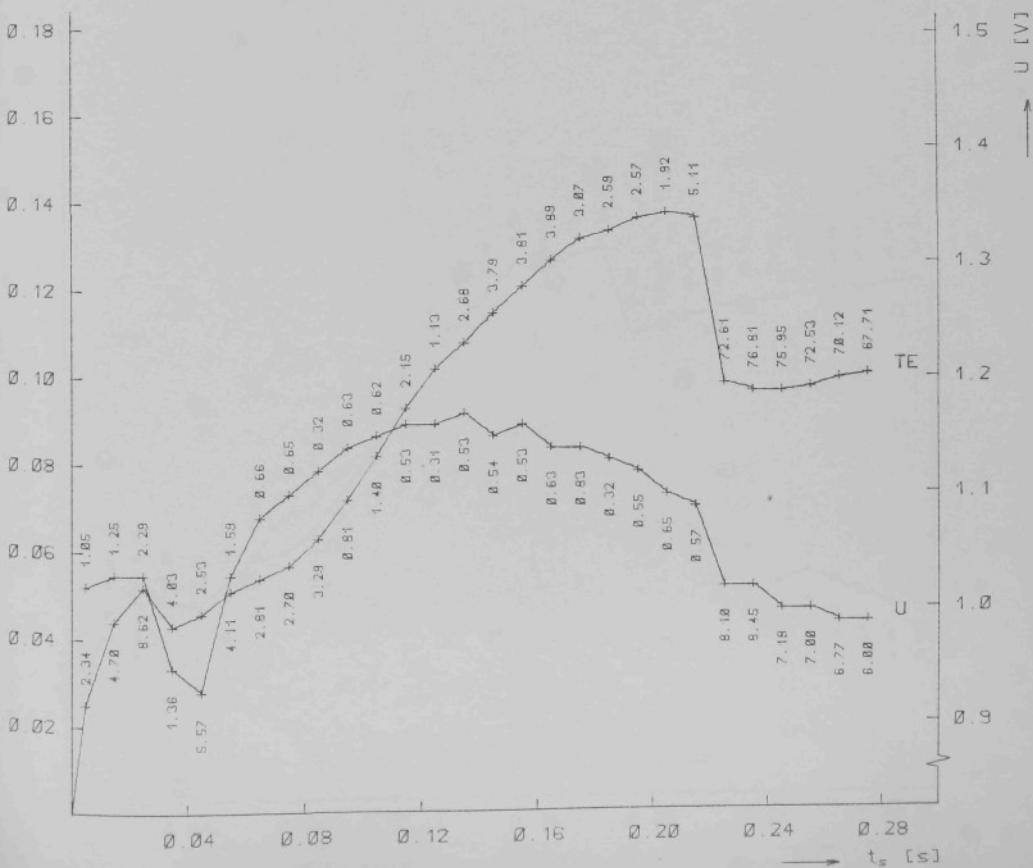
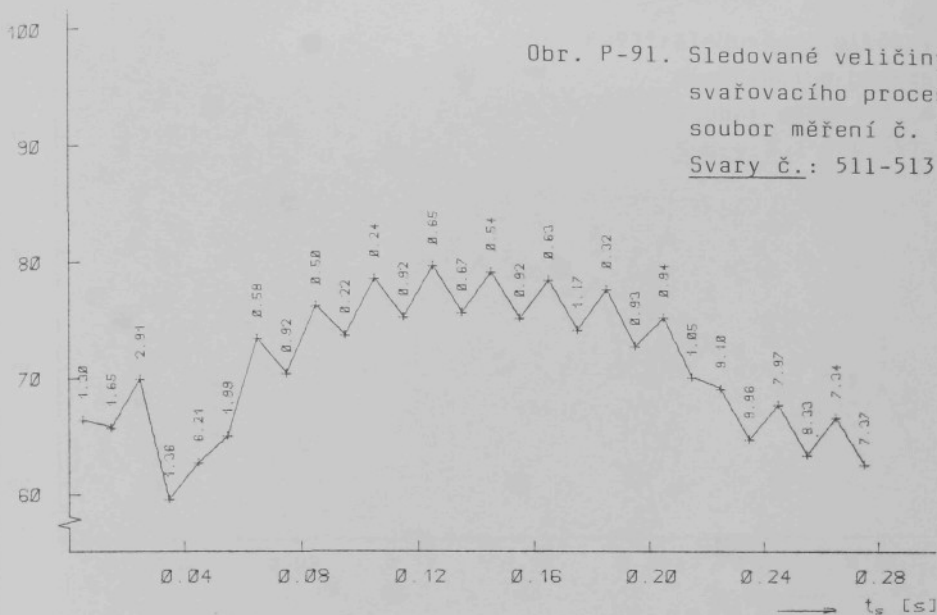




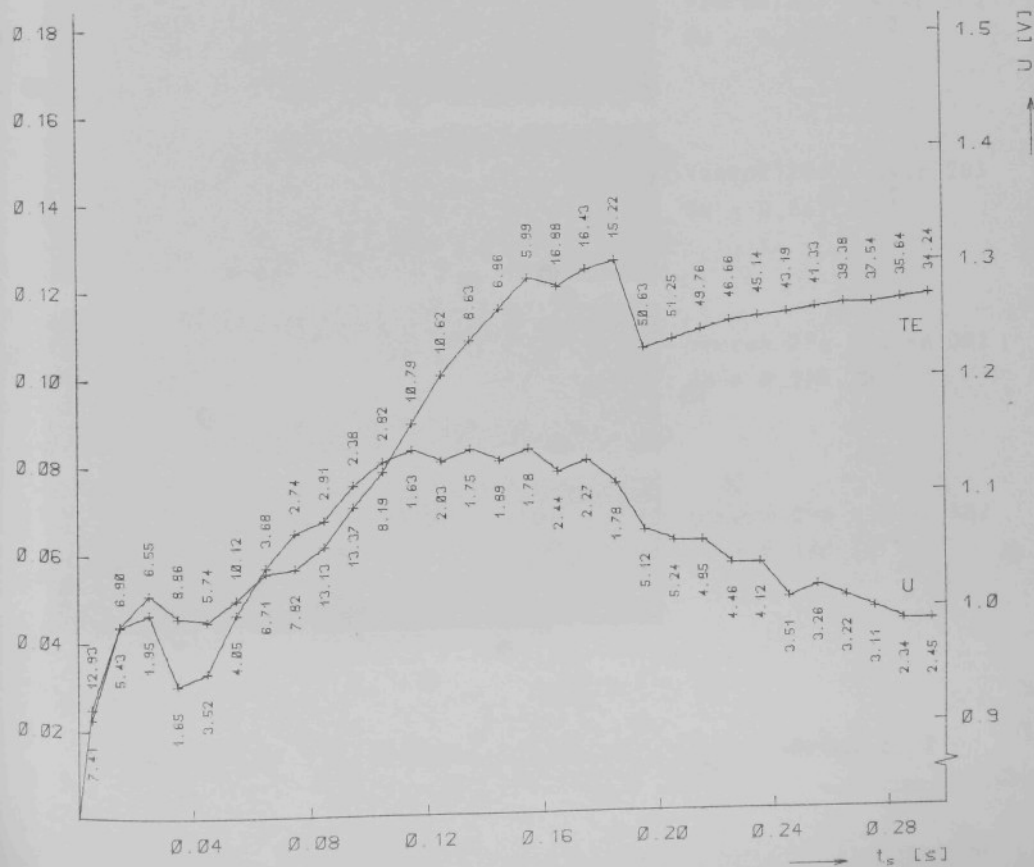
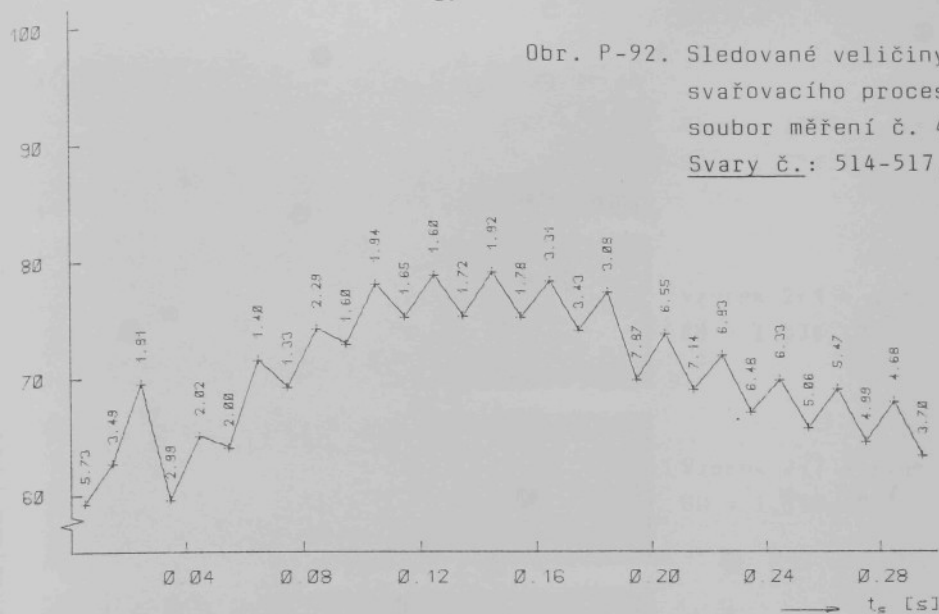
Obr. P-90. Sledované veličiny
svařovacího procesu -
soubor měření č. 4
Svary č.: 402, 404-408

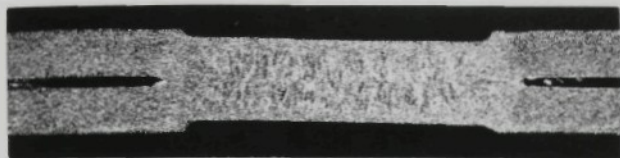


Obr. P-91. Sledované veličiny
svařovacího procesu -
soubor měření č. 4
Svary č.: 511-513

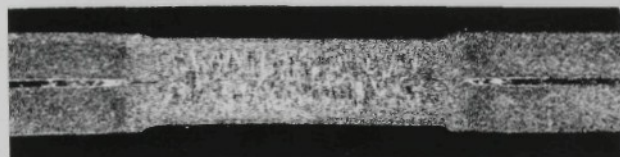


Obr. P-92. Sledované veličiny
svařovacího procesu -
soubor měření č. 4
Svary č.: 514-517, 520

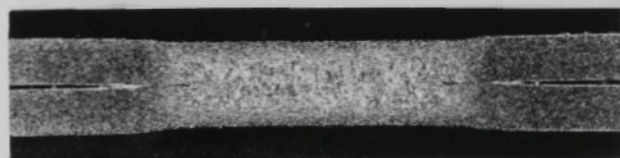




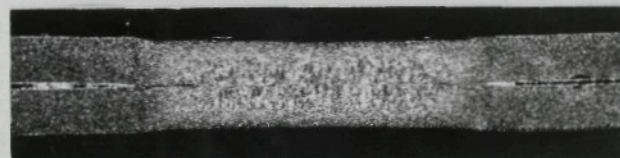
Vzorek 265 - svar 10
 $SU = 1,752 \cdot 10^{-2}$



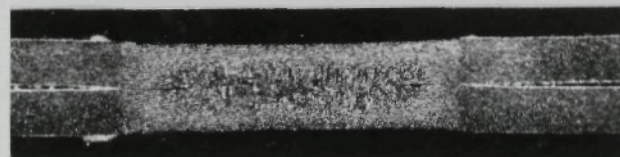
Vzorek 269 - svar 14
 $SU = 1,534 \cdot 10^{-2}$



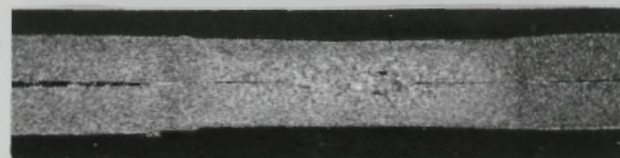
Vzorek 277 - svar 56
 $SU = 1,160 \cdot 10^{-2}$



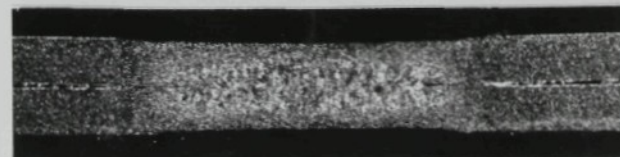
Vzorek 281 - svar 104
 $SU = 1,081 \cdot 10^{-2}$



Vzorek 286 - svar 203
 $SU = 0,867 \cdot 10^{-2}$



Vzorek 291 - svar 302
 $SU = 0,513 \cdot 10^{-2}$

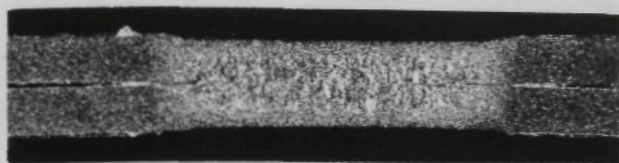


Vzorek 298 - svar 402
 $SU = 0,636 \cdot 10^{-2}$

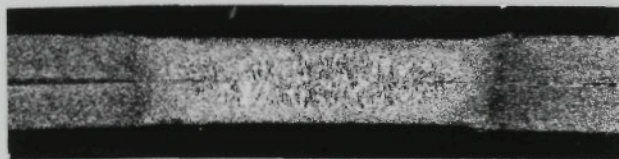
Nital 3 %

10 x

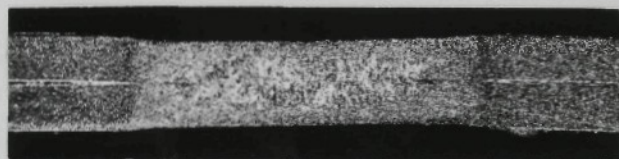
Obr. P-93.1. Makrostruktury svarů - soubor měření č. 2



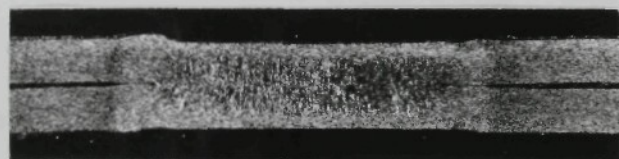
Vzorek 308 - svar 506
 $SU = 0,774 \cdot 10^{-2}$



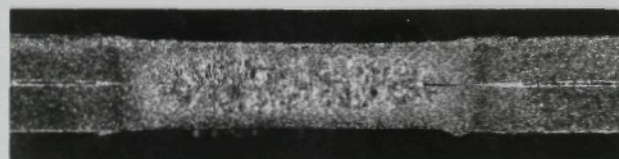
Vzorek 313 - svar 605
 $SU = 0,610 \cdot 10^{-2}$



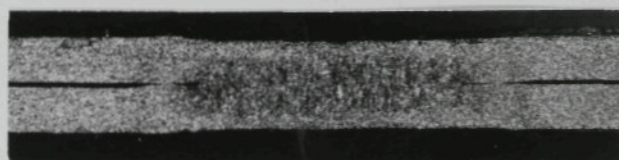
Vzorek 319 - svar 704
 $SU = 0,650 \cdot 10^{-2}$



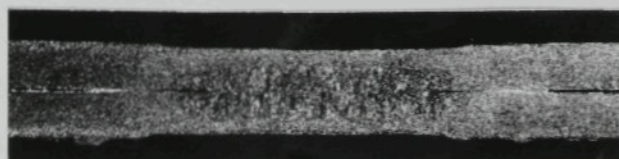
Vzorek 325 - svar 804
 $SU = 1,362 \cdot 10^{-2}$



Vzorek 333 - svar 906
 $SU = 0,009 \cdot 10^{-2}$



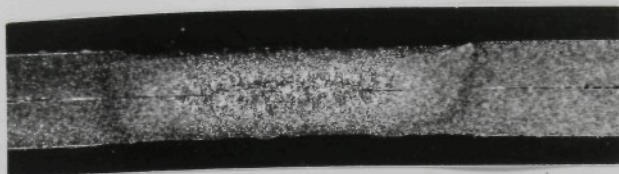
Vzorek 337 - svar 1004
 $SU = 0,891 \cdot 10^{-2}$



Vzorek 345 - svar 1106
 $SU = 0,396 \cdot 10^{-2}$

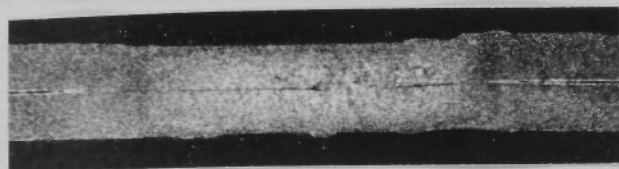
Nital 3 %

10 x



Vzorek 349 - svar 1204

$$SU = 0,098 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 356 - svar 1306

$$SU = 0,354 \cdot 10^{-2}$$

Nital 3 %

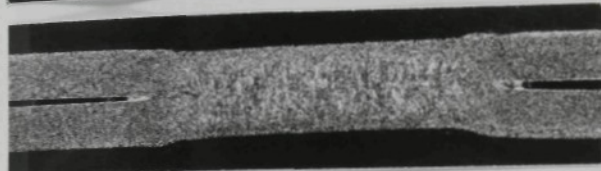
10 x

Obr. P-93.3. Makrostruktury svarů - soubor
měření č. 2



Vzorek 181 - svar 16

$t_s = 0,10$
 $SU = 1,581 \cdot 10^{-2}$



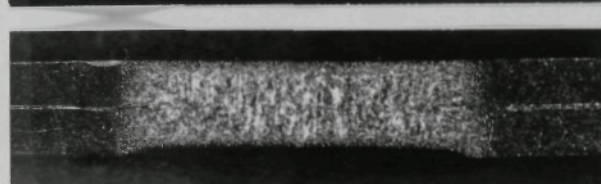
Vzorek 188 - svar 57

$t_s = 0,14$
 $SU = 1,863 \cdot 10^{-2}$



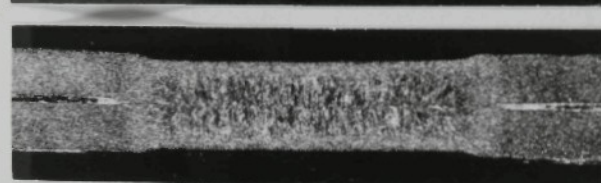
Vzorek 193 - svar 63

$t_s = 0,16$
 $SU = 2,275 \cdot 10^{-2}$



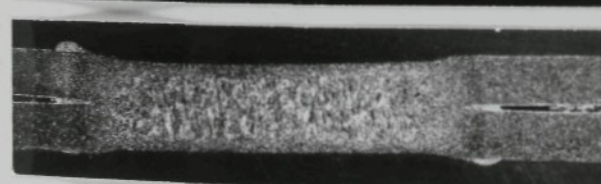
Vzorek 196 - svar 102

$t_s = 0,16$
 $SU = 2,275 \cdot 10^{-2}$



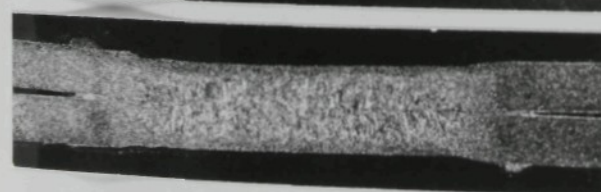
Vzorek 201 - svar 107

$t_s = 0,18$
 $SU = 2,486 \cdot 10^{-2}$



Vzorek 207 - svar 206

$t_s = 0,20$
 $SU = 2,458 \cdot 10^{-2}$

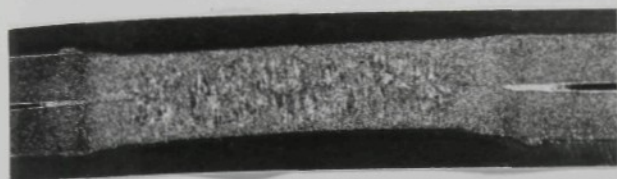


Vzorek 216 - svar 308

$t_s = 0,20$
 $SU = 2,127 \cdot 10^{-2}$

Nital 3 %

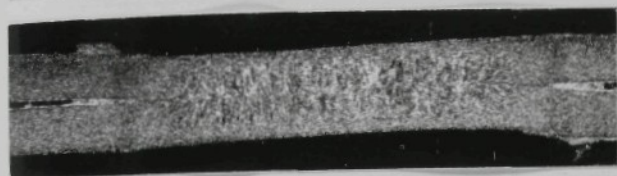
10 x



Vzorek 221 - svar 405

$$t_s = 0,24$$

$$Su = 2,027 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 225 - svar 502

$$t_s = 0,24$$

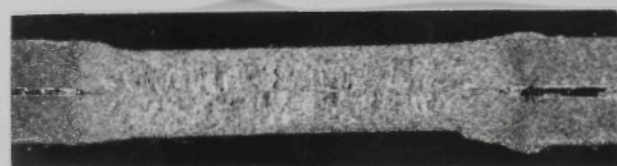
$$SU = 1.990 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 229 - svar 506

$$t_s = 0,34$$

$$SU = 2,365 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 235 - svar 513

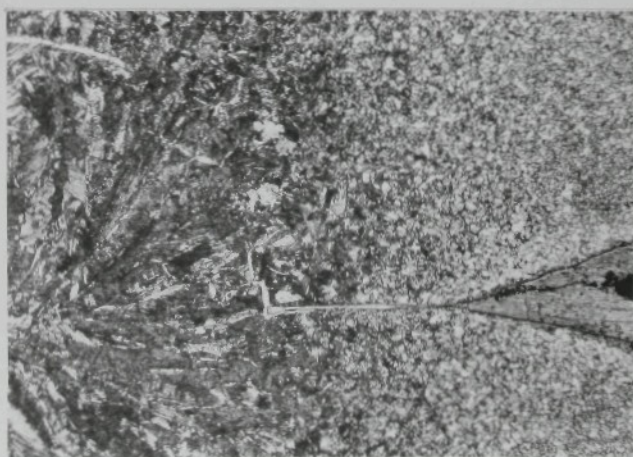
$$t_s = 0,28$$

$$SU = 5,292 \cdot 10^{-2}$$

Nital 3 %

10 x

Obr. P-94.2. Makrostruktury svarů - soubor měření č. 4



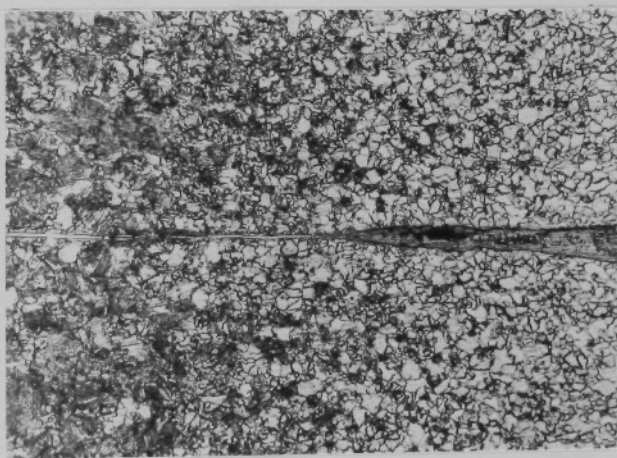
Nital 3 %

100 x

Obr. P-95. Okraj svarové čočky a adhezni oblast svaru
vzorku č. 265 - svar 10



a)

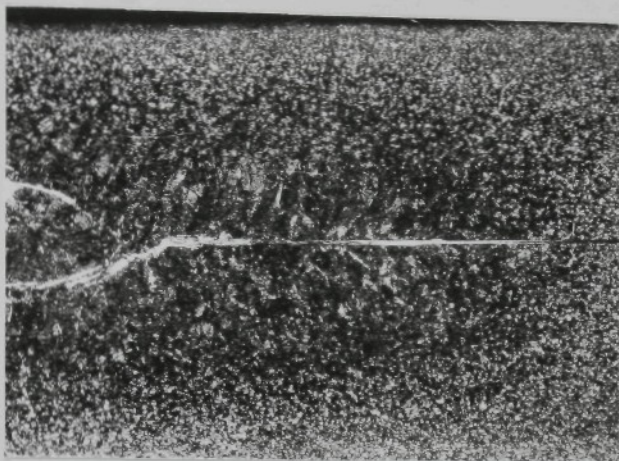


b)

Nital 3 %

200 x

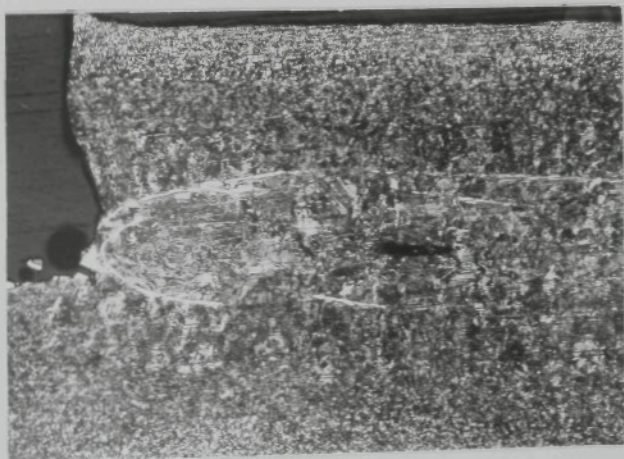
Obr. P-96. Okraj svarové čočky a adhezni oblast svaru
vzorku č. 325 - svar 804 ze souboru měření č. 2



Nital 3 %

50 x

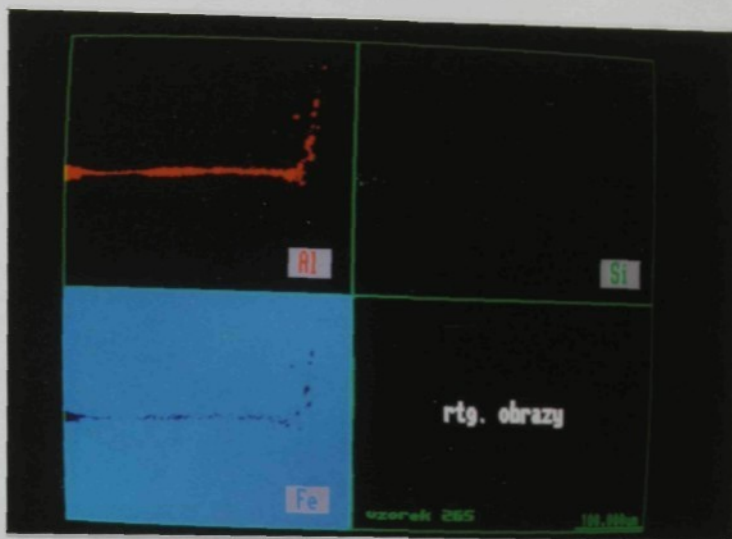
Obr. P-97. Struktura části svarové čočky u vzorku
č. 291 - svar 312 ze souboru měření č. 2



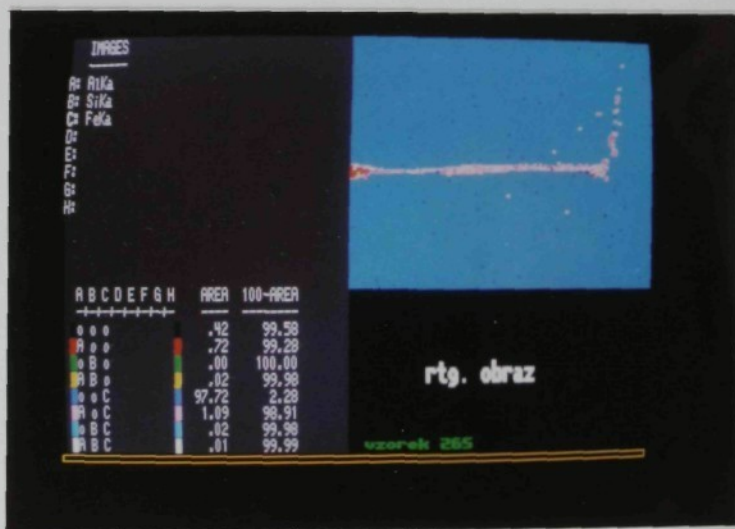
Nital 3 %

50 x

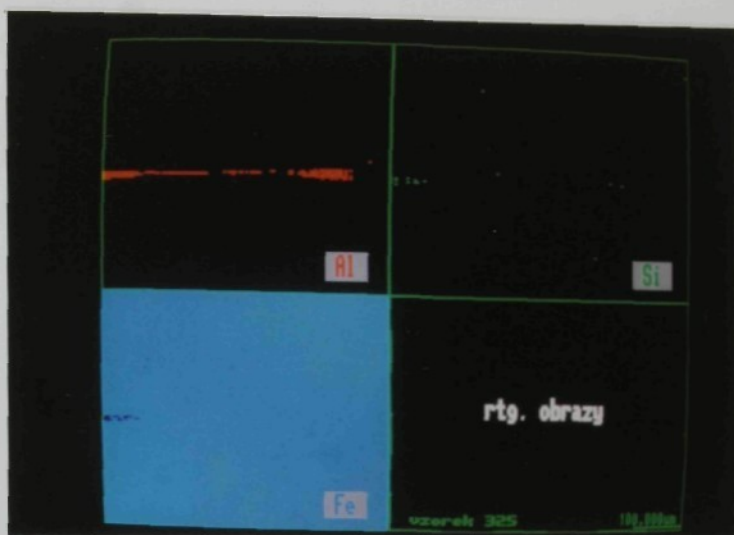
Obr. P-98. Oblast svarové čočky u vzorku č. 348 - svar
1203 ze souboru měření č. 2



Obr. P-99. Rtg. obrazy rozložení Al, Si a Fe v adhezní oblasti svaru vzorku č. 265



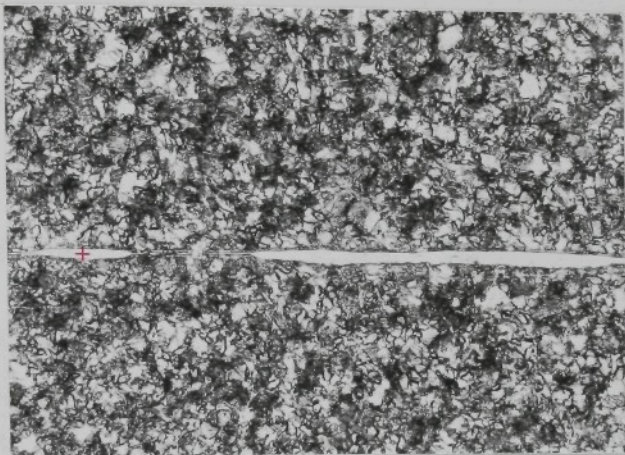
Obr. P-100. Kombinovaný rtg. obraz rozložení Al, Si a Fe v adhezní oblasti svaru vzorku č. 265 zpracovaný programem "multi"



Obr. P-101. Rtg. obrazy rozložení Al, Si a Fe v adhezni oblasti svaru vzorku č. 325



Obr. P-102. Kombinovaný rtg. obraz rozložení Al, Si a Fe v adhezni oblasti svaru vzorku č. 325 zpracovaný programem "multi"



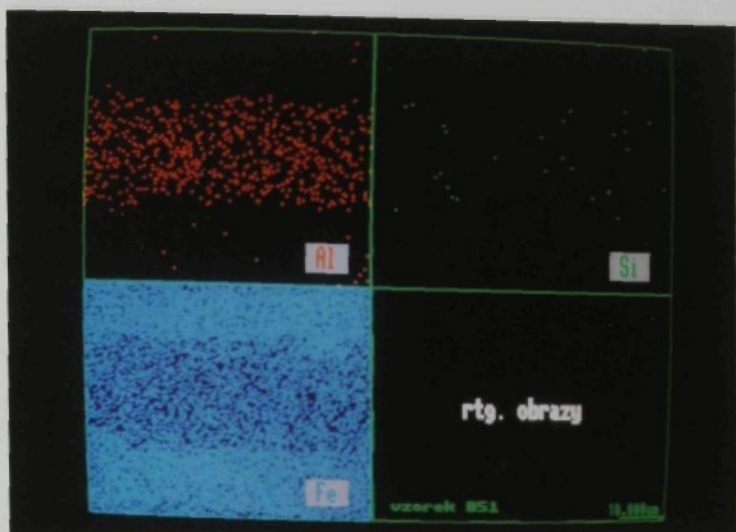
Nital 3 %

200 x

Obr. P-103. "Světlé" vrstvy v rovině styku plechů
u vzorku č. 850 bez svarové čochky



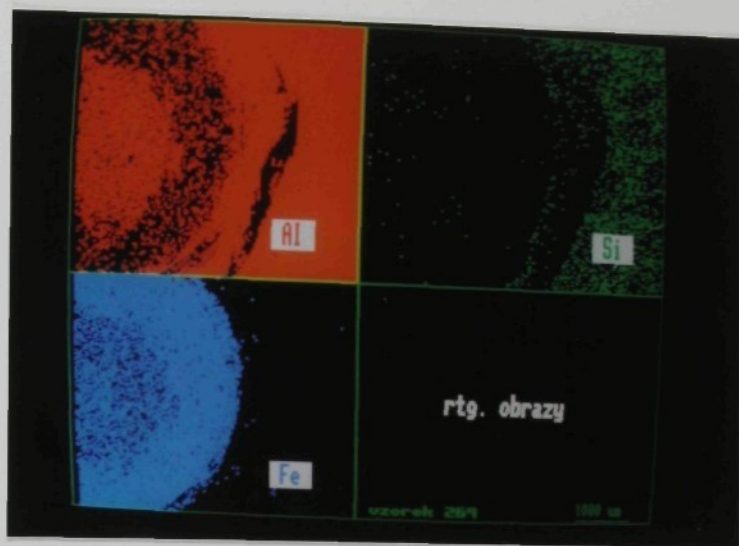
Obr. P-104. "Světlá" vrstva v rovině styku plechů
u vzorku č. 851 - snímek odražených
elektronů při ED analýze



Obr. P-105. Rtg. obrazy rozložení Al, Si a Fe v rovině styku plechů u vzorku č. 851



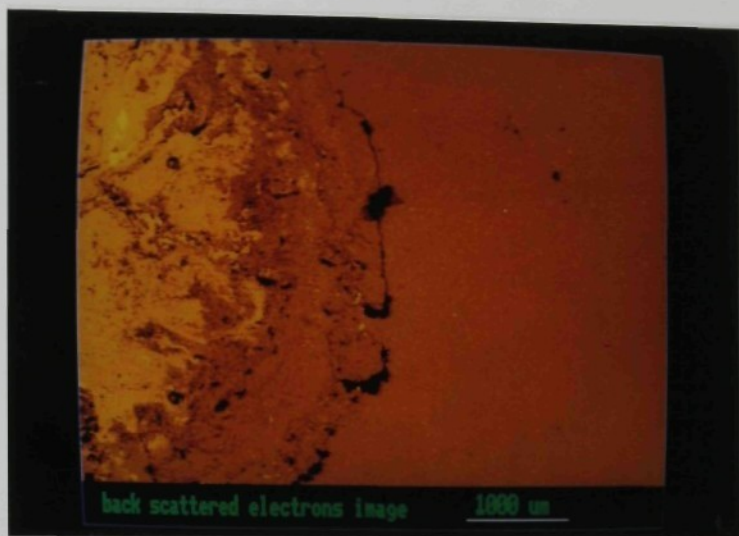
Obr. P-106. Obraz odražených elektronů - část vtisku po elektrodě u vzorku č. 269 - svar 10 ze souboru měření č. 2.



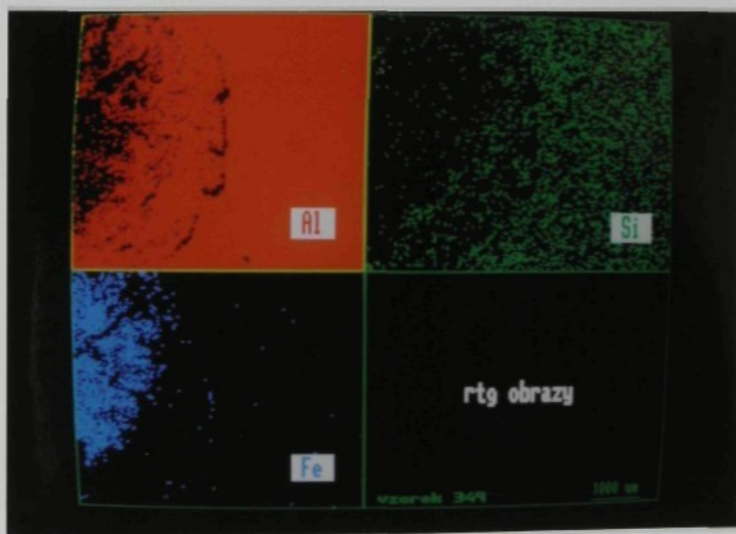
Obr. P-107. Rtg. obrazy rozložení Al, Si a Fe v místě vtisku po elektrodě u vzorku č. 269



Obr. P-108. Kombinovaný rtg. obraz rozložení Al, Si a Fe v místě vtisku po elektrodě u vzorku č. 269 zpracovaný programem "multi"



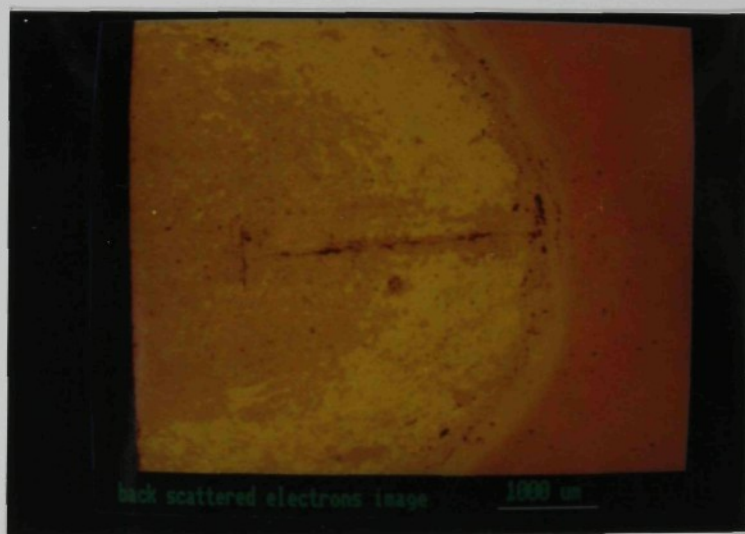
Obr. P-109. Obráz odražených elektronů - část vtisku po elektrodě u vzorku č. 349 - svar 1204 ze souboru měření č. 2



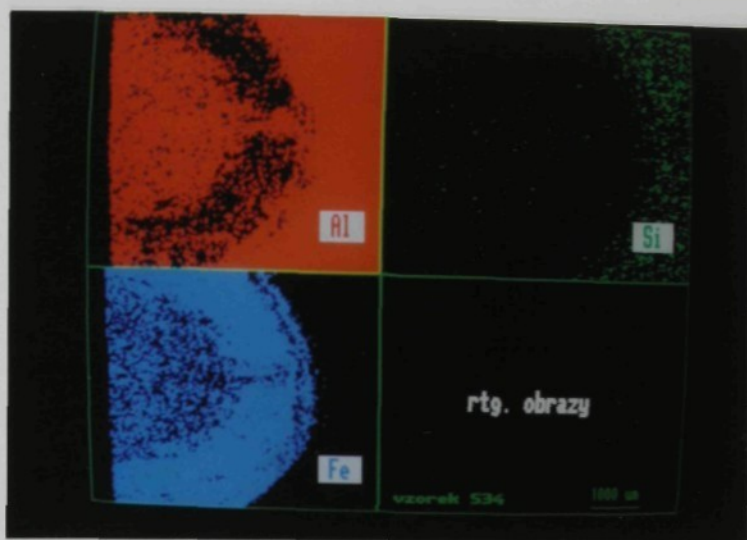
Obr. P-110. Rtg. obrazy rozložení Al, Si a Fe v místě vtisku po elektrodě u vzorku č. 349



Obr. P-111. Kombinovaný rtg. obraz rozložení Al, Si a Fe v místě vtisku po elektrodě u vzorku č. 349 zpracovaný programem "multi"



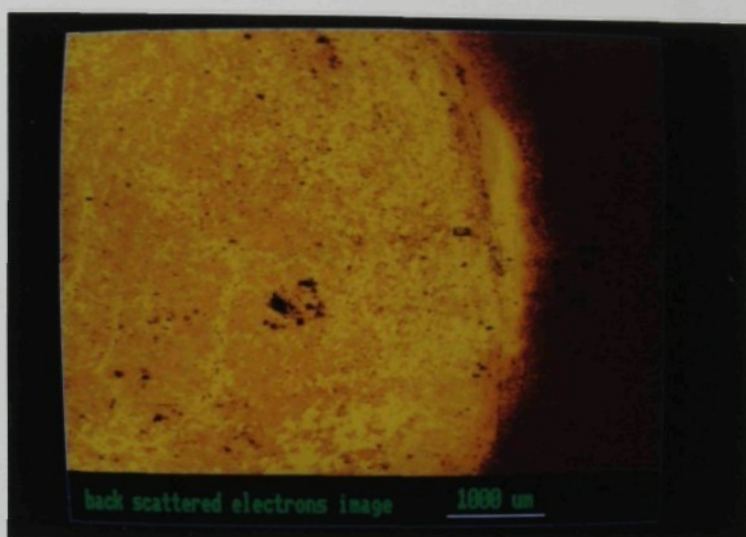
Obr. P-112. Obráz odražených elektronů - část vtisku po elektrodě u vzorku č. 534 - svar 57 ze souboru měření č. 6



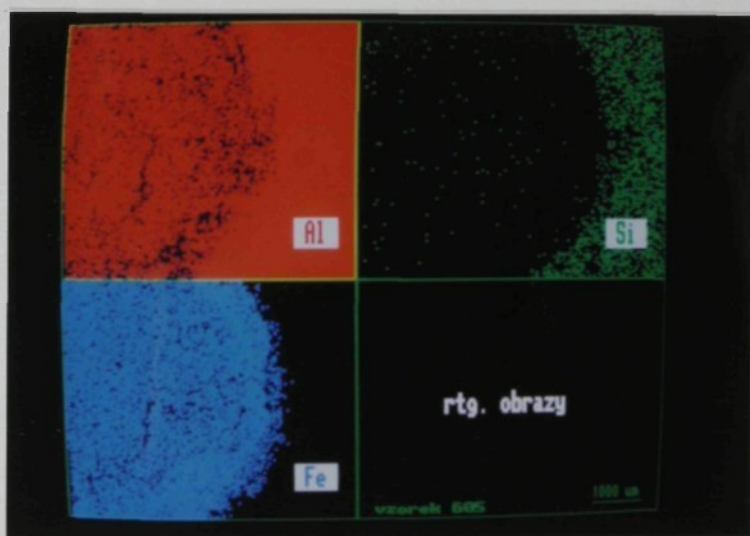
Obr. P-113. Rtg. obrazy rozložení Al, Si a Fe v místě vtisku po elektrodě u vzorku č. 534



Obr. P-114. Kombinovaný rtg. obraz rozložení Al, Si a Fe v místě vtisku po elektrodě u vzorku č. 534 zpracovaný programem "multi"



Obr. P-115. Odraz odražených elektronů - část vtisku po elektrodě u vzorku č. 605 - svar 619 ze souboru měření č. 6

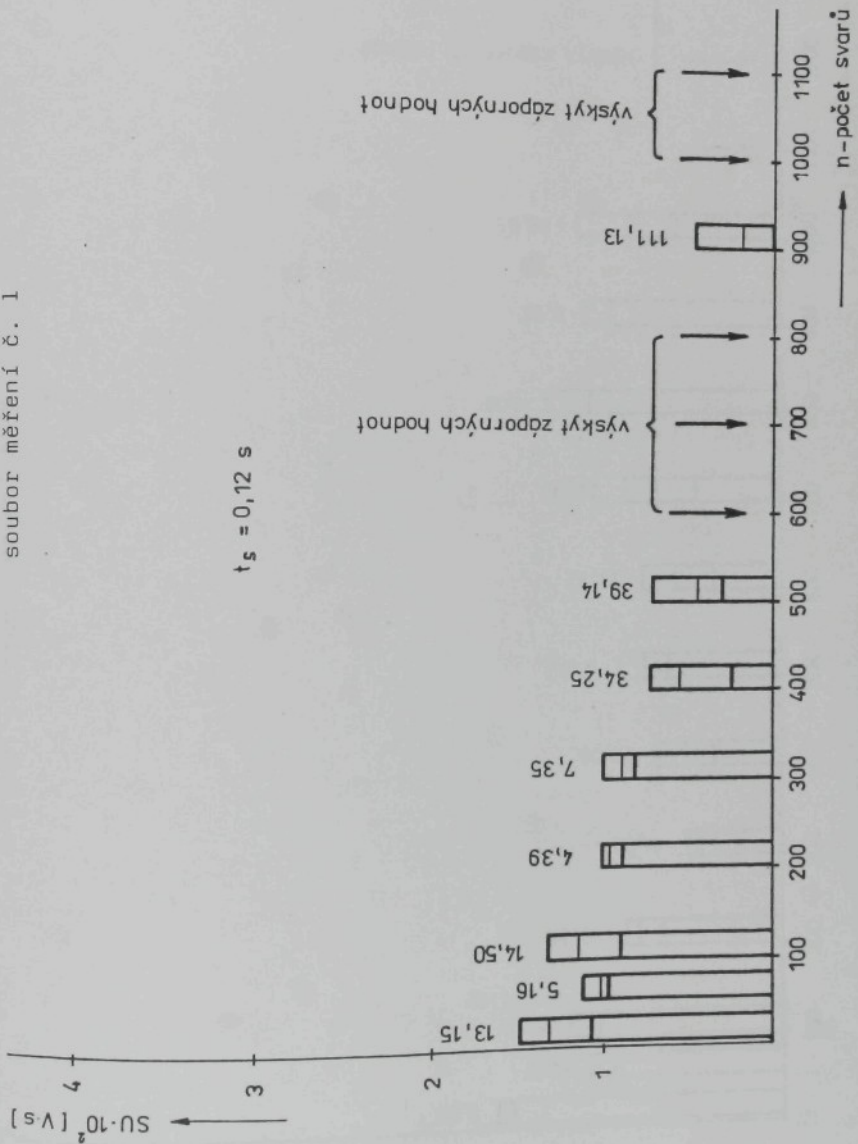


Obr. P-116. Rtg. obrazy rozložení Al, Si a Fe v místě vtisku po elektrodě u vzorku č. 605

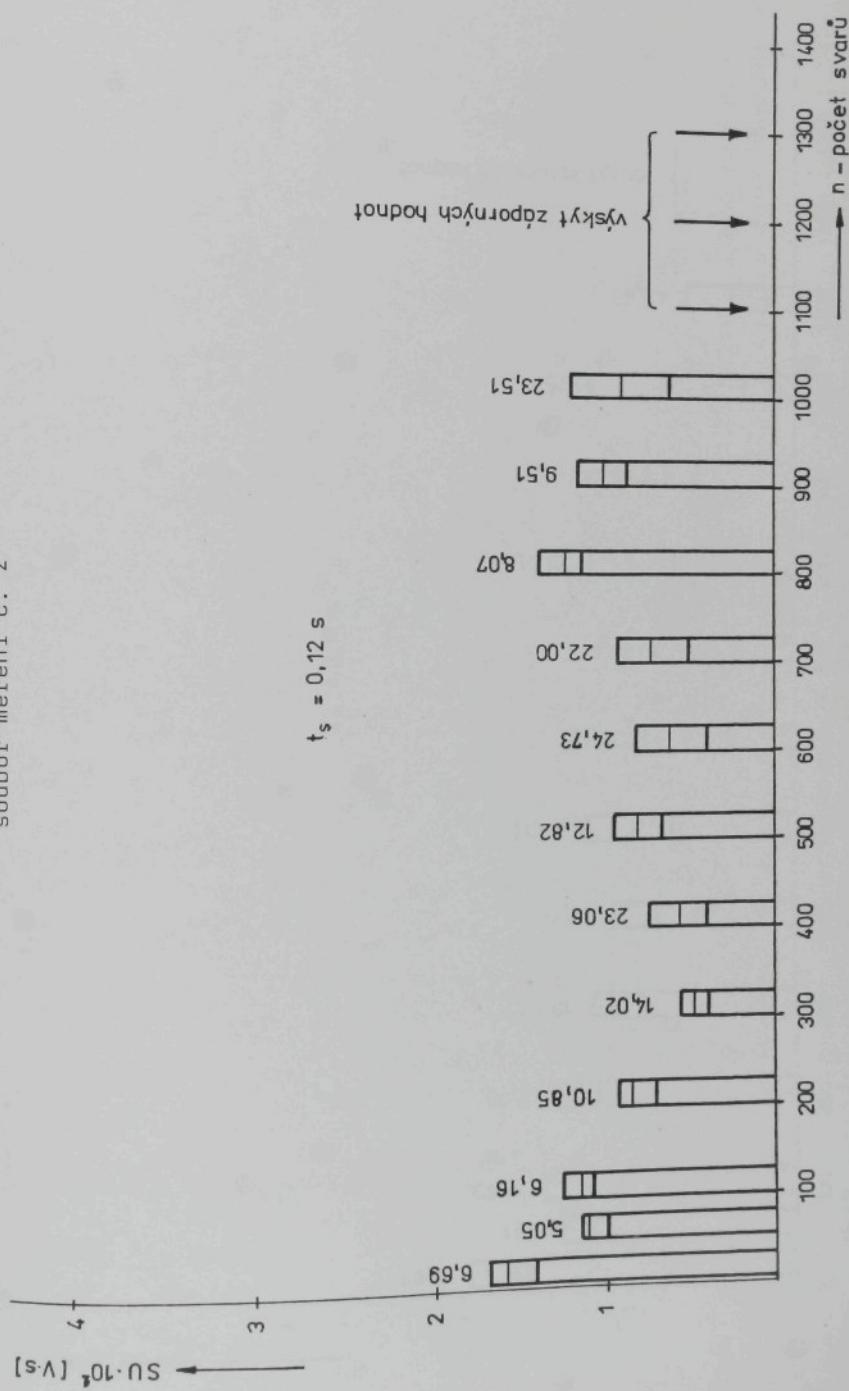


Obr. P-117. Kombinovaný rtg, obraz rozložení Al, Si a Fe v místě vtisku po elektrodě u vzorku č. 605 zpracovaný program "multi"

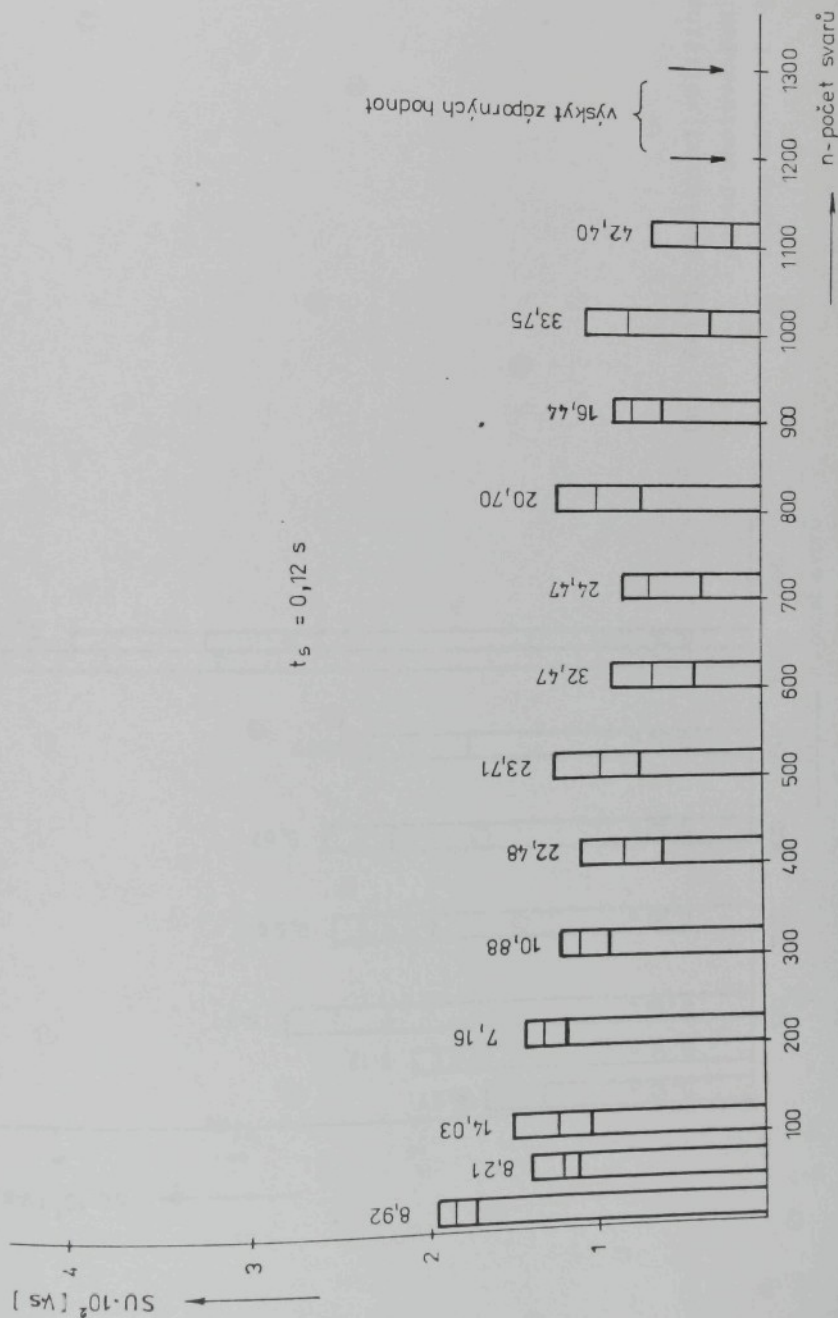
Obr. P-118. Závislost veličiny SU na počtu zhotovených svarů -
soubor měření č. 1

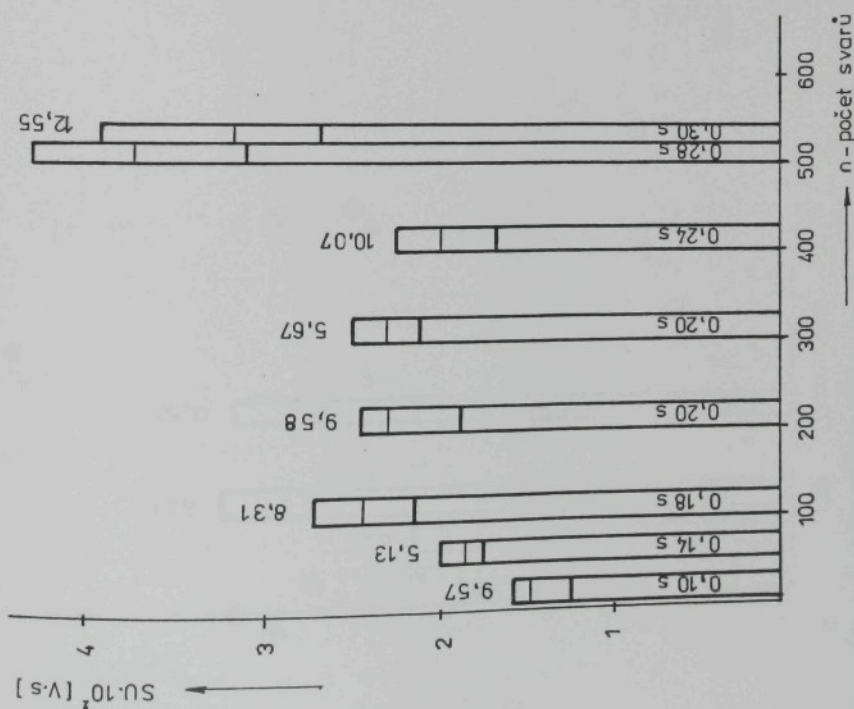


Obr. P-119. Závislost veličiny SU na počtu zhotovených svarů -
soubor měření č. 2

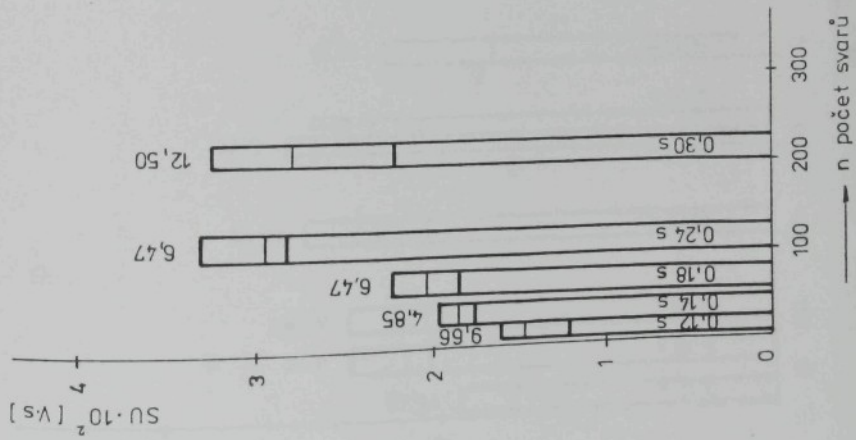


Obr. P-120. Závislost veličiny SU na počtu zhotovených svarů -
soubor měření č. 3

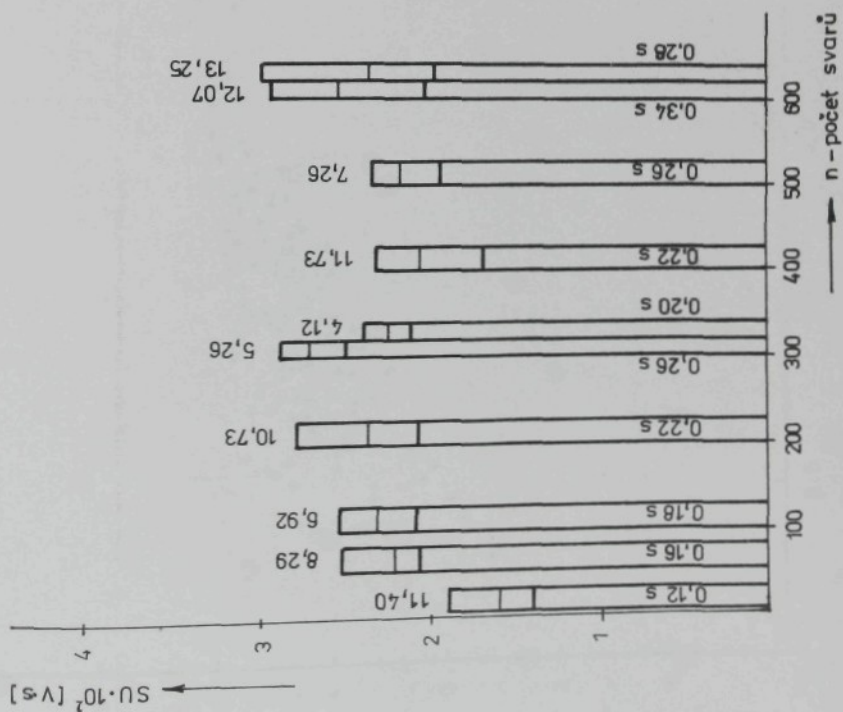




Obr. P-121. Závislost veličiny SU na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 4

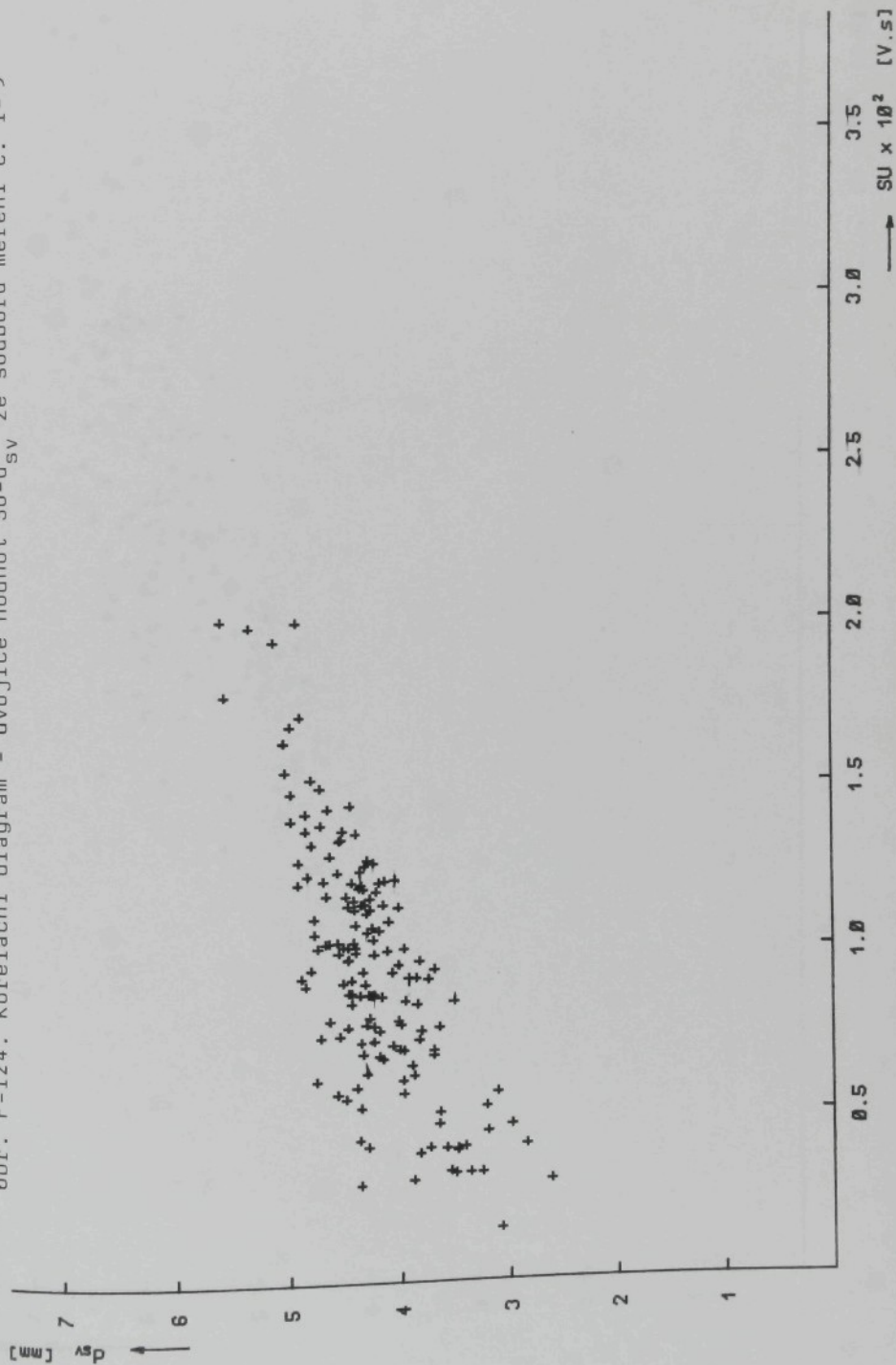


Obr. P-122. Závislost veličiny SU na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 5.

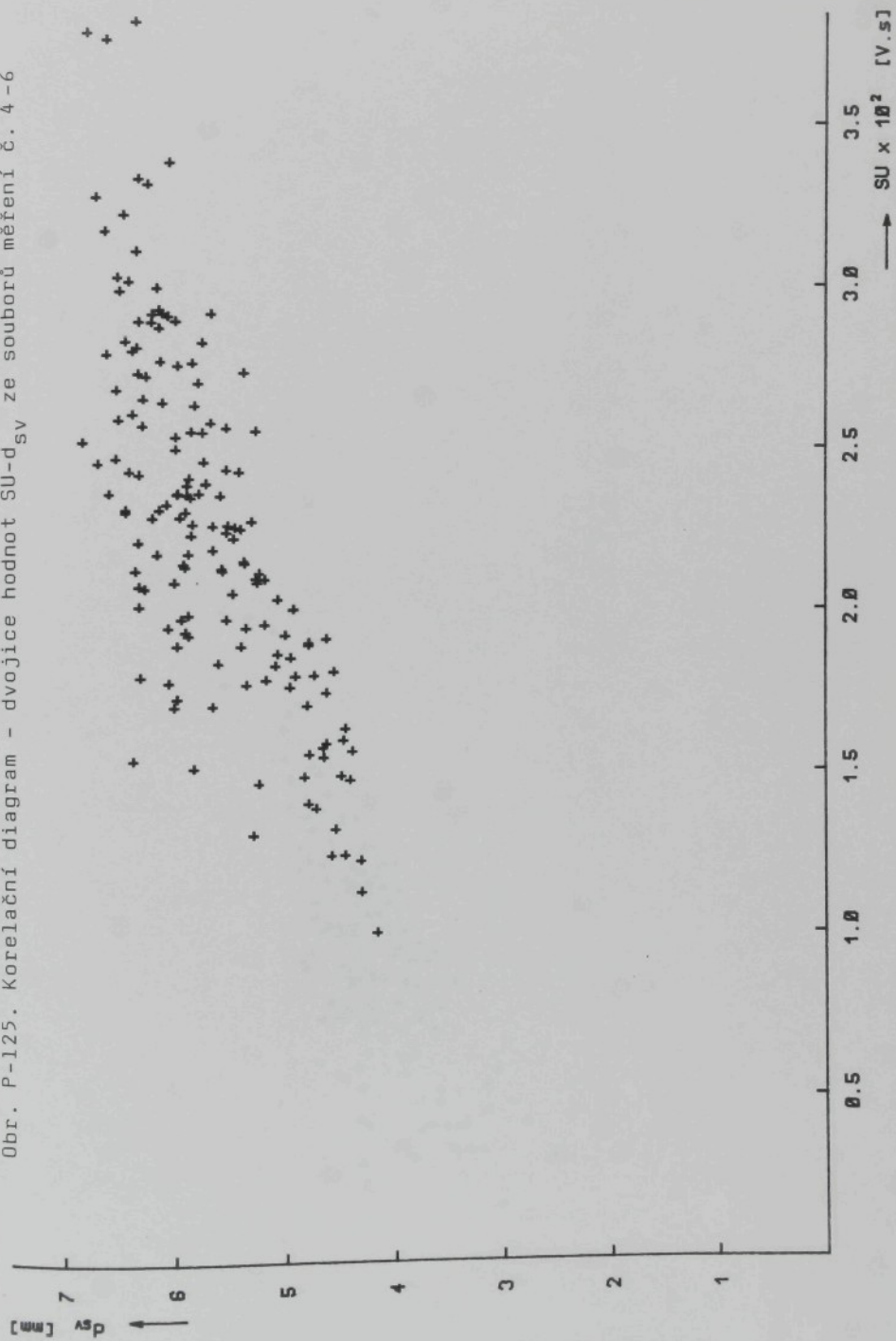


Obr. P-123. Závislost veličiny SU na počtu odstavených svarů - soubor měření č. 6

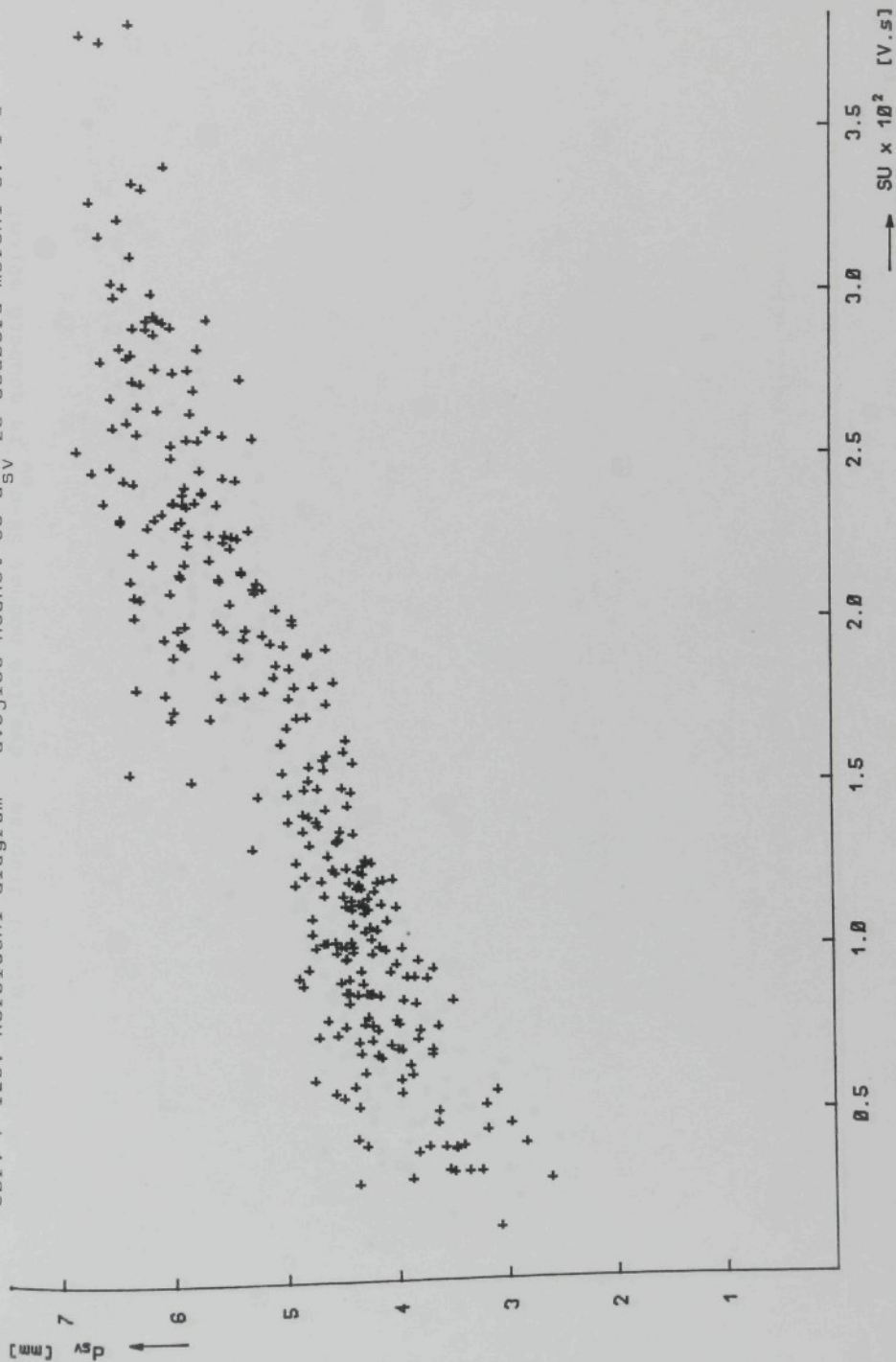
Øbr. P-124. Korelační diagram - dvojice hodnot $SU-d_{sv}$ ze souborů měření č. 1-3



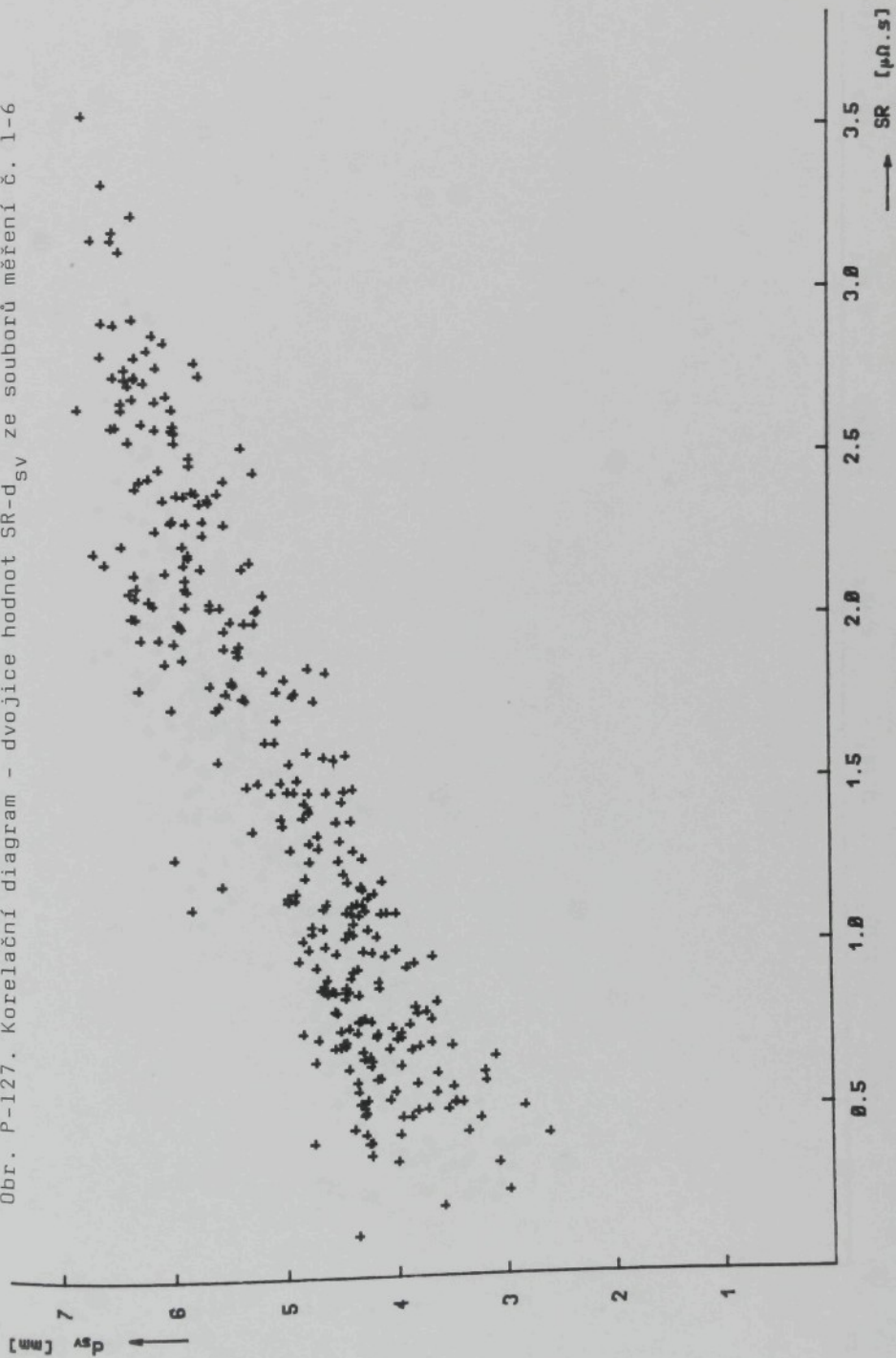
Obr. P-125. Korelační diagram - dvojice hodnot $SU-d_{SV}$ ze souborů měření č. 4-6



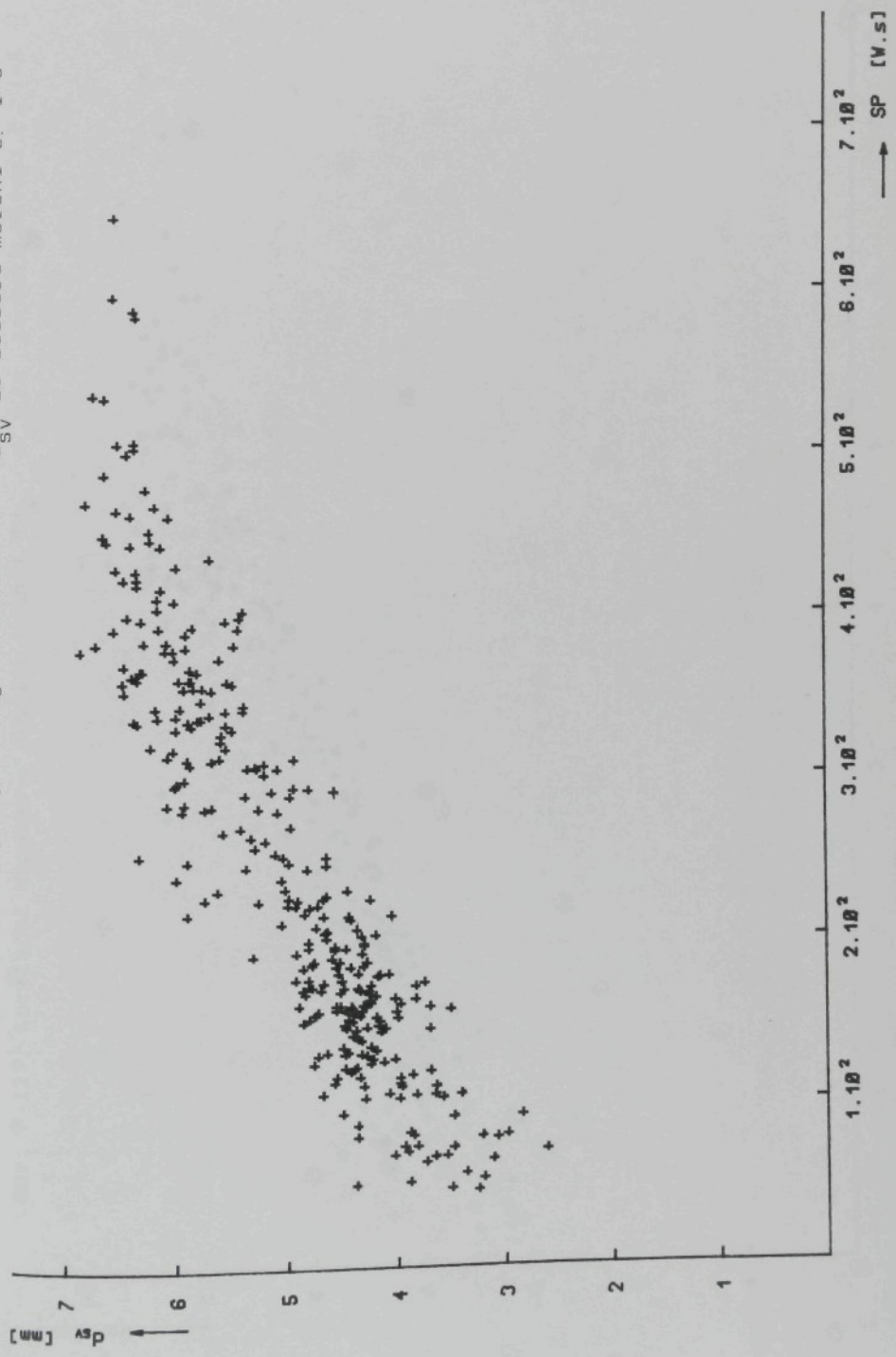
Obr. P-126. Korelační diagram - dvojice hodnot $SU-d_{SV}$ ze souborů měření č. 1-6



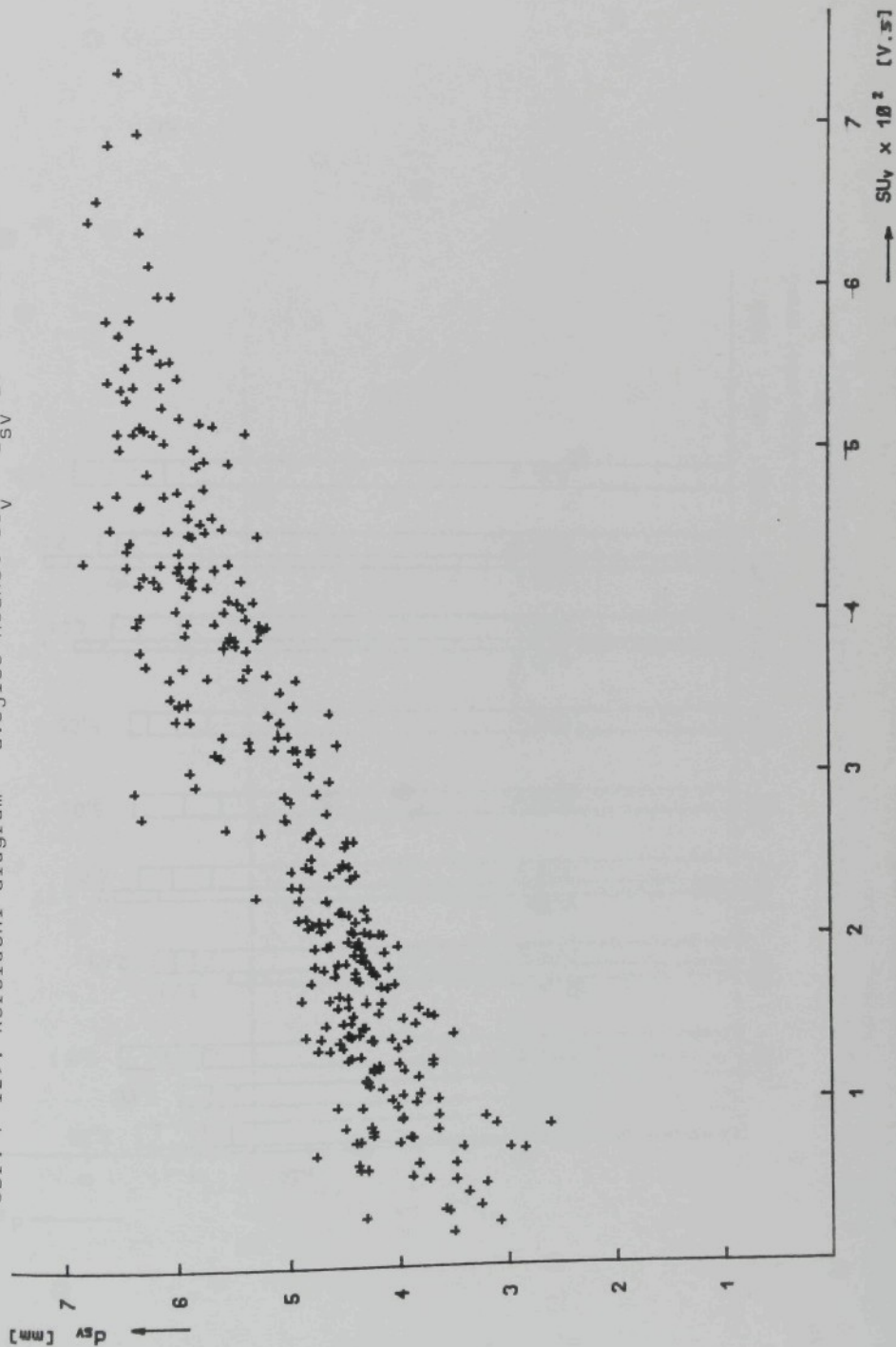
Obr. P-127. Korelační diagram - dvojice hodnot $SR-d_{sv}$ ze souborů měření č. 1-6

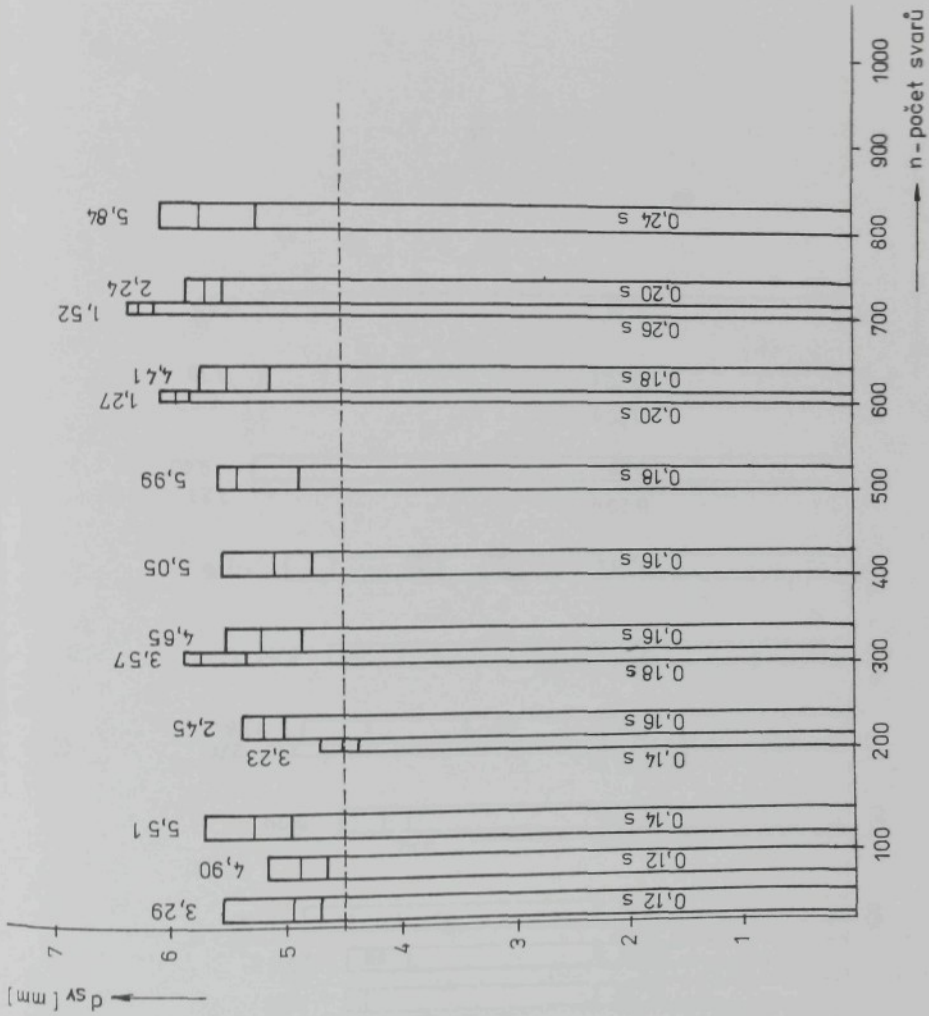


Obr. P-128. Korelační diagramy - dvojice hodnot SP - d_{sv} ze souborů měření č. 1-6

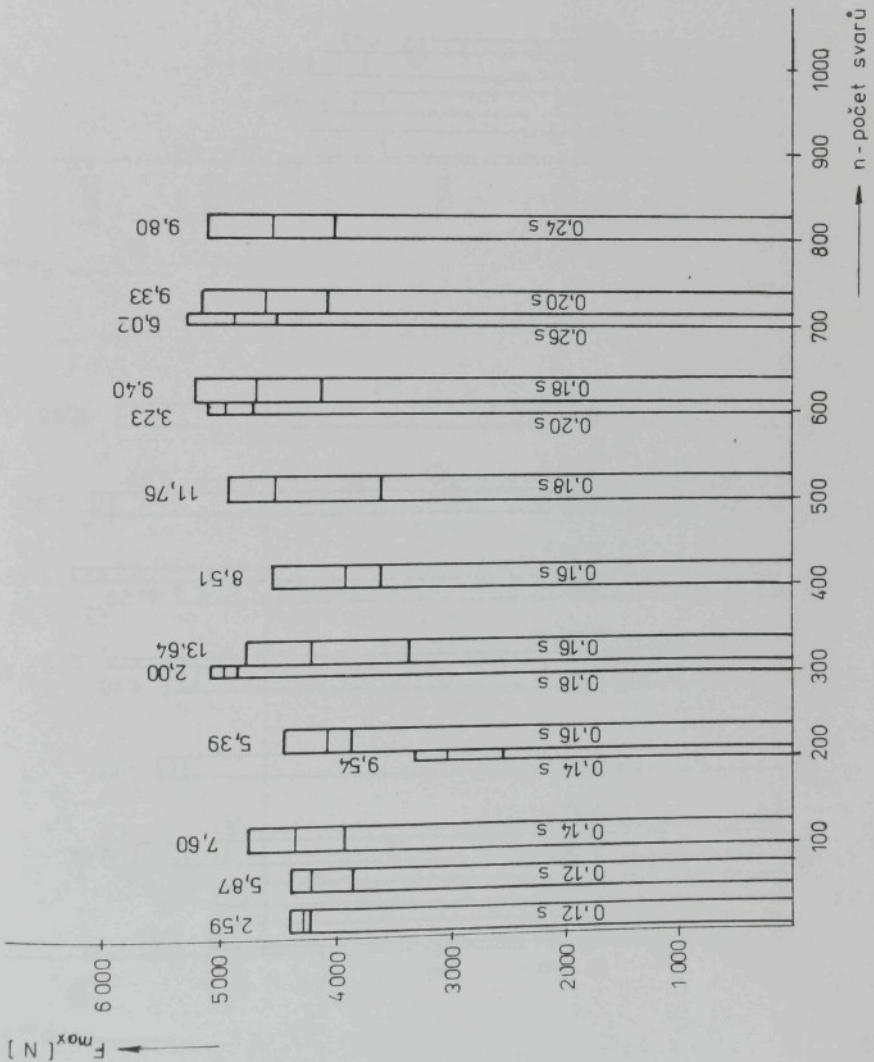


Obr. P-129. Korelační diagram - dvojice hodnot $SU_V - d_{SV}$ ze souborů měření č. 1-6

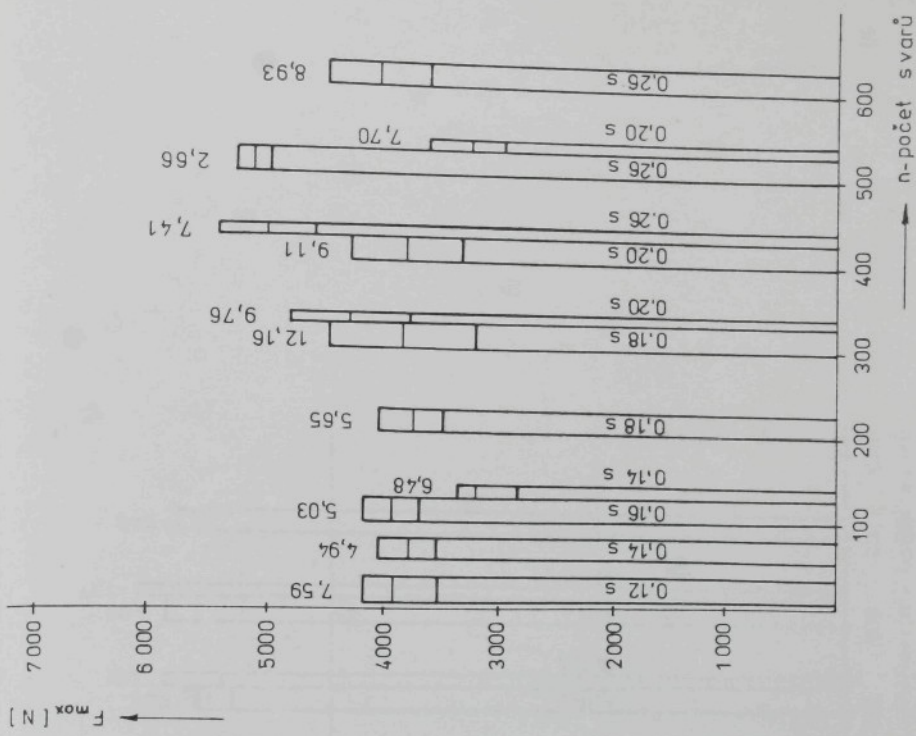




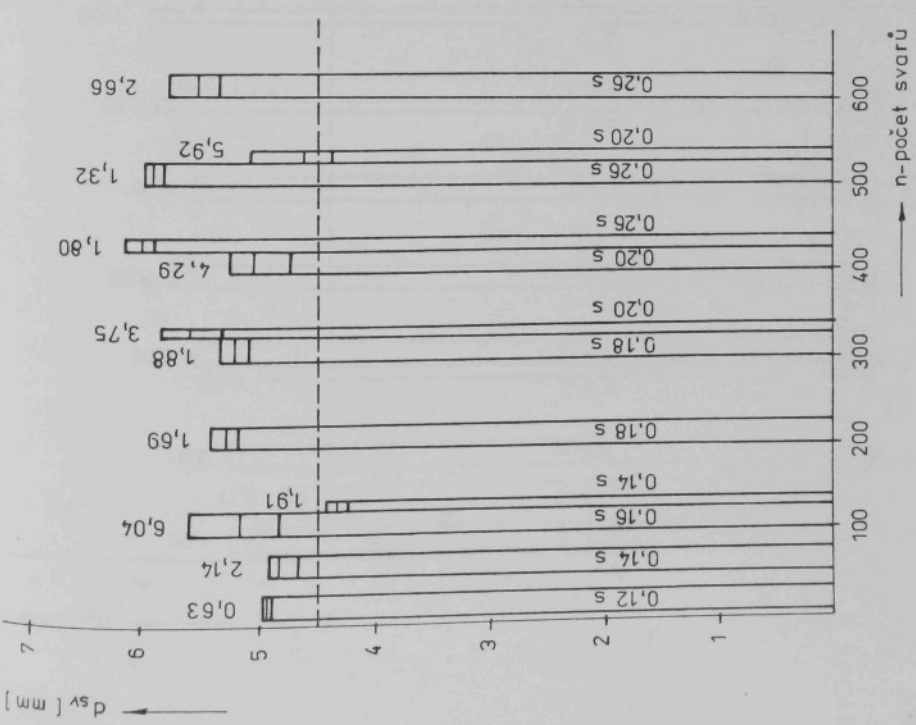
Obr. P-130. Závislost rozměru svaru na počtu zhotovených svarů -
soubor měření č. 7



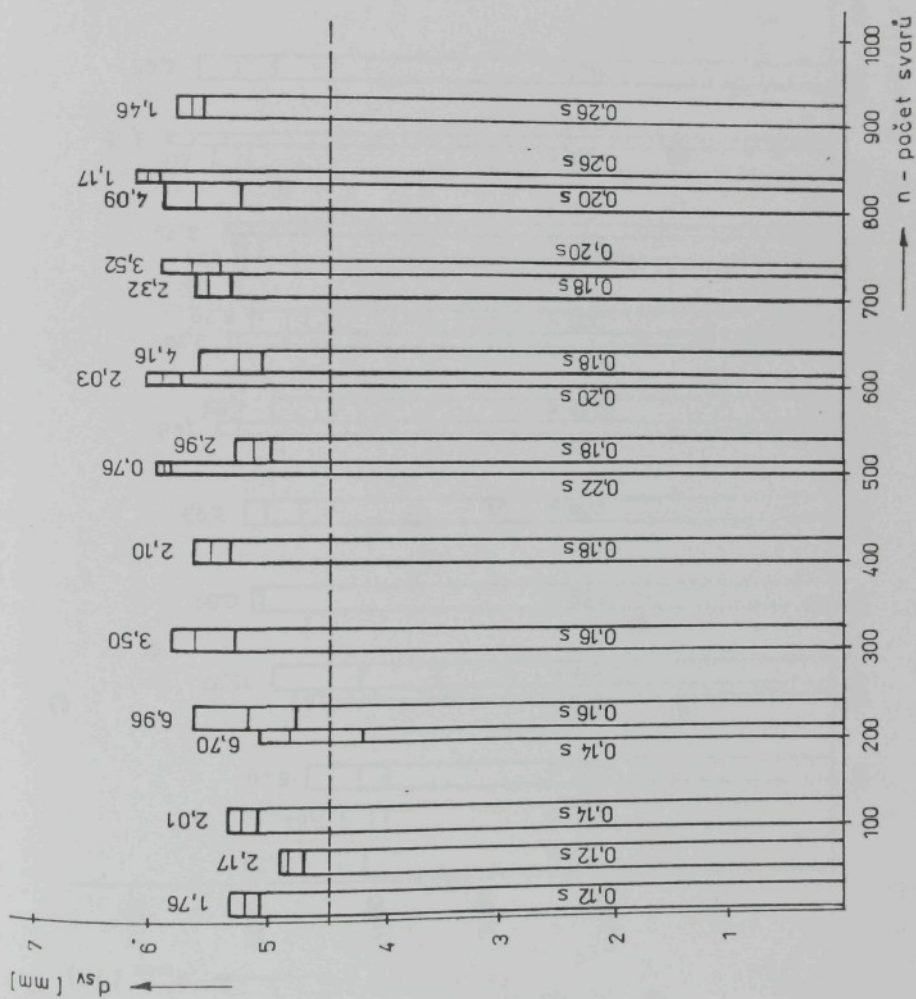
Obř. P-131. Závislost únosnosti svarů na počtu zhotovených svarů -
soubor měření č. 7



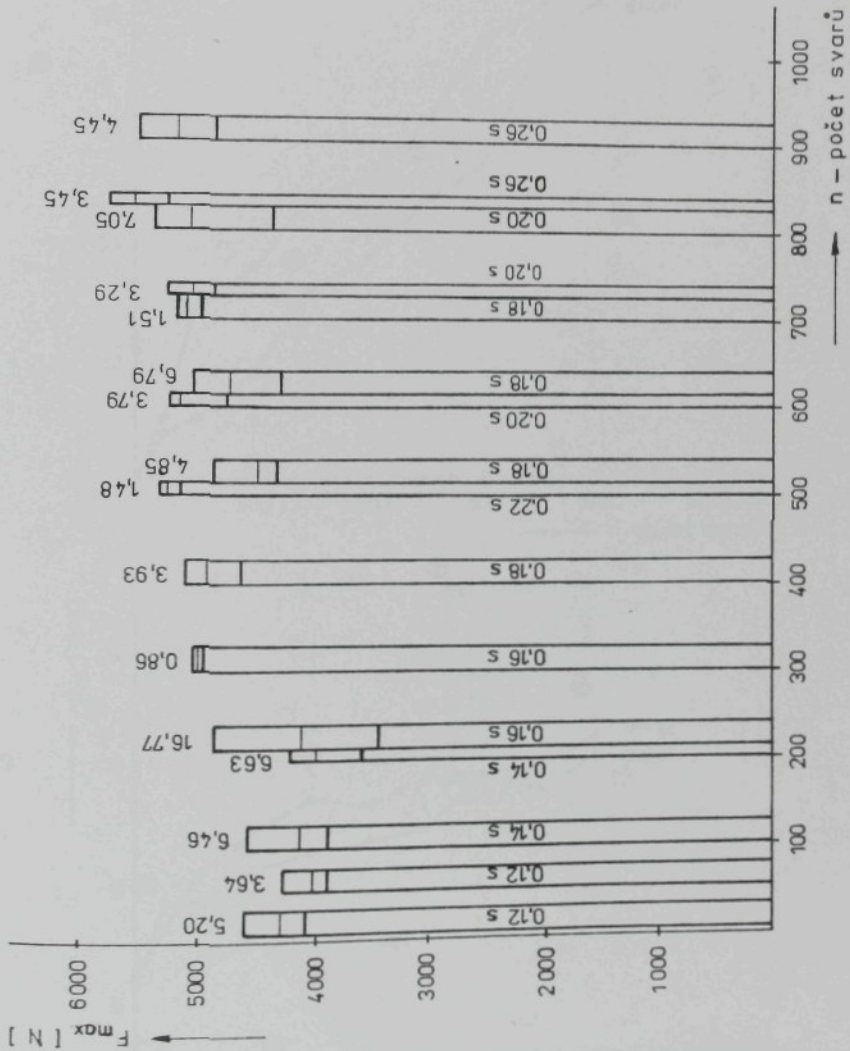
Obr. P-133. Závislost únosnosti svaru na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 8



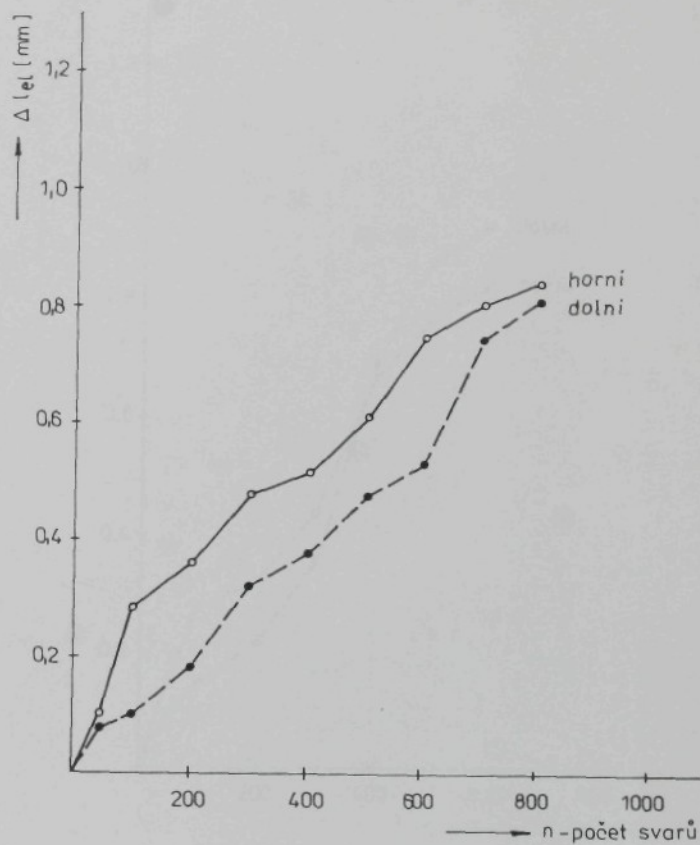
Obr. P-132. Závislost rozměru svaru na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 8



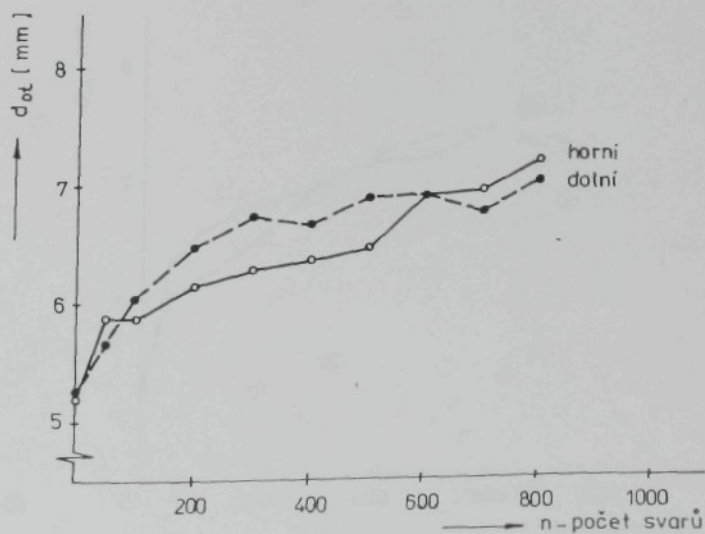
Obr. P-134. Závislost rozměru svaru na počtu zhotovených svarů
soubor měření č. 9



Obr. P-135. Závislost úlosti svaru na počtu zhotovených svarů -
soubor měření č. 9

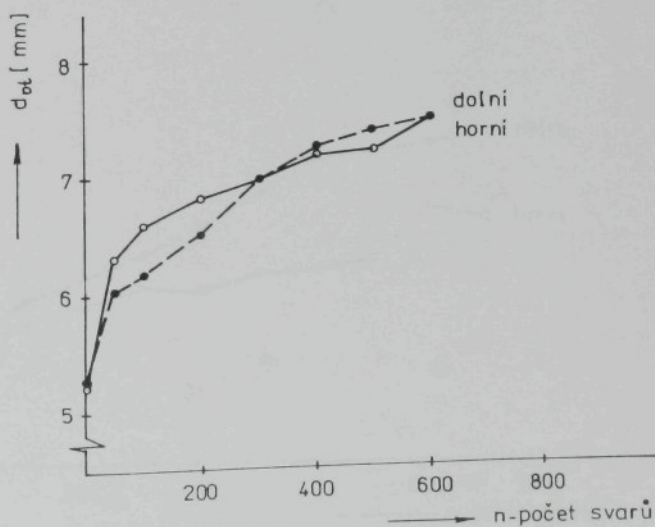
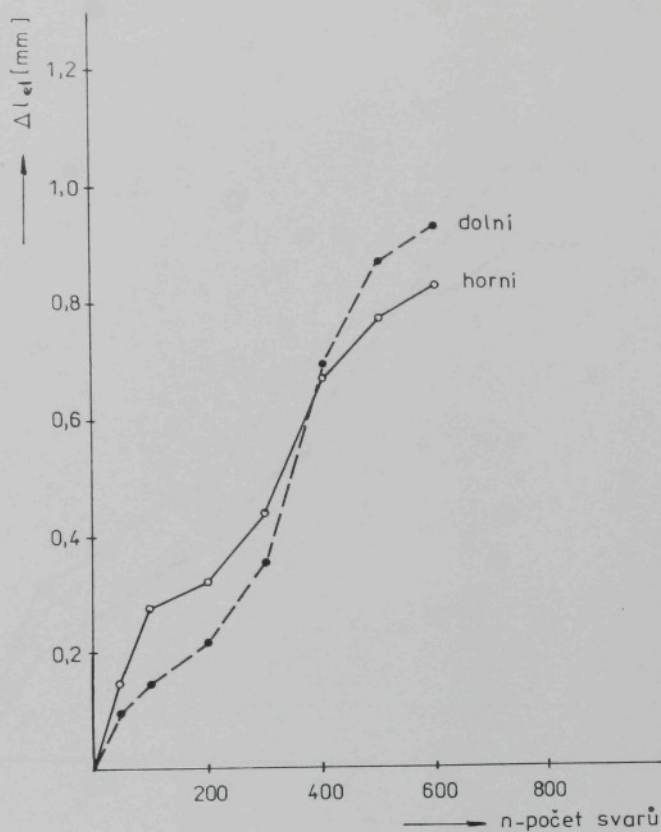


a)

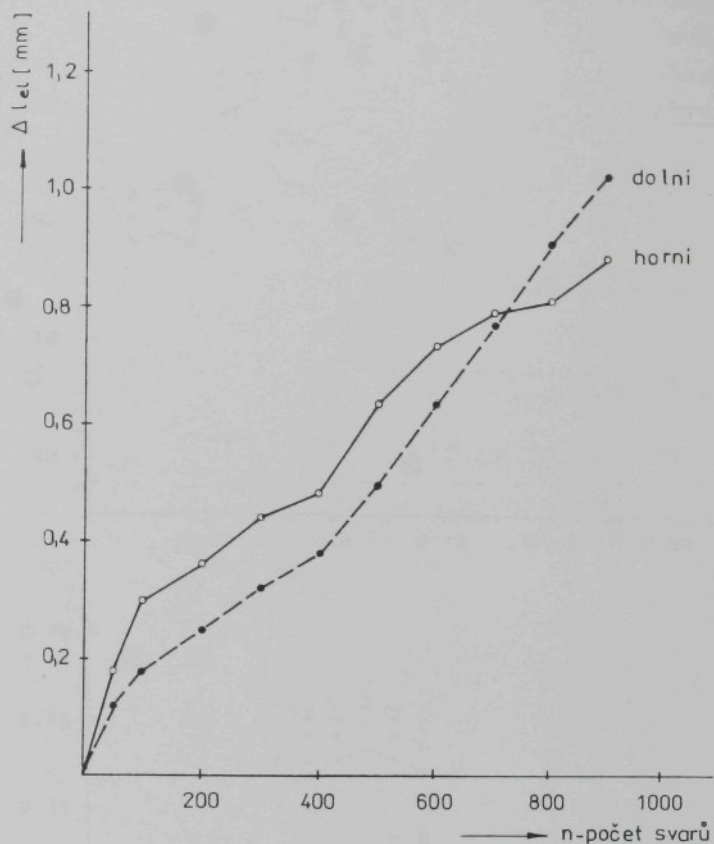


b)

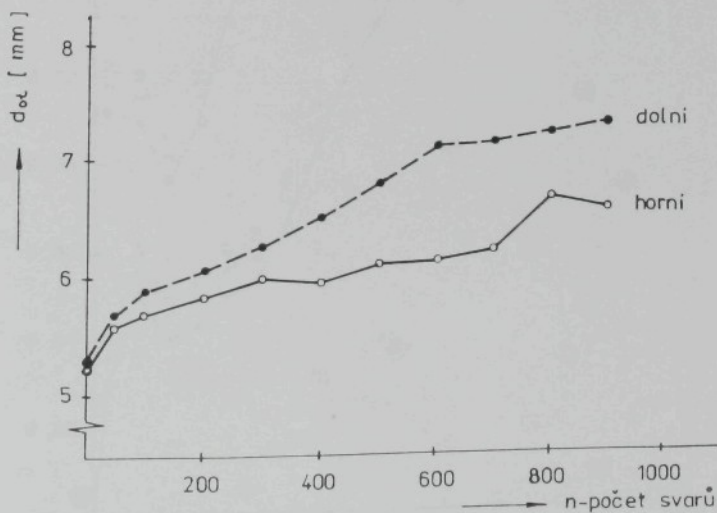
Obr. P-136. Průběh opotřeбенí elektrod - soubor měření č. 7



Obr. P-137. Průběh opotřebení elektrod - soubor měření č. 8



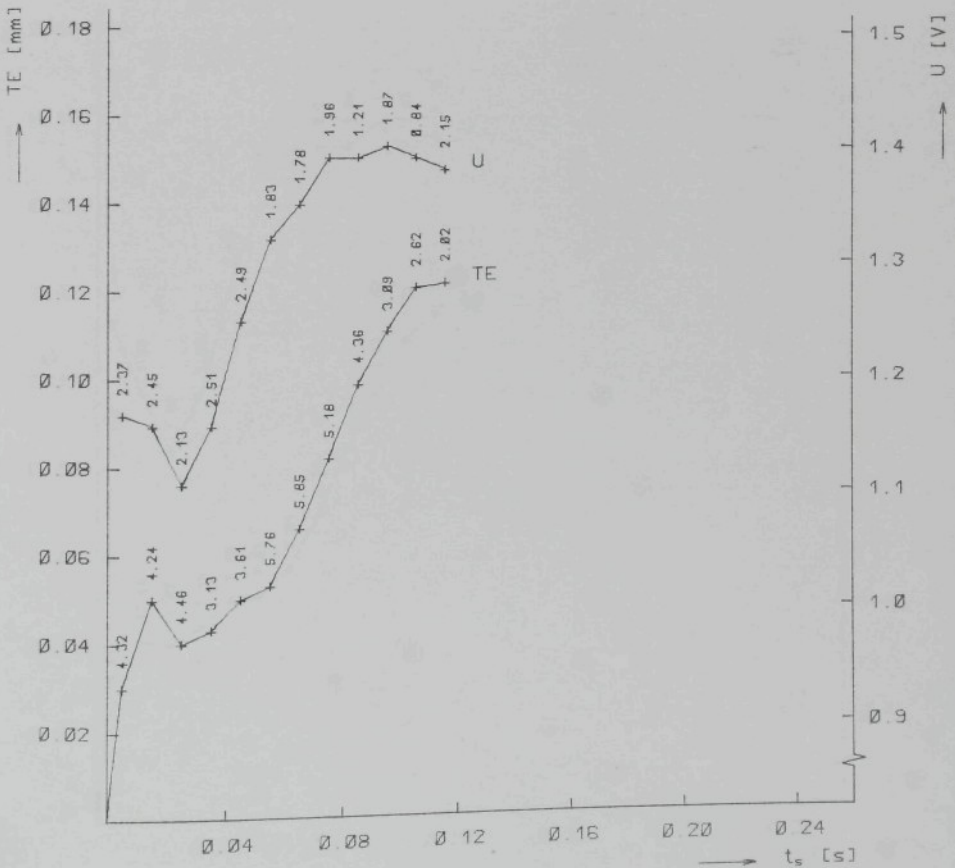
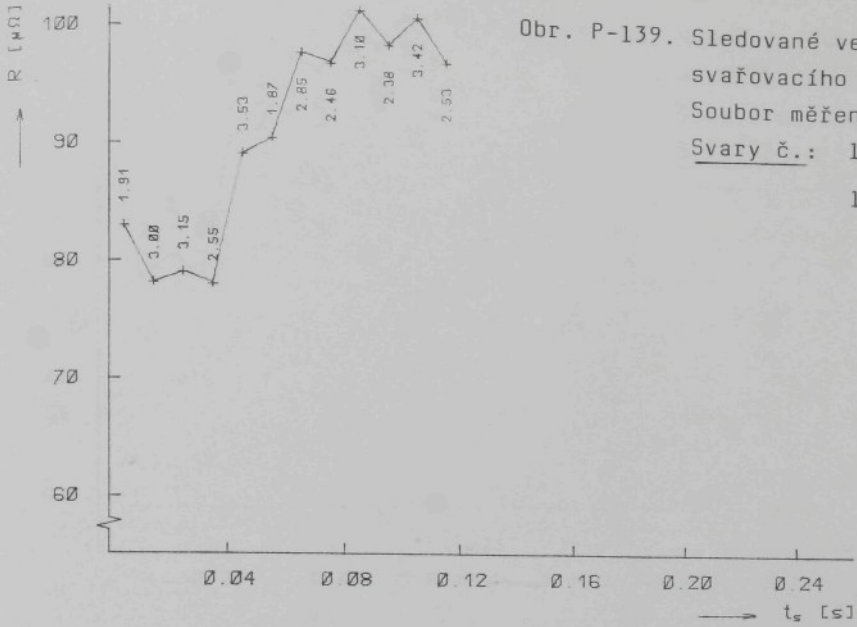
a)

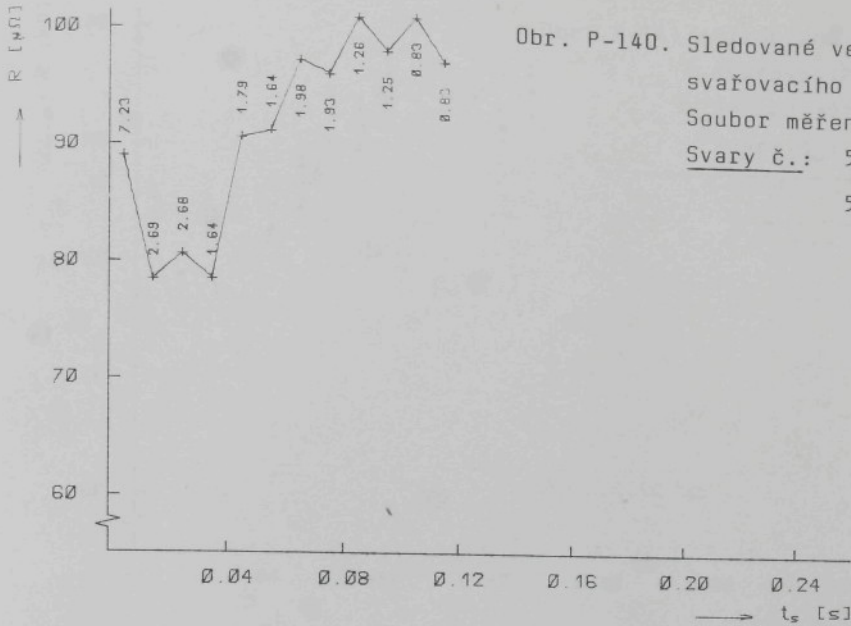


b)

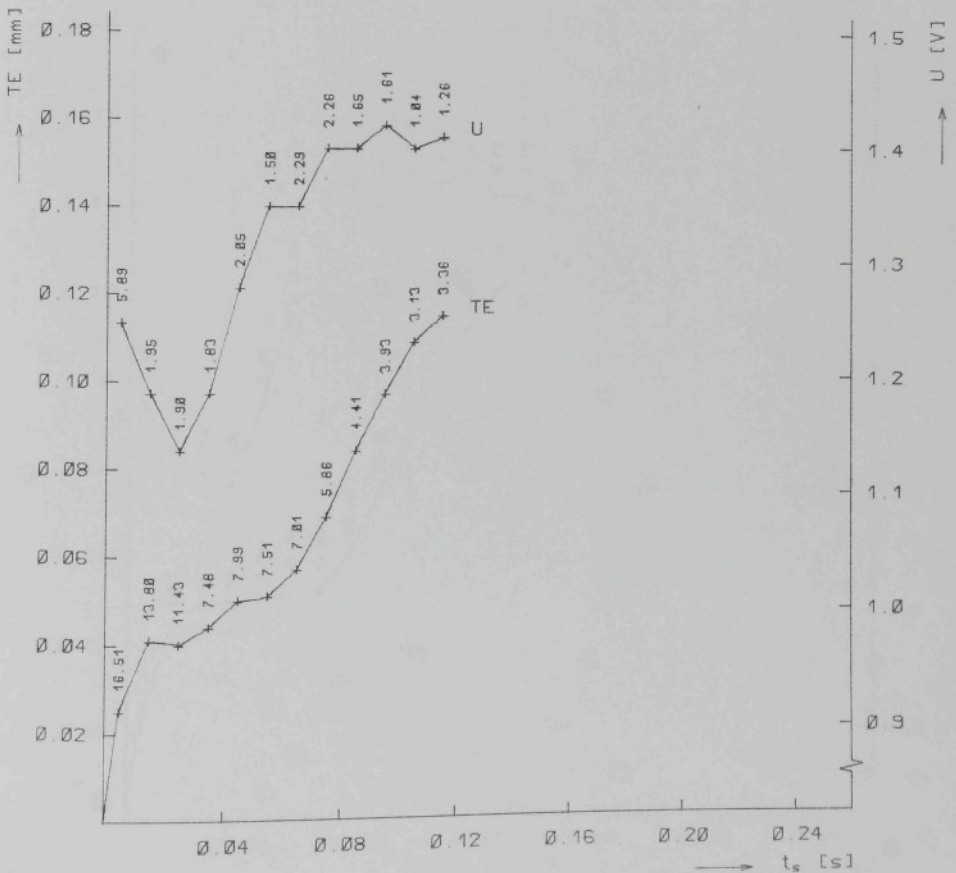
Obr. P-138. Průběh opotřebení elektrod - soubor měření č. 9

Obr. P-139. Sledované veličiny
svarořovacího procesu
Soubor měření č. 9
Svary č.: 11-12,
14-17

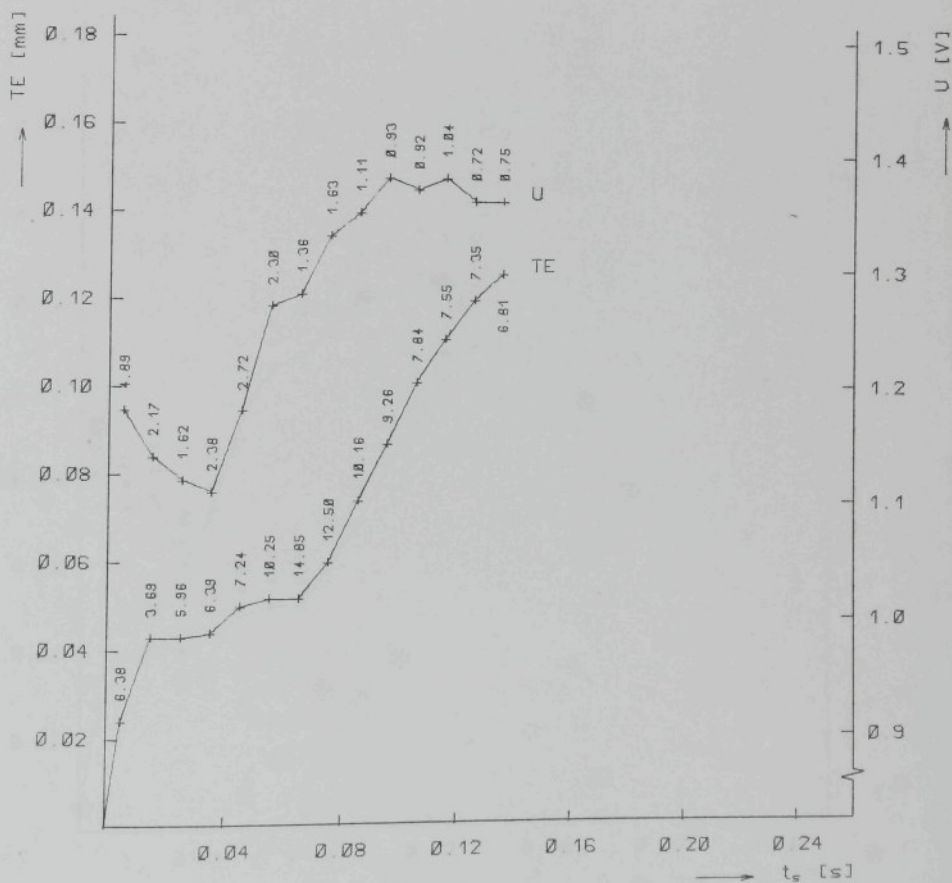
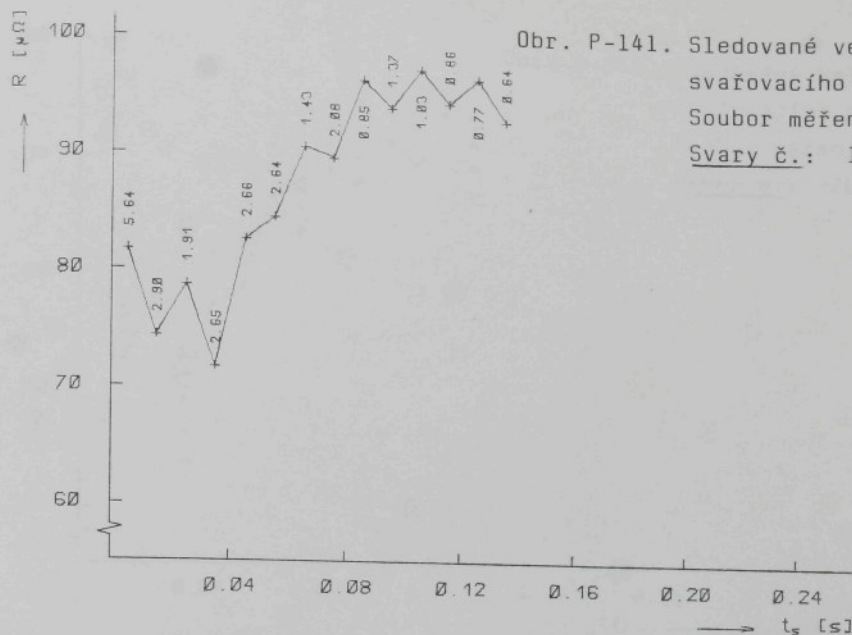




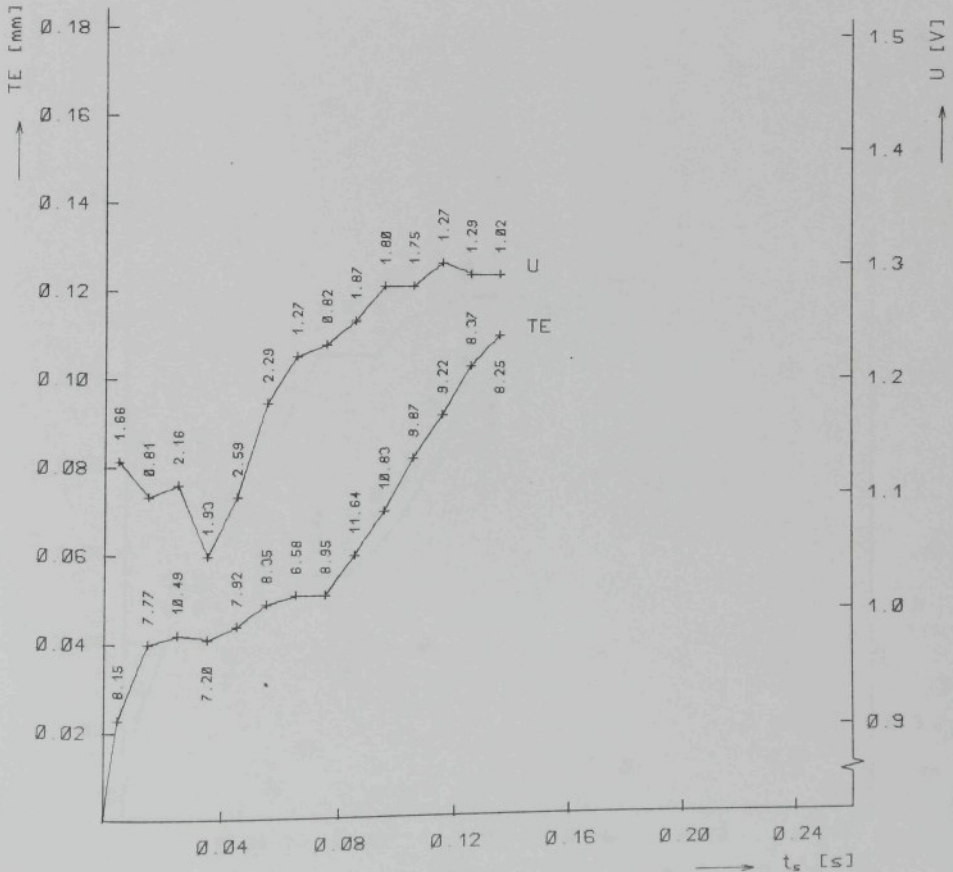
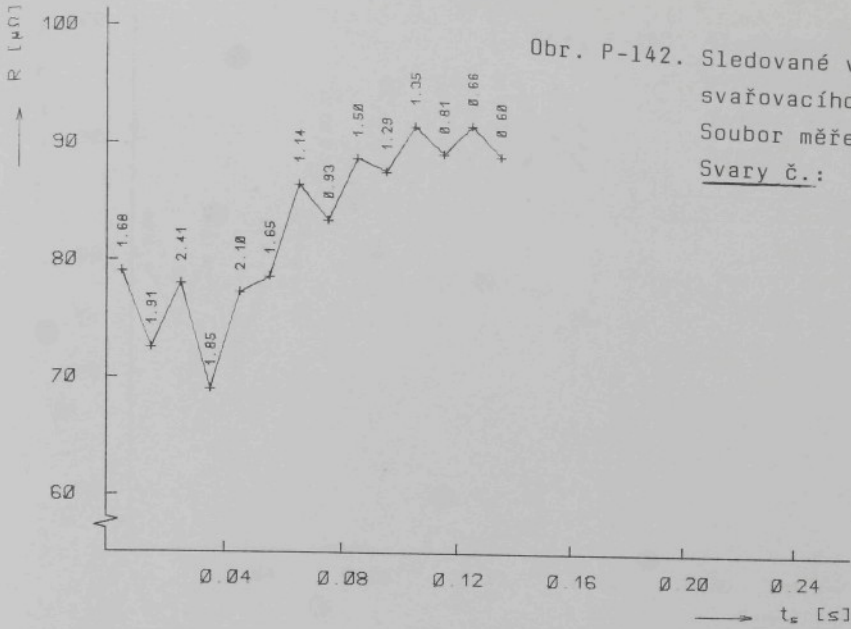
Obr. P-140. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 9
Svary č.: 51,52,
54-59

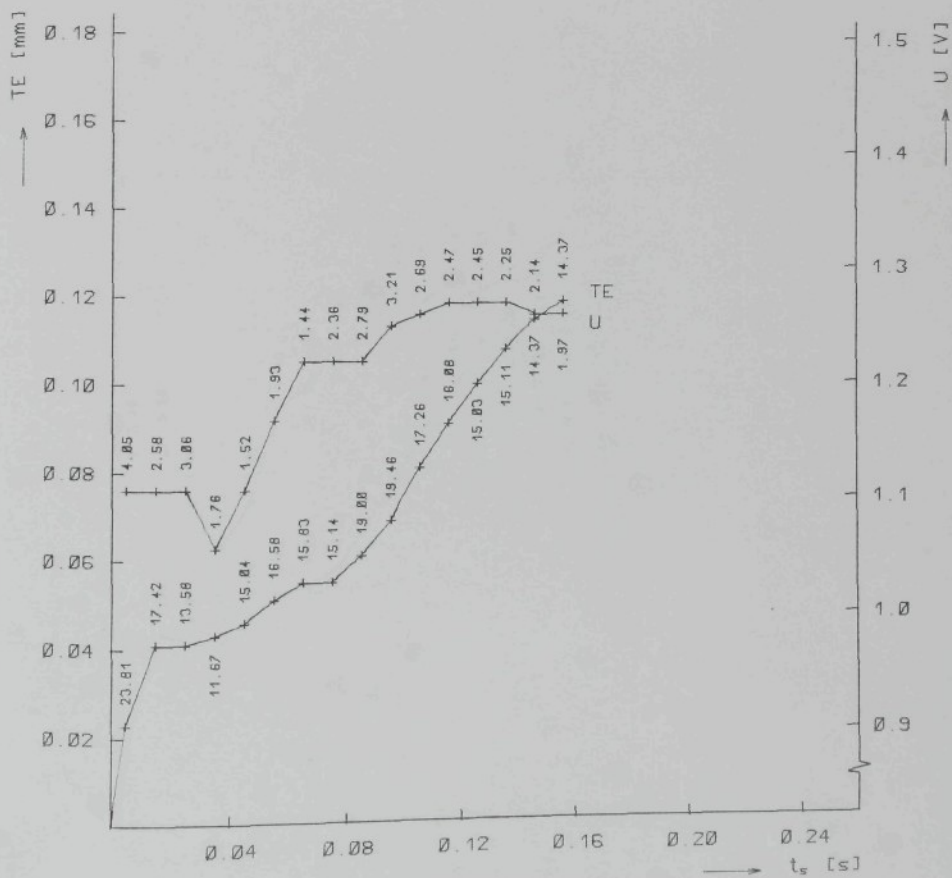
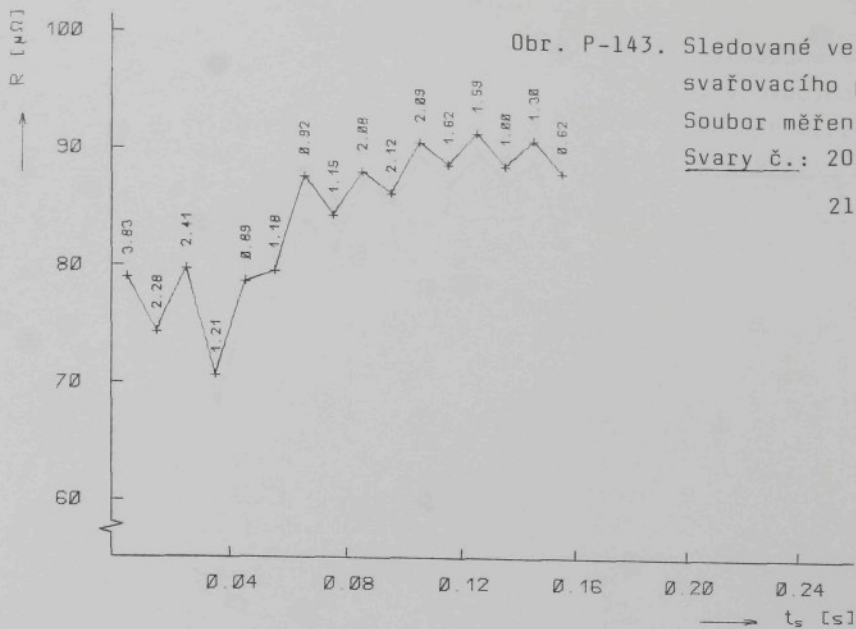


Obr. P-141. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 9
Svary č.: 104-110

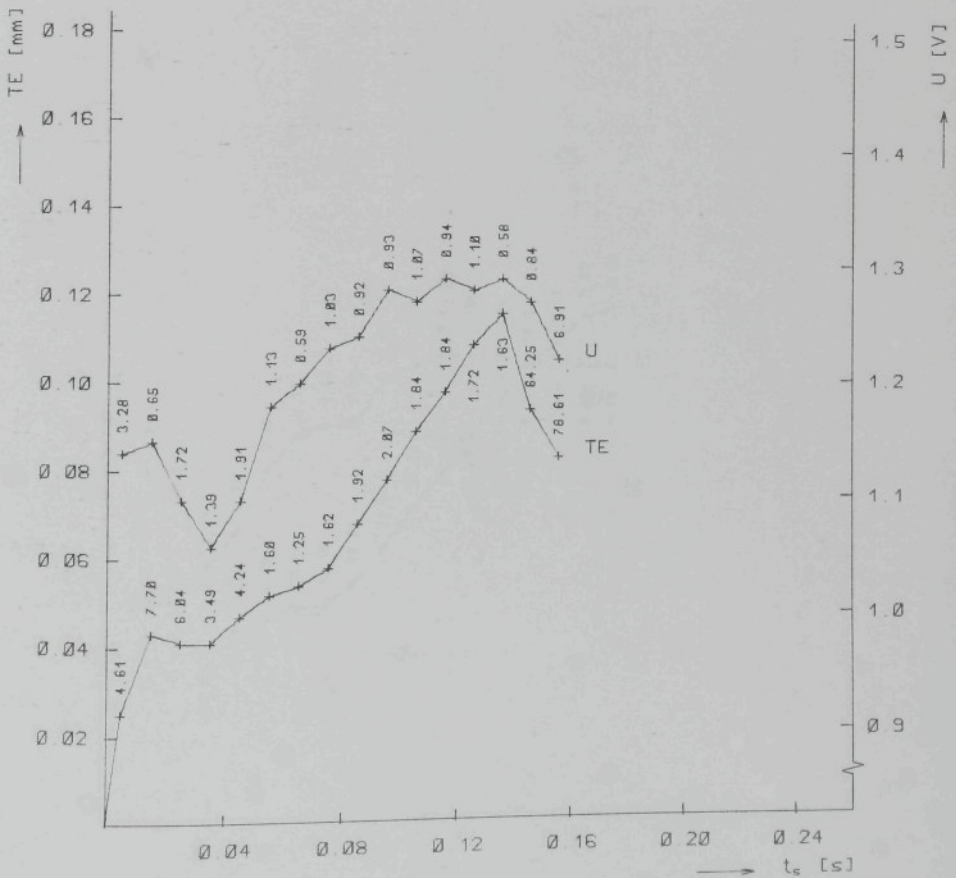
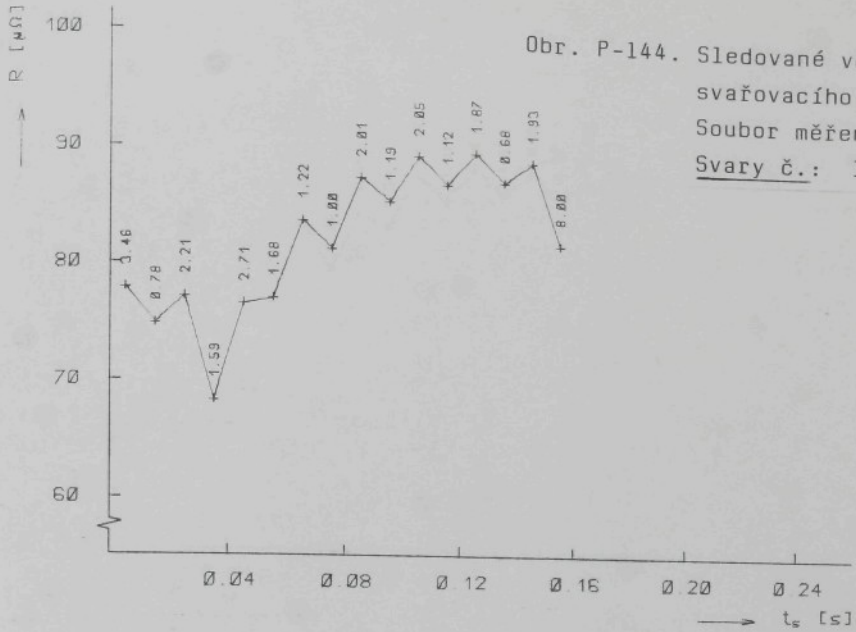


Obr. P-142. Sledované veličiny
svarořovacího procesu
Soubor měření č. 9
Svary č.: 204-210

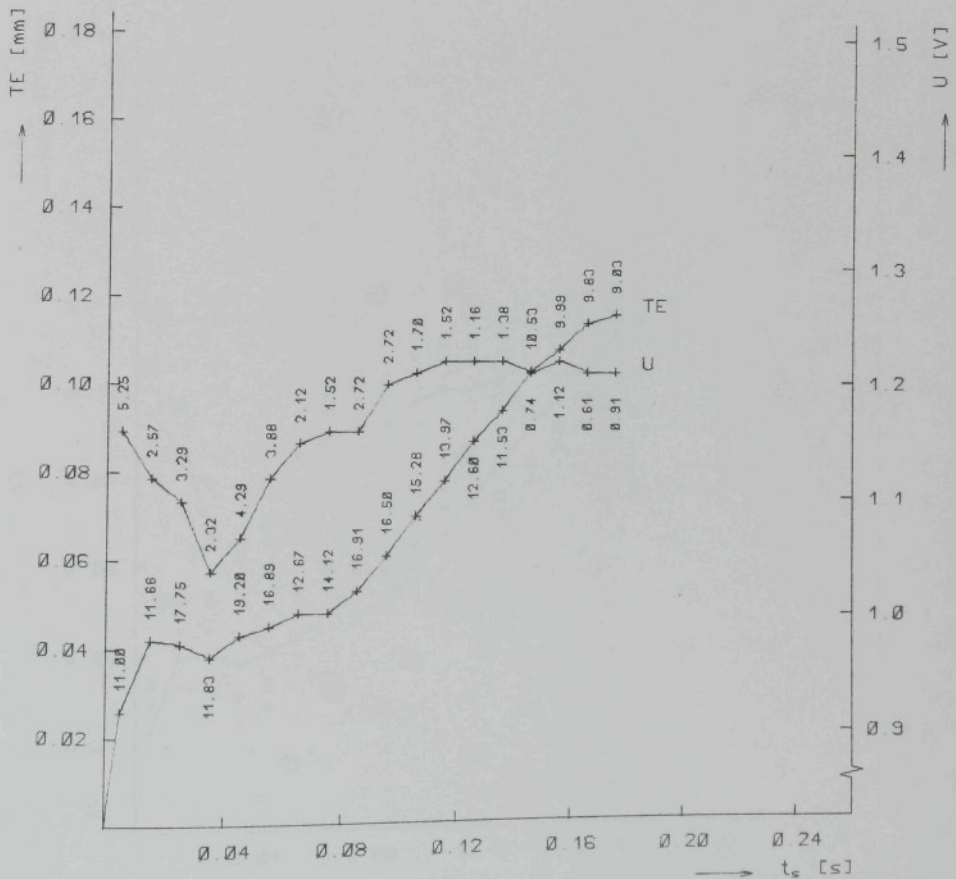
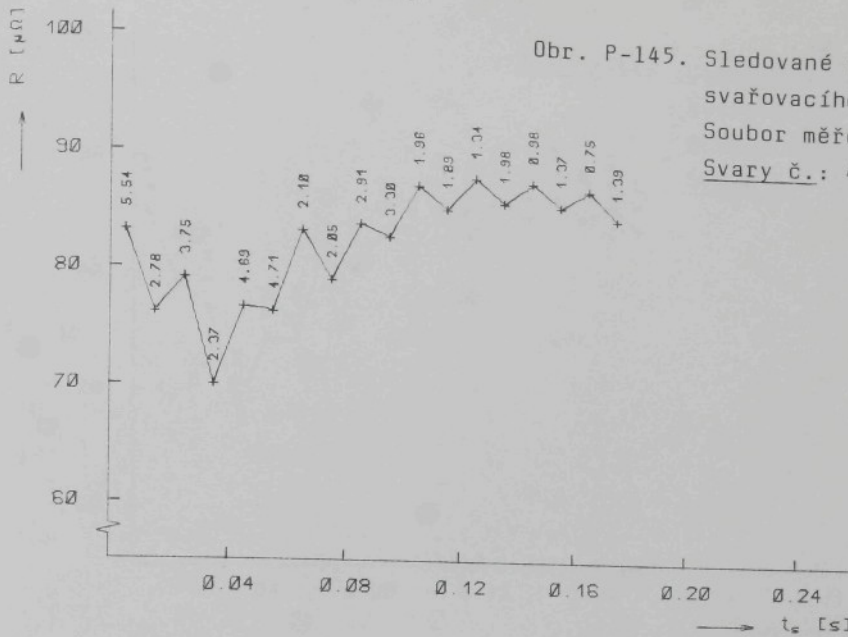


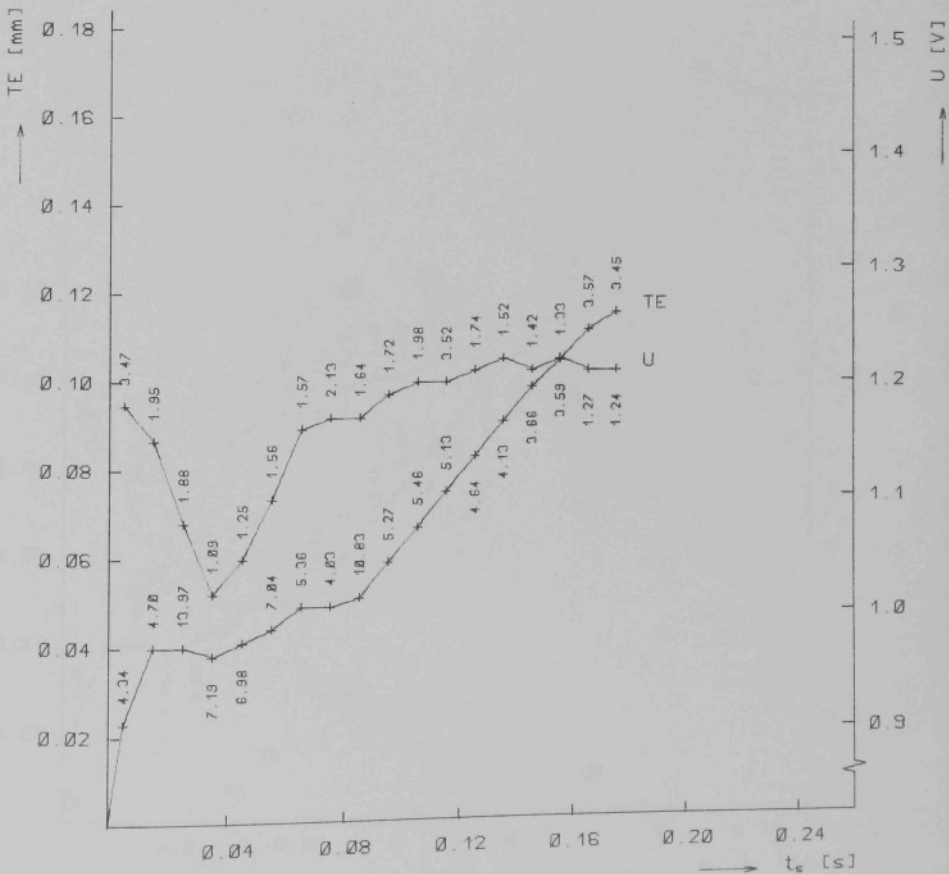
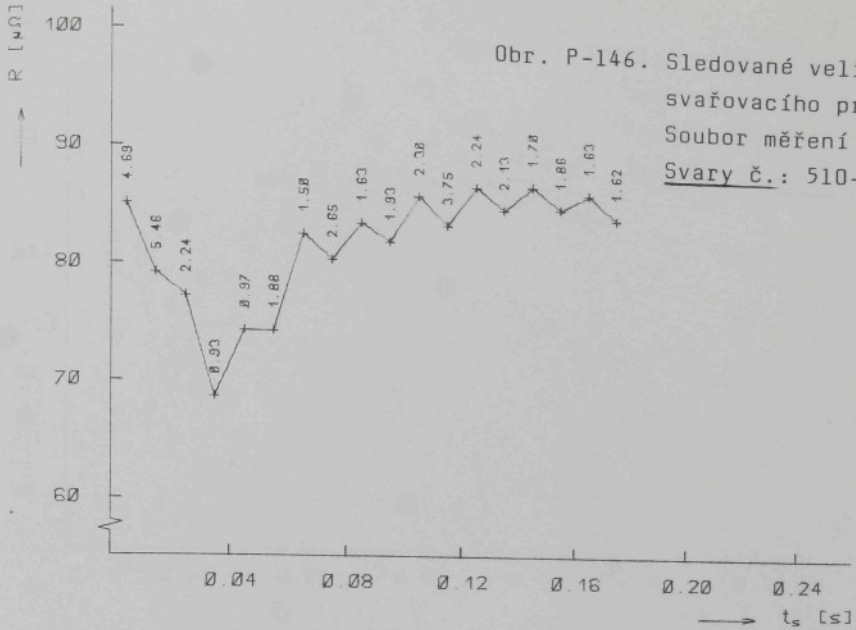


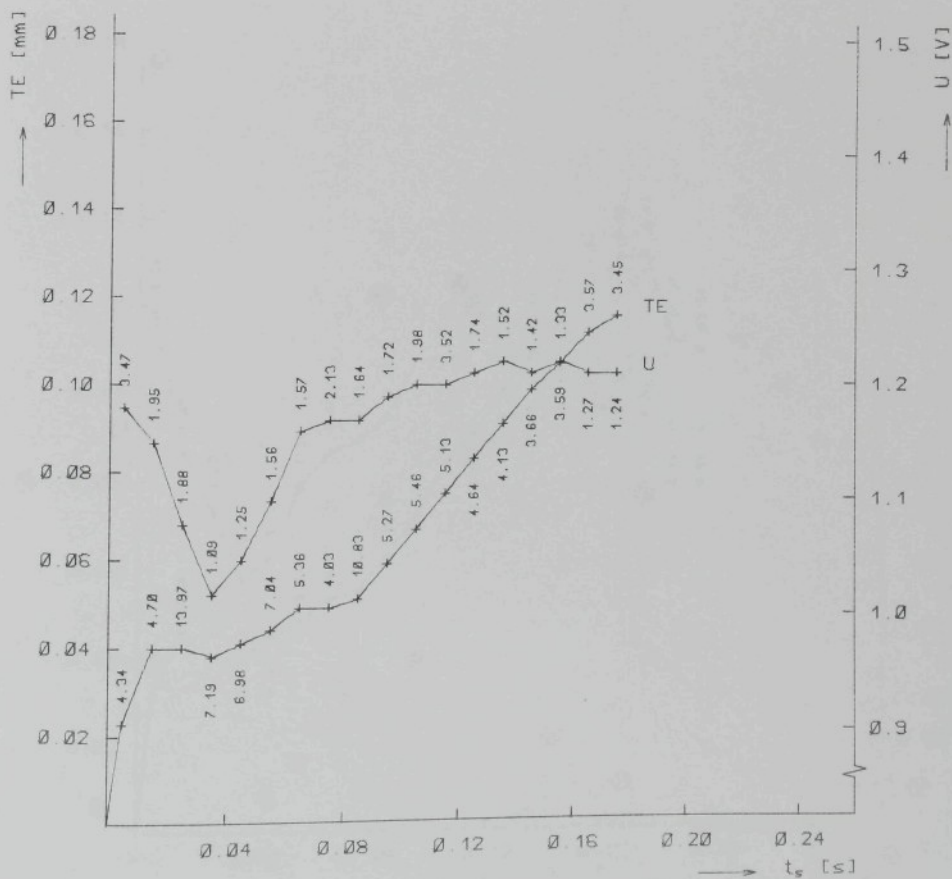
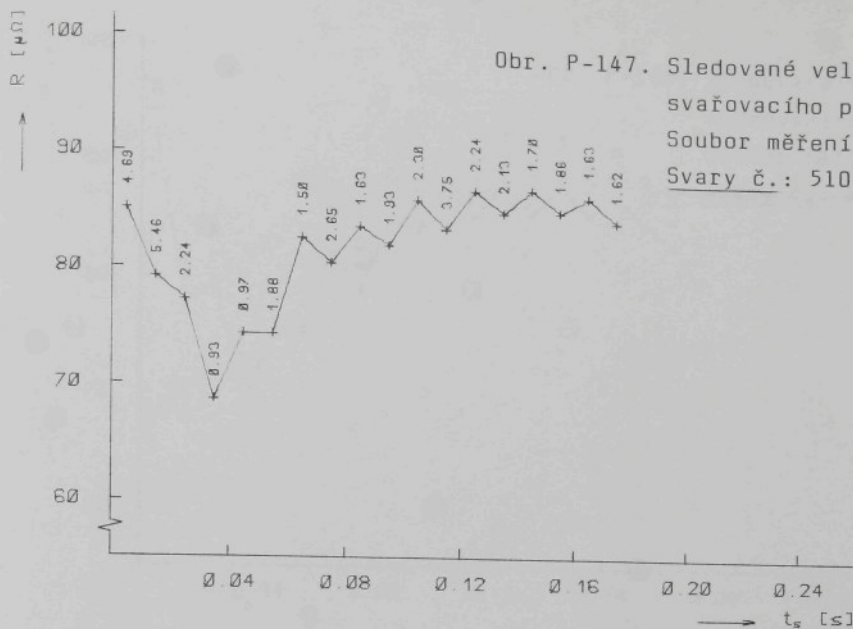
Obr. P-144. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 9
Svary č.: 303-308



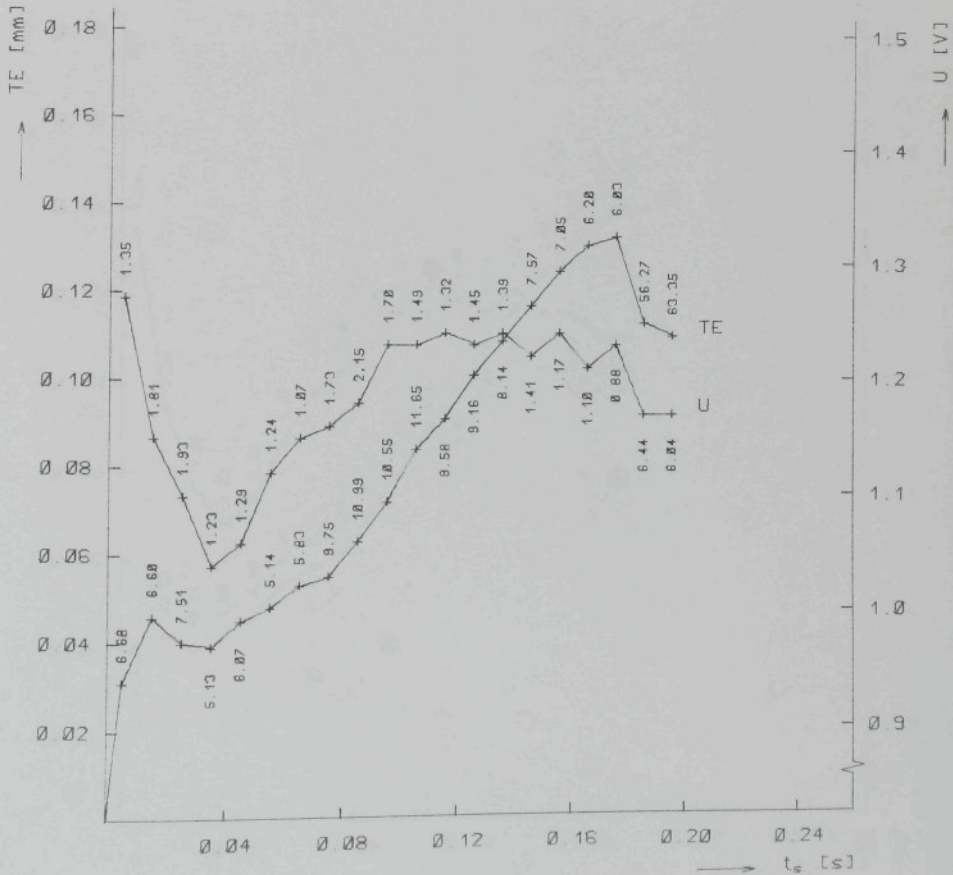
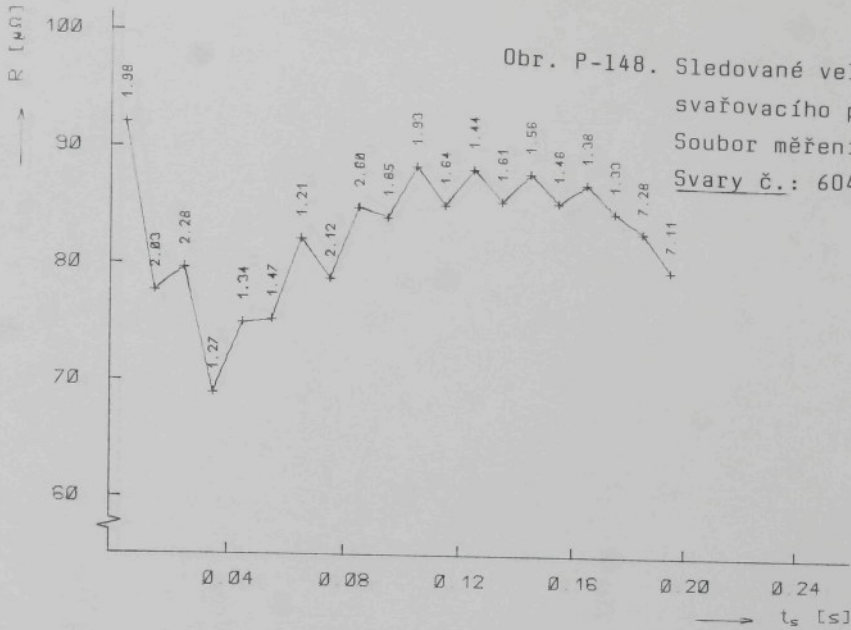
Obr. P-145. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 9
Svary č.: 403-409

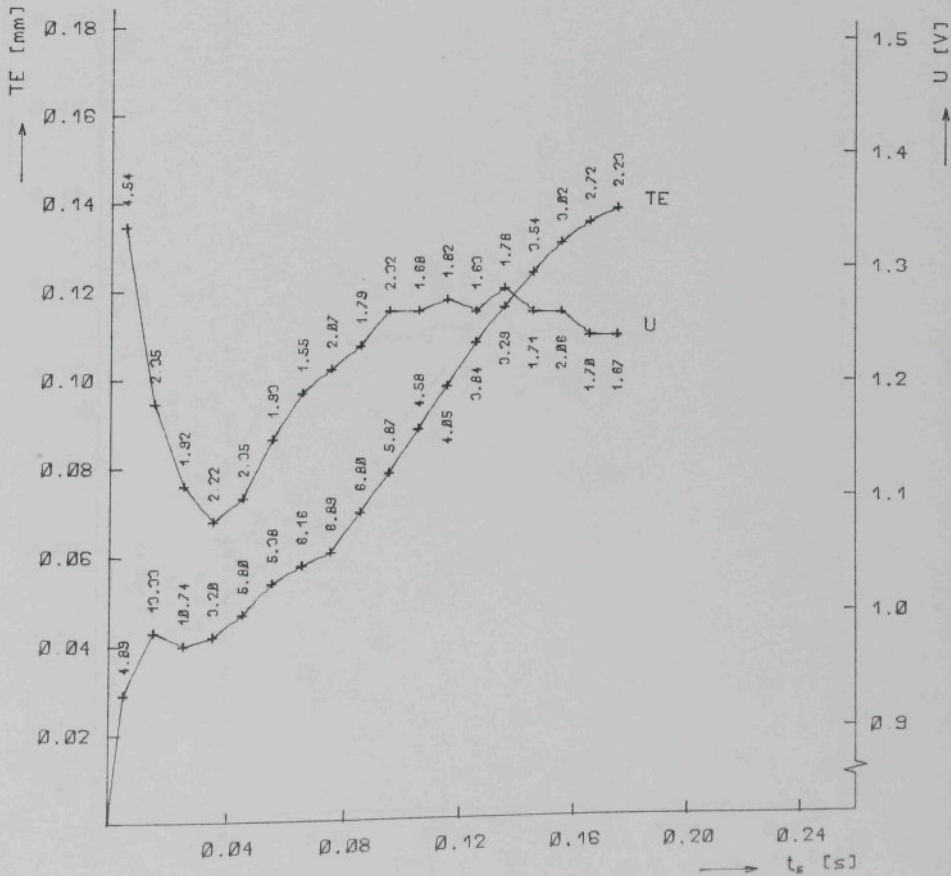
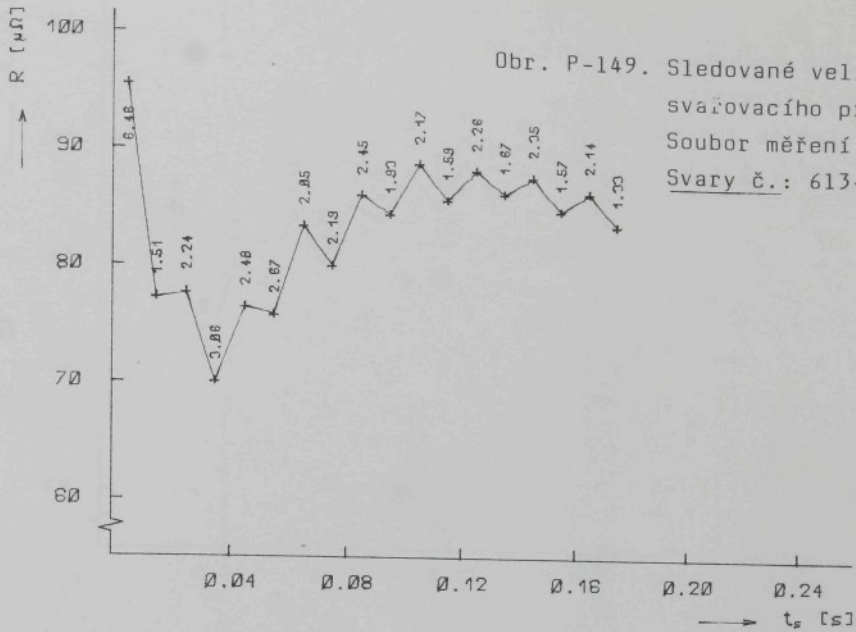


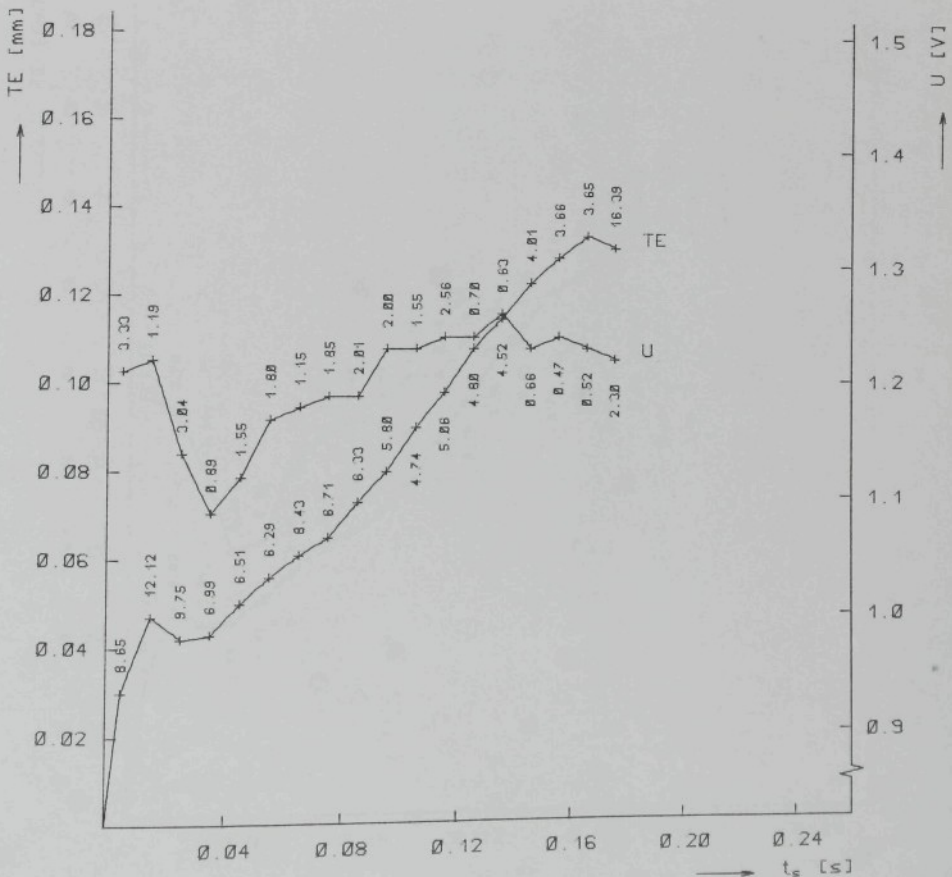
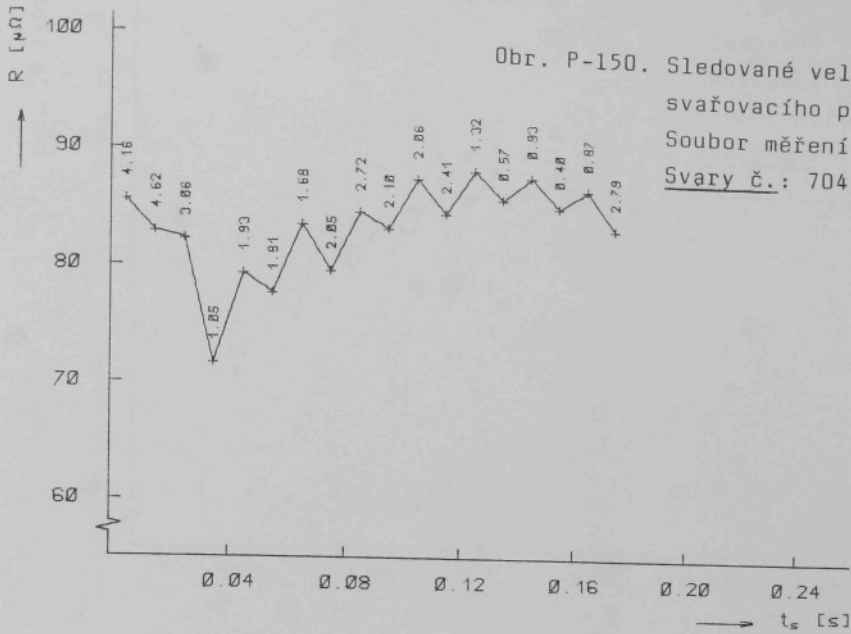


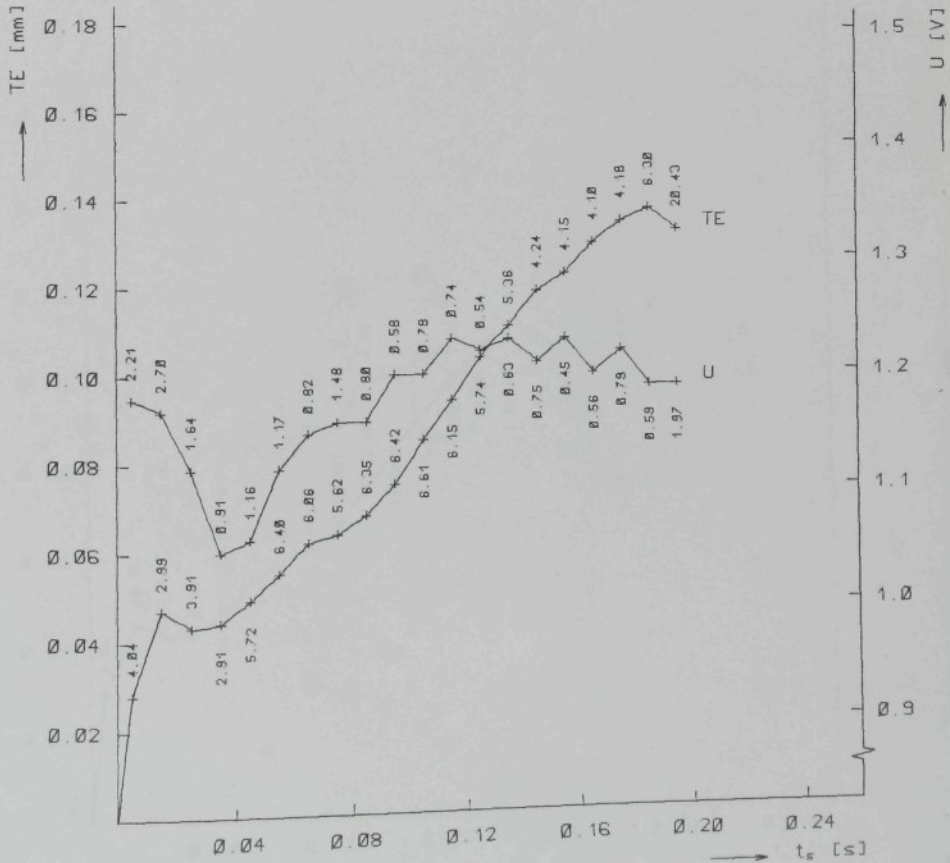
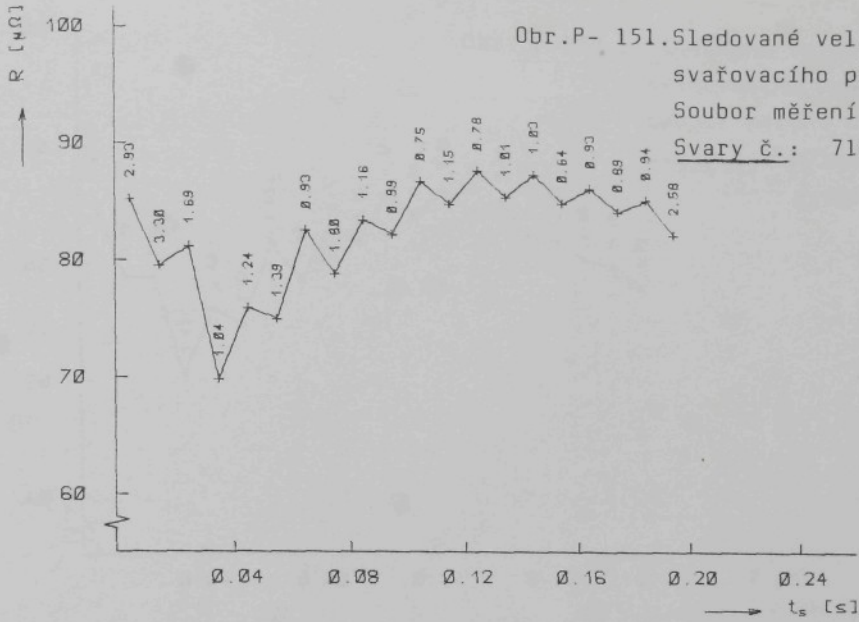


Obr. P-148. Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 9
Svary č.: 604-610



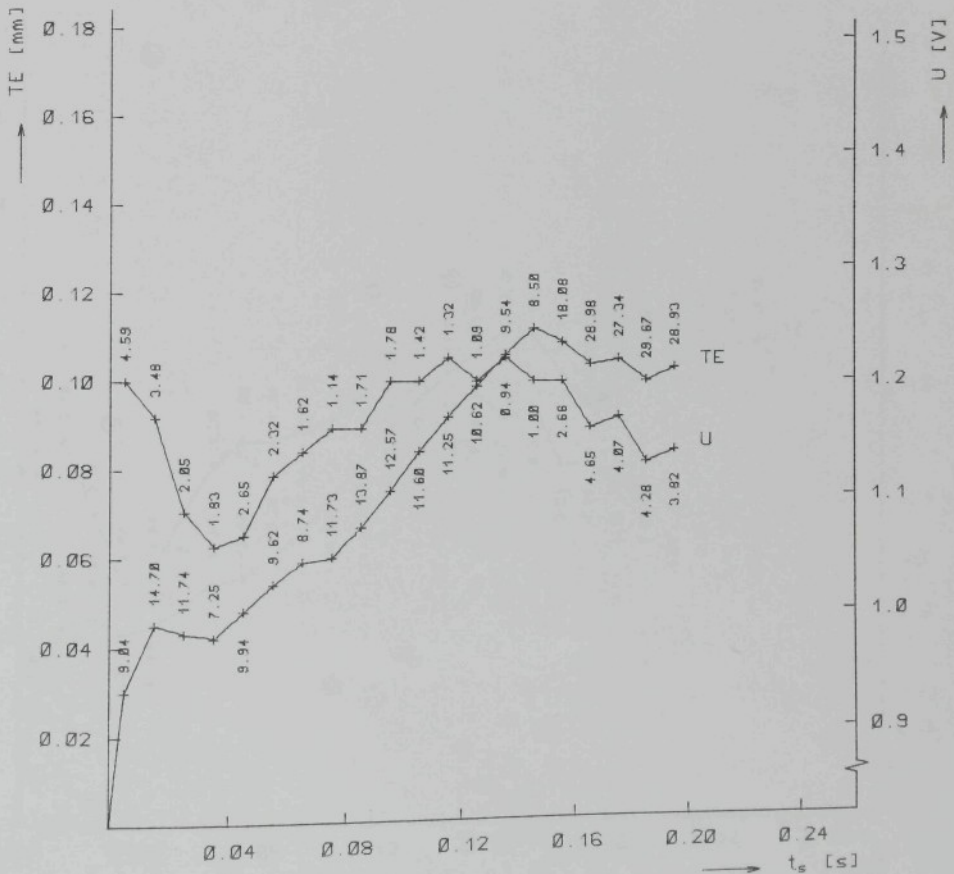
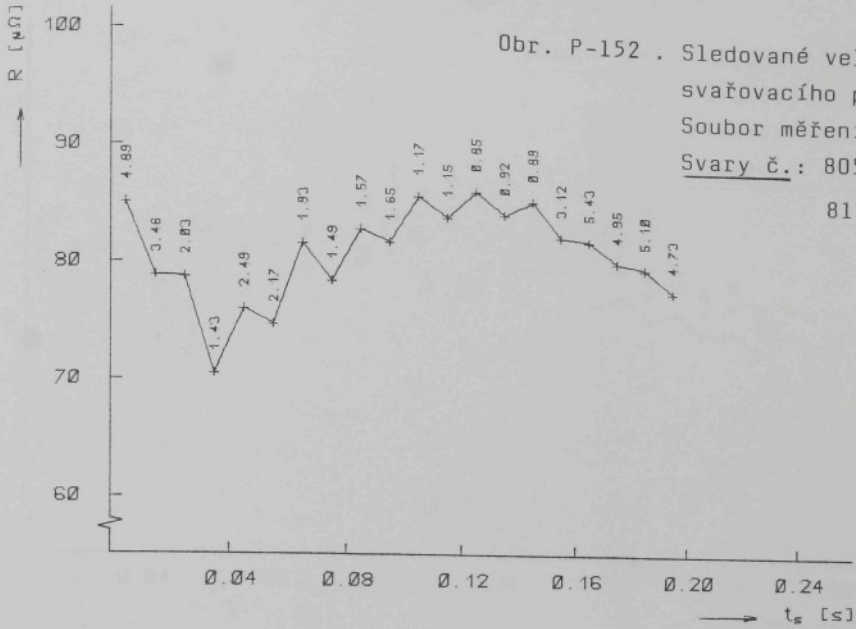




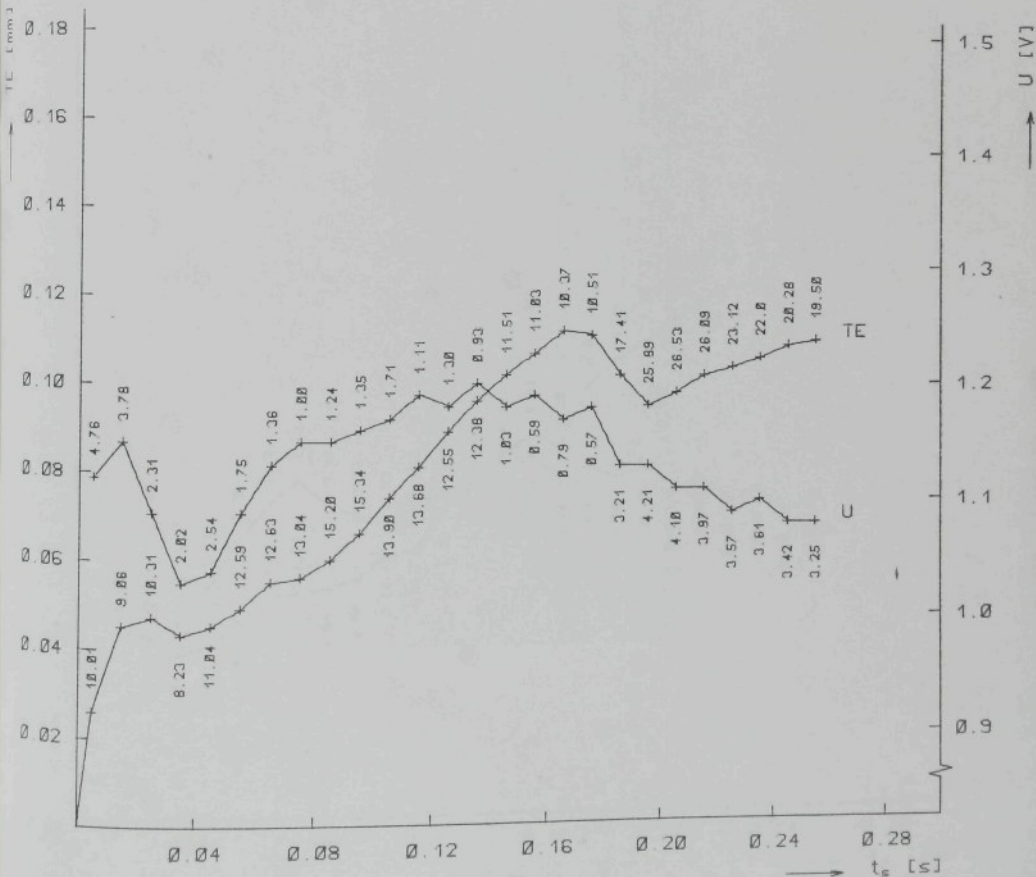
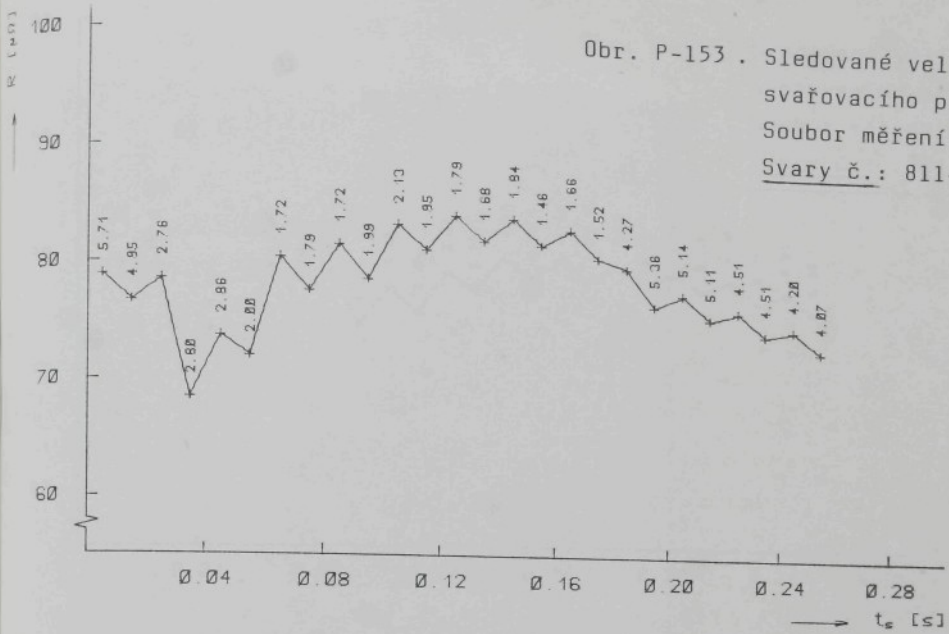


Obr. P-152 . Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 9
Svary č.: 805-810,

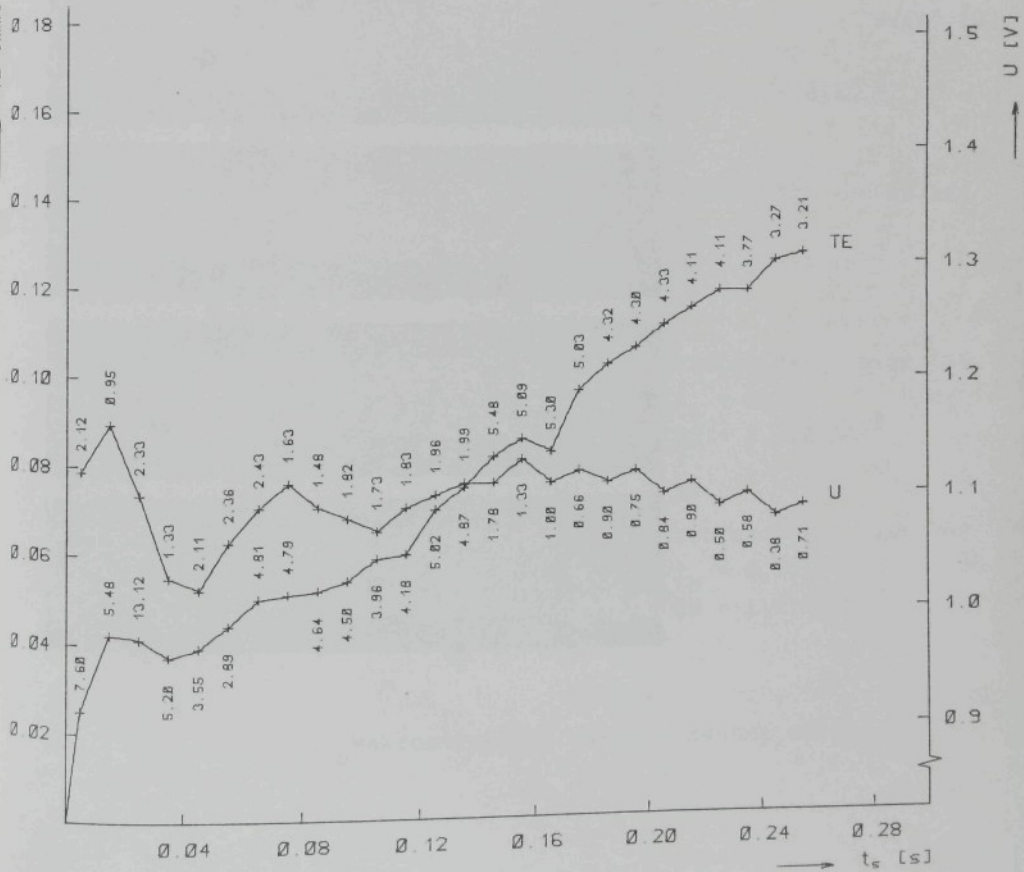
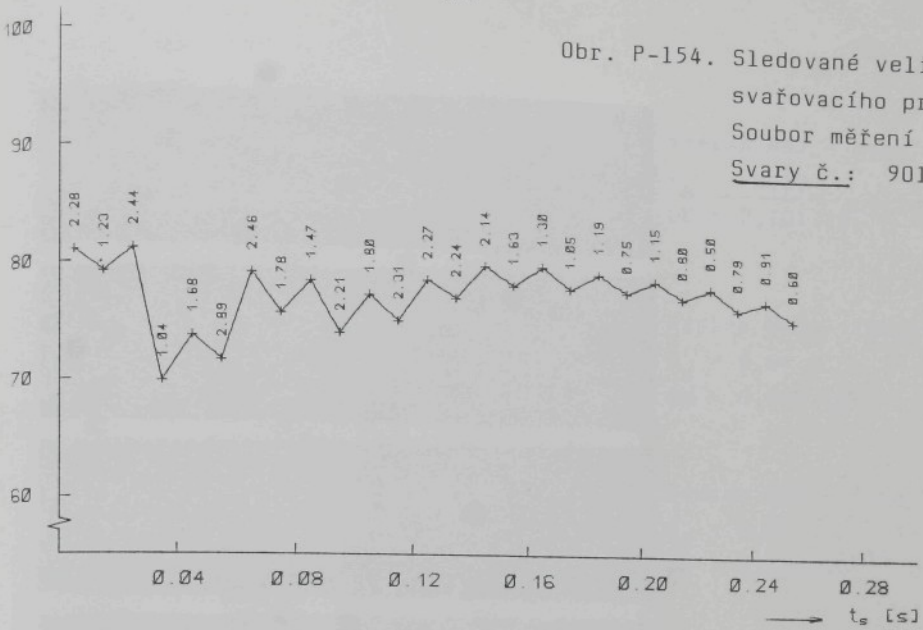
819

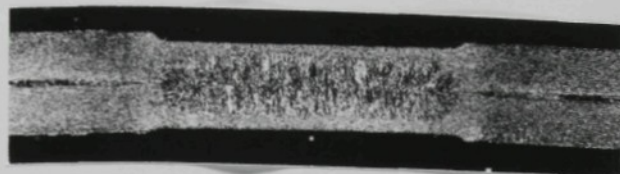


Obr. P-153 . Sledované veličiny
svařovacího procesu
Soubor měření č. 9
Svary č.: 811-818



Obr. P-154. Sledované veličiny
svaročacího procesu
Soubor měření č. 9
Svary č.: 901-906

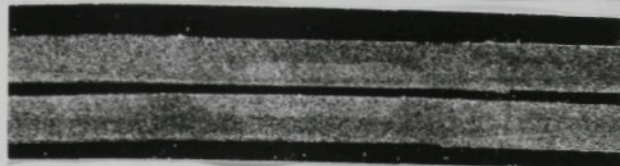




Vzorek 847 - svar 16

$$t_s = 0,12$$

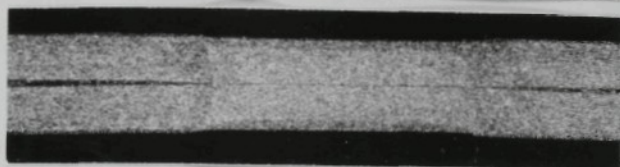
$$SU = 2,101 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 849 - "svar" 18

$$t_s = 0,04$$

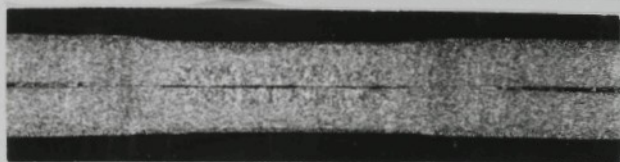
$$SU = 0,029 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 850 - "svar" 19

$$t_s = 0,06$$

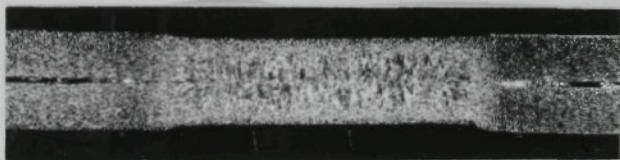
$$SU = 0,308 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 851 - "svar" 20

$$t_s = 0,08$$

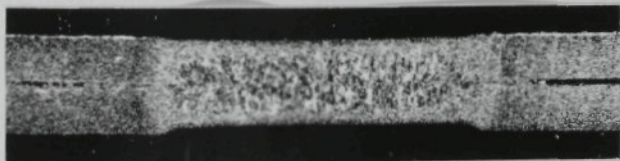
$$SU = 0,638 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 857 - svar 56

$$t_s = 0,12$$

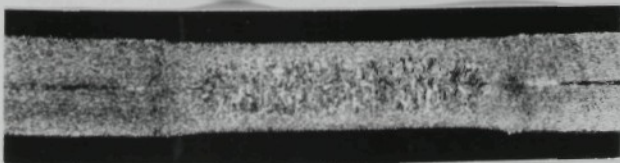
$$SU = 1,505 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 866 - svar 108

$$t_s = 0,14$$

$$SU = 2,218 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 876 - svar 208

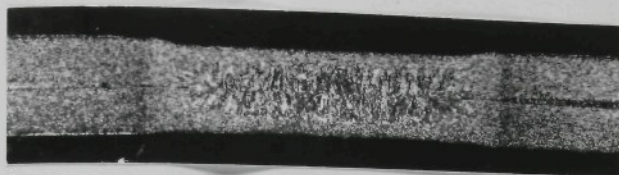
$$t_s = 0,14$$

$$SU = 1,978 \cdot 10^{-2}$$

Nital 3 %

10 x

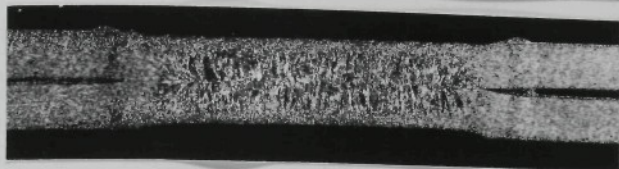
Obr. P-155.1. Makrostruktury svarů - soubor měření č. 9



Vzorek 881 - svar 213

$$t_s = 0,16$$

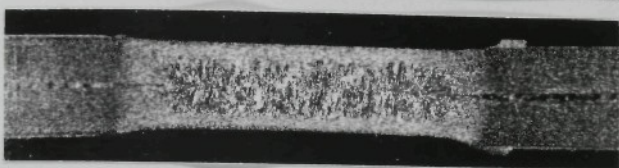
$$SU = 2,043 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 887- svar 305

$$t_s = 0,16$$

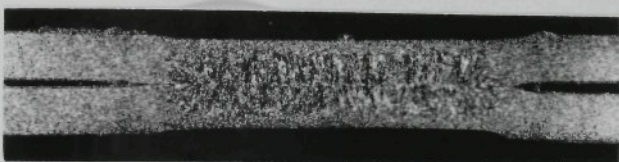
$$SU = 1,873 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 896 - svar 305

$$t_s = 0,18$$

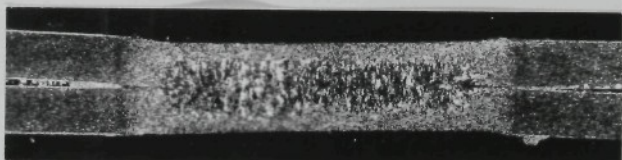
$$SU = 1,624 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 903 - svar 505

$$t_s = 0,22$$

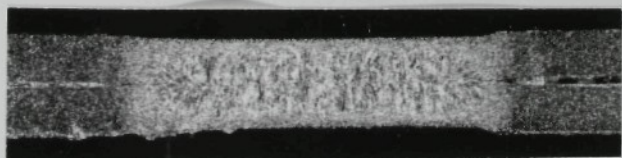
$$SU = 2,448 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 911 - svar 515

$$t_s = 0,18$$

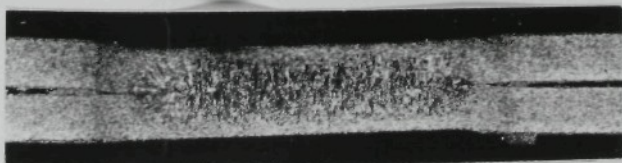
$$SU = 2,375 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 916 - svar 605

$$t_s = 0,20$$

$$SU = 2,268 \cdot 10^{-2}$$



Vzorek 924 - svar 615

$$t_s = 0,18$$

$$SU = 2,151 \cdot 10^{-2}$$

Nital 3 %

10 x



Vzorek 933 - svar 707

$t_s = 0,19$

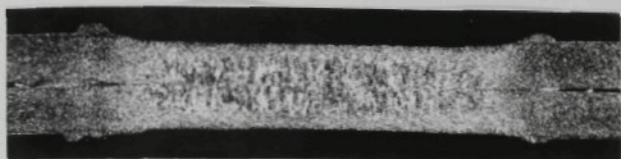
$SU = 1,486 \cdot 10^{-2}$



Vzorek 939 - svar 713

$t_s = 0,20$

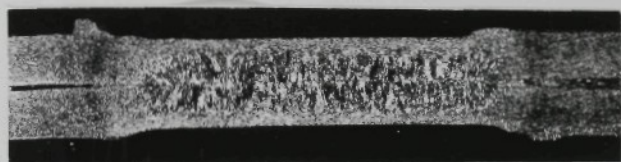
$SU = 2,099 \cdot 10^{-2}$



Vzorek 948 - svar 810

$t_s = 0,20$

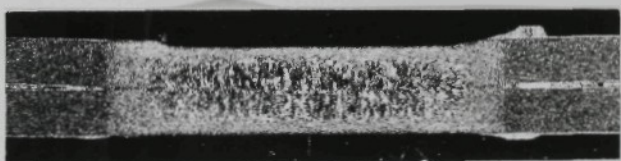
$SU = 2,092 \cdot 10^{-2}$



Vzorek 954 - svar 816

$t_s = 0,20$

$SU = 2,092 \cdot 10^{-2}$



Vzorek 958 - svar 901

$t_s = 0,26$

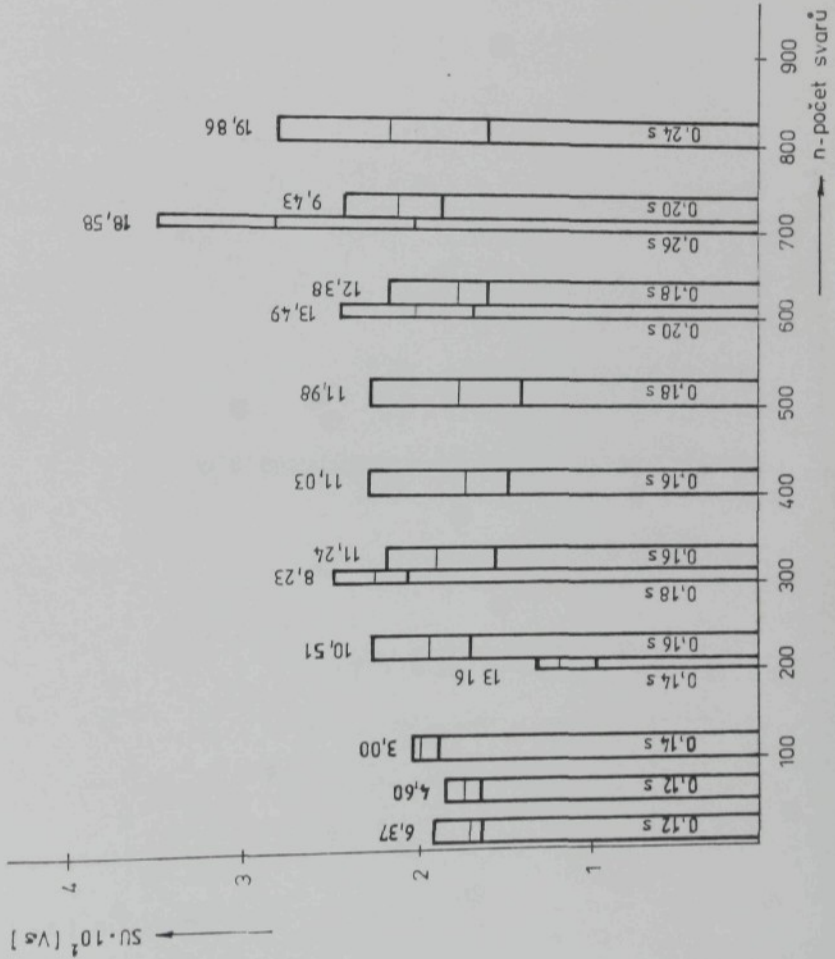
$SU = 1,580 \cdot 10^{-2}$

Nital 3 %

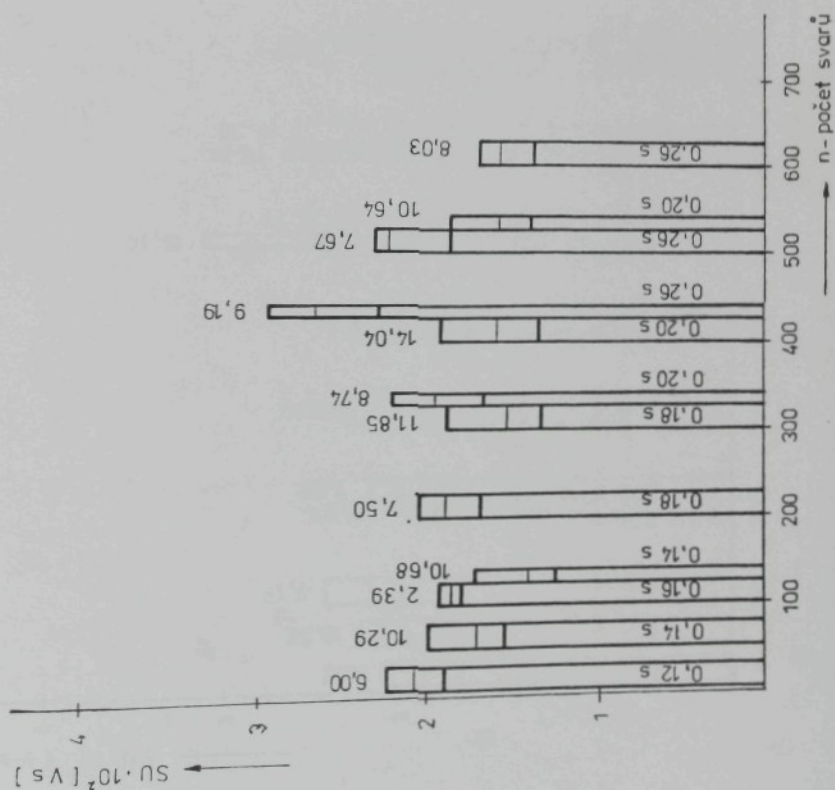
10 x

Obr. P-155.3. Makrostruktury svarů -
soubor měření č. 9

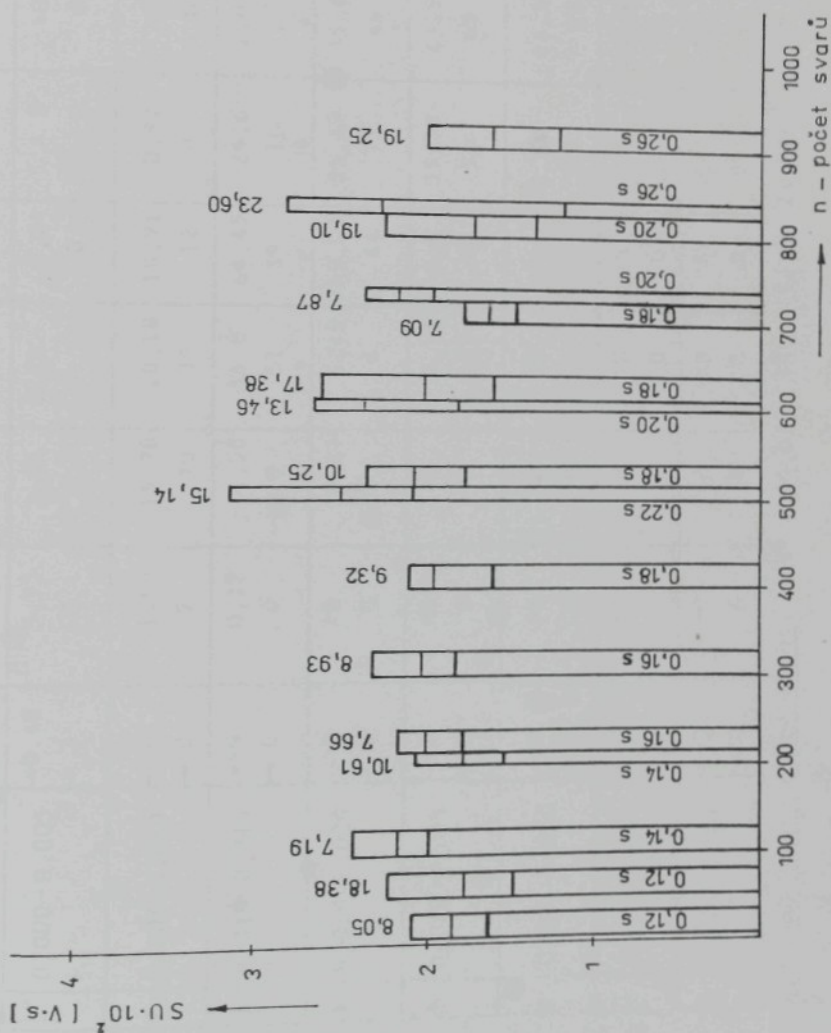
Obr. P-156. Závislost veličiny SU na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 7



Obr. P-157. Závislost veličiny SU na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 8



obr. P-158. Závislost veličiny SU na počtu zhotovených svarů - soubor měření č. 9



Tabulka č. P-4. Test normality pro hodnoty četností prvků
v řádku č. 1

Původní meze y_m	Tř. znak y_t	Přepočtené meze u_y	Teor. četnost n_t	Exp. čet- nost
2,5 - 3	2,75	$(-\infty); -1,057$	2,91	3
3 - 3,5	3,25	$-1,057; 0$	7,09	7
3,5 - 4	3,75	0, 1,057	7,09	7
4 - 4,5	4,25	$1,057; (+\infty)$	2,91	3
<u>Výsledek testu:</u> $\chi^2 = 0,008$ $\chi^2_{0,05}(1) = 3,841$ Hypotéza H_0 se přijímá				

Tabulka č. P-5. Test normality pro hodnoty četností prvků
v řádku č. 2

Původní meze y_m	Tř. znak y_t	Přepočtené meze u_y	Teor. četnost n_t	Exp. čet- nost
3 - 3,5	3,25	$(-\infty); -1,789$	2,54	2
3,5 - 4	3,75	$-1,789; -0,440$	20,23	20
4 - 4,5	4,25	$-0,440; 0,909$	33,69	35
4,5 - 5	4,75	$0,909; (+\infty)$	12,54	12
<u>Výsledek testu:</u> $\chi^2 = 0,192$ $\chi^2_{0,05}(1) = 3,841$ Hypotéza H_0 se přijímá				

Tabulka č. P-6. Test normality pro hodnoty četností prvků
v řádku č. 3

Původní meze y_m	Tř. znak y_t	Přepočtené meze u_y	Teor. četnost n_t	Exp. čet- nost
4 - 4,5	4,25	$(-\infty); -0,342$	40,65	51
4,5 - 5	4,75	$-0,342; 0,698$	43,41	39
5 - 5,5	5,25	$0,698; 1,738$	22,38	10
5,5 - 6	5,75	$1,738; (+\infty)$	4,56	11
<u>Výsledek testu:</u> $\chi^2 = 16,411$ $\chi^2_{0,05}(1) = 3,841$ Hypotéza H_0 se zamítá				

Tabulka č. P-7. Test normality pro hodnoty četností prvků
v řádku č. 4

Původní meze y_m	Tř. znak y_t	Přepočtené meze u_y	Teor. četnost n_t	Exp. čet- nost
4 - 4,5	4,25	$(-\infty); -1,73$	7,6	6
4,5 - 5	4,75	$-1,73; -0,64$	39,6	44
5 - 5,5	5,25	$-0,64; 0,46$	75,3	73
5,5 - 6	5,75	$0,46; 1,56$	47,6	46
6 - 6,5	6,25	$1,56; (+\infty)$	10,9	12
<u>Výsledek testu:</u> $\chi^2 = 1,06$ $\chi^2_{0,05}(2) = 5,99$ Hypotéza H_0 se přijímá				

Tabulka č. P-8. Test normality pro hodnoty četností prvků
v řádku č. 5

Původní meze y_m	Tř. znak y_t	Přepočtené meze u_y	Teor. četnost n_t	Exp. čet- nost
4,5 - 5	4,75	$(-\infty); -1,63$	6,8	7
5 - 5,5	5,25	$-1,63; -0,454$	36,09	31
5,5-6	5,75	$-0,454; 0,723$	58,09	68
6 - 6,5	6,25	$0,723; 1,9$	27,22	22
6,6 - 7	6,75	$1,9; (+\infty)$	3,79	4
<u>Výsledek testu:</u> $\chi^2 = 3,427$ $\chi^2_{0,05}(2) = 5,99$ Hypotéza H_0 se přijímá				

Tabulka č. P-9. Test normality pro hodnoty četností prvků
v řádku č. 6

Původní meze y_m	Tř. znak y_t	Přepočtené meze u_y	Teor. četnost n_t	Exp. čet- nost
5 - 5,5	5,25	$(-\infty); -1,647$	2,99	2
5,5 - 6	5,75	$-1,647; -0,194$	22,4	23
6 - 6,5	6,25	$-0,194; 1,26$	28,39	30
6,5 - 7	6,75	$1,26; (+\infty)$	6,23	5
<u>Výsledek testu:</u> $\chi^2 = 0,677$ $\chi^2_{0,05}(1) = 3,841$ Hypotéza H_0 se přijímá				

Tabulka č. P-10. Test normality pro hodnoty četností prvků
ve sloupci č. 4

Původní meze x_m	Tř. znak x_t	Přepočtené meze u_x	Teor. četnost n_t	Exp. čet- nost
0,005-0,010	0,0025	$(-\infty); -1,766$	3,68	3
0,005-0,010	0,0075	$-1,766 ; -0,236$	34,95	35
0,010-0,015	0,0125	$0,236; 1,294$	47,08	51
0,015-0,020	0,0175	$1,294: (+\infty)$	9,29	6
<u>Výsledek testu:</u> $\chi^2 = 1,617$ $\chi^2_{0,05(1)} = 3,841$ Hypotéza H_0 se přijímá				

Tabulka č. P-11. Test normality pro hodnoty četností prvků
ve sloupci č. 5

Původní meze x_m	Tř. znak x_t	Přepočtené meze u_x	Teor. četnost n_t	Exp. čet- nost
0,005-0,010	0,0075	$(-\infty); -1,201$	11,72	12
0,010-0,015	0,0125	$-1,201 ; 0,062$	41,8	39
0,015-0,020	0,0175	$0,062 ; 1,325$	39,04	44
0,020-0,025	0,0225	$1,325 ; (+\infty)$	9, 44	7
<u>Výsledek testu:</u> $\chi^2 = 1,455$ $\chi^2_{0,05(1)} = 3,841$ Hypotéza H_0 se přijímá				

Tabulka č. P-12. Test normality pro hodnoty četností prvků ve sloupci č.6

Původní meze x_m	Tř. znak x_t	Přepočtené meze u_x	Teor. četnost n_t	Exp. četnost
0,010-0,015	0,0125	$(-\infty); -1,162$	14,22	10
0,015-0,020	0,0175	$-1,162; 0,462$	64,41	73
0,020-0,025	0,0225	$0,462; 2,086$	34,63	31
0,025-0,030	0,0275	$2,086; (+\infty)$	2,74	2
<u>Výsledek testu:</u> $\chi^2 = 2,978$ $\chi^2_{0,05}(1) = 3,841$ Hypotéza H_0 se přijímá				

Tabulka č. P-13. Test normality pro hodnoty četností prvků ve sloupci č. 7

Původní meze x_m	Tř. znak x_t	Přepočtené meze u_x	Teor. četnost n_t	Exp. četnost
0,010-0,015	0,0125	$(-\infty); -1,437$	11,23	11
0,015-0,020	0,0175	$-1,437; -0,243$	48,97	46
0,020-0,025	0,0225	$-0,243; 0,950$	63,3	68
0,025-0,030	0,0275	$0,950; 2,144$	23,12	23
0,030-0,035	0,0325	$2,144; (+\infty)$	2,37	1
<u>Výsledek testu:</u> $\chi^2 = 1,33$ $\chi^2_{0,05}(2) = 5,99$ Hypotéza H_0 se přijímá				

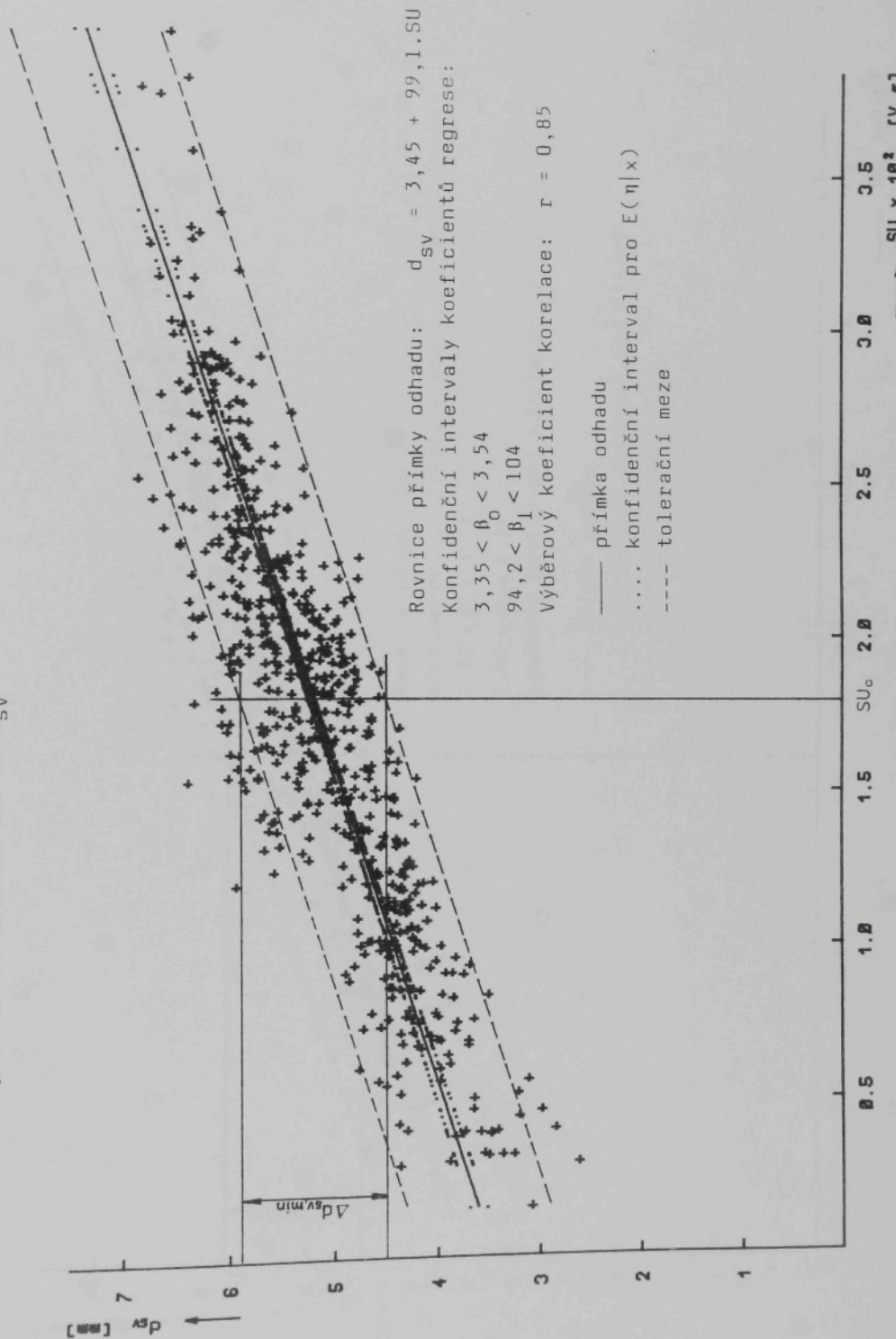
Tabulka č. P-14. Test normality pro hodnoty četností prvků
ve sloupci č. 8

Původní meze x_m	Tř. znak x_t	Přepočtené meze u_x	Teor. četnost n_t	Exp. četnost
0,015-0,020	0,0175	$(-\infty); -1,048$	10,76	12
0,020-0,025	0,0225	$-1,048; -0,021$	25,13	22
0,025-0,030	0,0275	$-0,021; 1,006$	25,64	30
0,030-0,035	0,0325	$1,006; 2,034$	9,94	7
0,035-0,040	0,0375	$2,034; (+\infty)$	1,53	2
Výsledek testu: $\chi^2 = 2,158$ $\chi^2_{0,05}(2) = 5,991$ Hypotéza H_0 se přijímá				

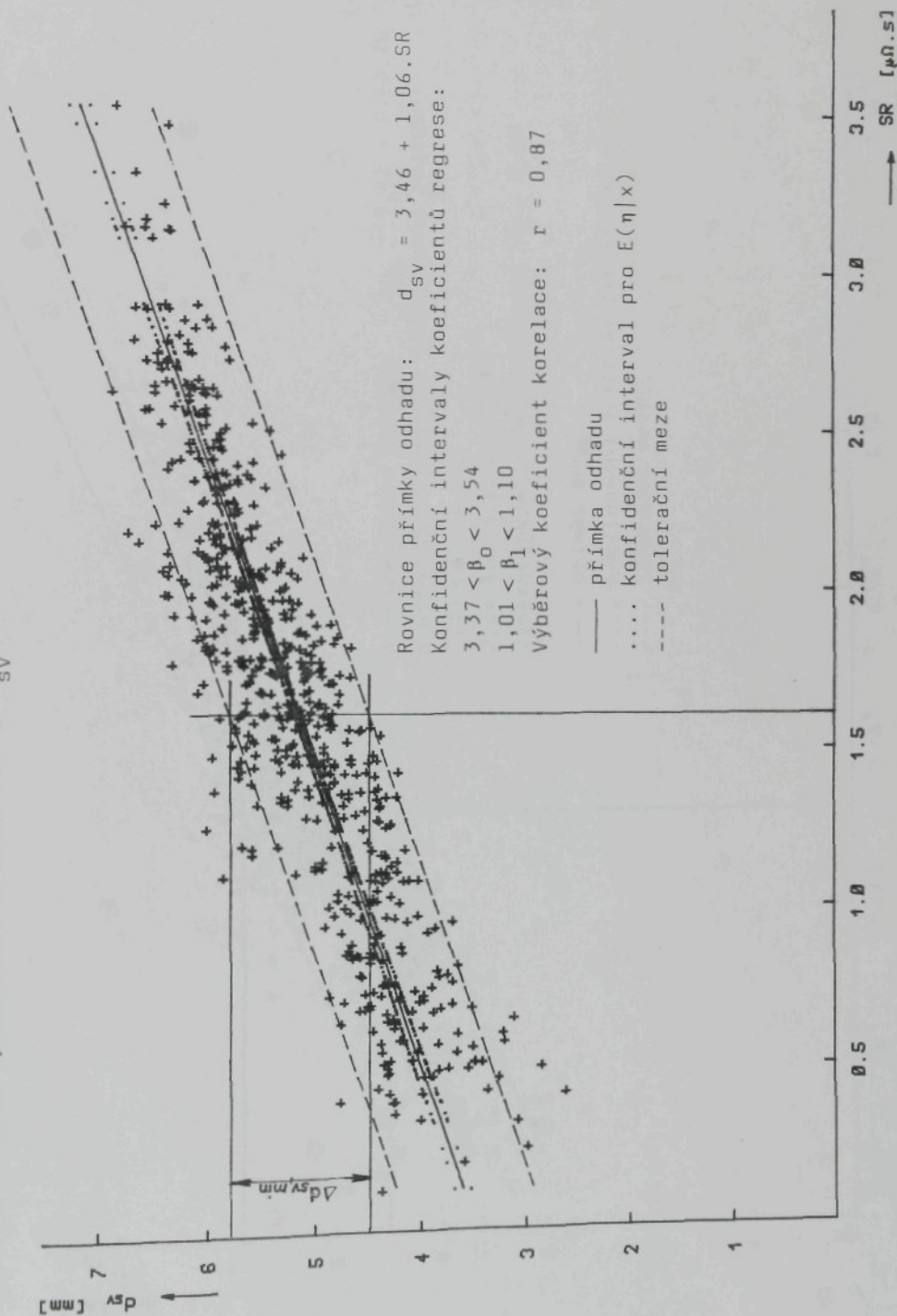
Tabulka č. P-15. Test normality pro hodnoty četností prvků
ve sloupci č. 9

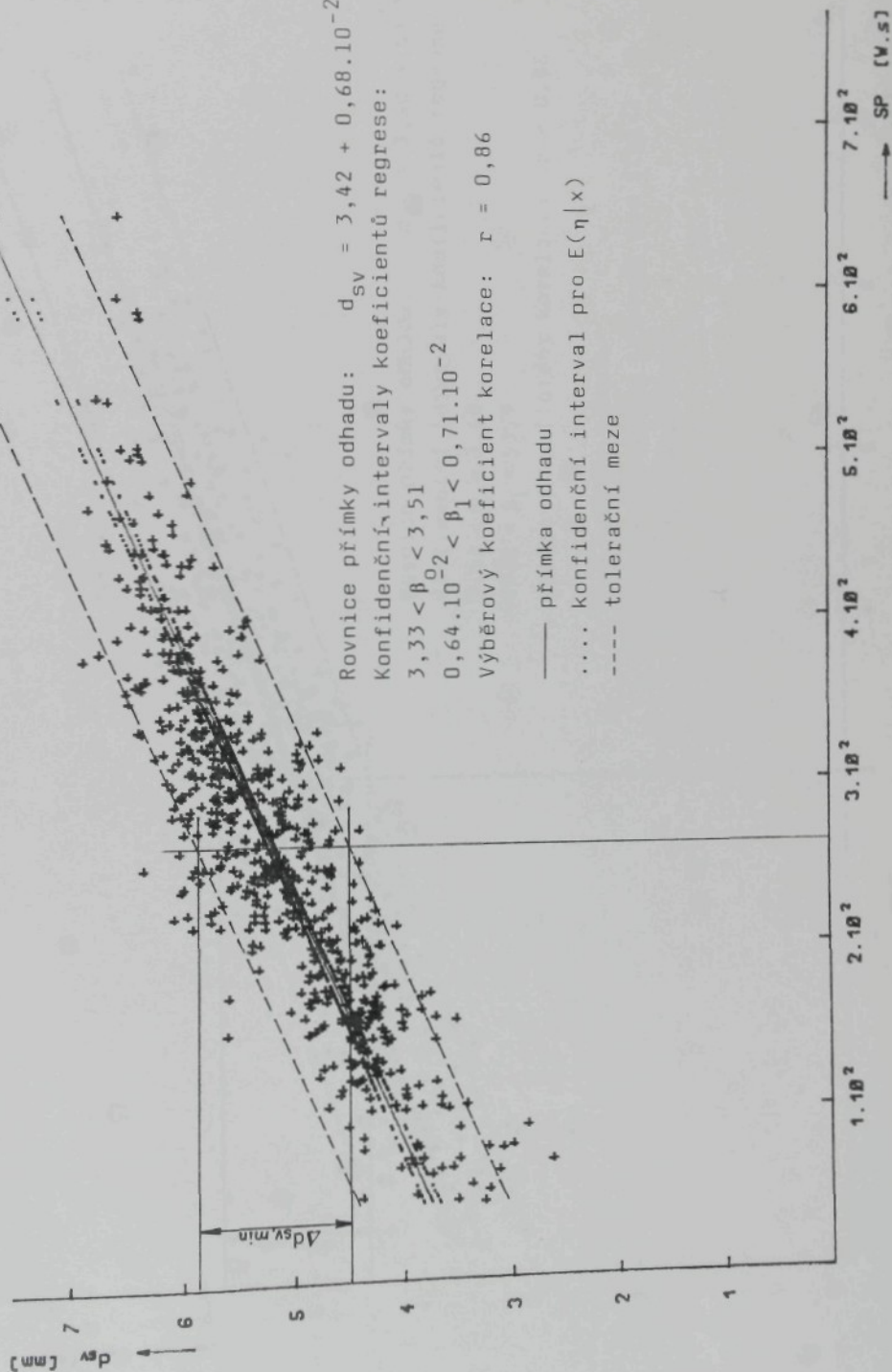
Původní meze x_m	Tř. znak x_t	Přepočtené meze u_x	Teor. četnost n_t	Exp. četnost
0,020-0,025	0,0225	$(-\infty); -0,690$	3,43	4
0,025-0,030	0,0275	$-0,690; 0,188$	4,60	5
0,030-0,035	0,0325	$0,188; 1,006$	3,96	2
0,035-0,040	0,0375	$1,006; (+\infty)$	2,0	3
Výsledek testu: $\chi^2 = 1,6$ $\chi^2_{0,05}(1) = 3,841$ Hypotéza H_0 se přijímá				

Obz. P-159. Vyhodnocení souboru dat $SU-d_{SV}$



Obr. P-160. Vyhodnocení souboru dat SR-d_{sv}





Obr. P-162. Vyhodnocení souborů dat $SU_V - d_{SV}$

