

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

BODOVÉ ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH PLECHŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Autor: Bc. Ján Feranec
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T035 Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Kramár, PhD., IWE

Praha 2018

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu vypracoval samostatne a použil som iba podklady (literatúru, projekty, SW atď.) uvedené v priloženom zozname.

Nemám závažný dôvod proti použitiu tohto školského diela v zmysle § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon).

V Prahe dňa

.....

podpis

Touto cestou by som rád poďakoval vedúcemu mojej diplomovej práce pánovi **Ing. Tomášovi Kramárovi, PhD., IWE**, za uvedenie do problematiky, za odbornú pomoc pri vypracovaní práce a za pomoc pri riešení a vyhodnotení experimentálnej časti. Ďalej by som chcel poďakovať pani **Ing. Lucii Forejtovej** za vykonané skúšky ultrazvukom a v neposlednom rade **Simone Ďurčanskej** za podporu a pomoc pri písaní tejto práce.

Anotácia

Diplomová práca sa zaoberá problematikou bodového odporového zvarovania sendvičových kompozitných plechov. Teoretická časť práce popisuje problematiku bodového odporového zvarovania a sendvičové materiály novej generácie používané v automobilovom priemysle. Experimentálna časť práce sa zaoberá návrhom a výrobou prípravku pre bodové odporové zvarovanie sendvičových plechov, odladeniu použiteľných parametrov pre tento nástroj a následným vyhodnotením jednotlivých zvarových spojov pomocou deštruktívnych aj nedeštruktívnych skúšok.

Kľúčové slová:

bodové odporové zvarovanie, sendvičový materiál, litecor, automobilový priemysel

Annotation

This diploma thesis deals with the topic of resistance spot welding of the sandwich composite sheets. Theoretical part of the thesis describes the principles of the resistance spot welding and the new sandwich materials used in automotive industry. Experimental part of the thesis deals with the design and production of the fixture for the resistance spot welding of sandwich composite sheets, then searching of the acceptable parameters for this tool and subsequently evaluating of the welds joint using the desctructive and non-destructive test methods.

Keywords:

resistance spot welding, sandwich material, litecor, automotive industry

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Odporové zvarovanie	11
2.1	Fyzikálny princíp odporového zvarovania.....	11
2.2	Prechod elektrického prúdu pri odporovom zvarovaní.....	12
2.3	Tepelný proces	14
2.4	Metalurgický proces.....	15
2.5	Mechanický proces.....	17
2.6	Parametre odporového zvarovania.....	18
2.7	Režimy odporového zvarovania.....	21
2.8	Metódy odporového zvarovania.....	22
3	Bodové odporové zvarovanie	24
3.1	Princíp bodového odporového zvarovania.....	24
3.2	Druhy bodového odporového zvarovania	25
3.3	Metalurgia a štruktúra bodového zvaru.....	26
3.4	Parametre bodového odporového zvarovania	27
3.5	Využitie bodového odporového zvarovania.....	27
3.5.1	Bodové odporové zvarovanie v automobilovom priemysle	28
4	Sendvičové kompozitné plechy	30
4.1	Použitie sendvičových plechov	31
4.2	Zvariteľnosť sendvičových plechov.....	32
4.2.1	Odporová zvariteľnosť sendvičových plechov	32
5	Praktická časť.....	35
5.1	Ciele práce.....	35
5.2	Návrh a výroba prípravku	35
5.3	Príprava zvaraných vzoriek.....	38
5.4	Použité materiály.....	39

5.4.1	Sendvičové plechy Litecor.....	39
5.4.2	Hlbokotážná ocel' valcovaná za studena DC 06.....	42
5.5	Použité zvaracie zariadenie	43
5.6	Zvaracie parametre a vizuálna kontrola	44
5.6.1	Proces zvarania	47
5.7	Kontrola ultrazvukom	50
5.7.1	Meranie hĺbky vtlačku po elektróde ultrazvukom	52
5.8	Odlupovacia skúška a meranie priemeru šošovky	53
5.9	Metalografia a meranie mikrotvrdości.....	55
5.9.1	Meranie Mikrotvrdości.....	59
5.10	Zhrnutie výsledkov.....	61
6	Záver	64

Zoznam použitých veličín a jednotiek

R	Ω	elektrický odpor	ohm
I	A	elektrický prúd	ampér
t	s	Čas	sekunda
Q	J	Teplo	joule
ρ	$\Omega \cdot m$	merný elektrický odpor	ohm meter
J	$A \cdot m^{-2}$	prúdová hustota	ampér na meter štvorcový
σ	$S \cdot m^{-1}$	merná elektrická vodivosť	siemens na meter
T	$^{\circ}C$	Teplota	stupeň Celsia
P_s	kN	zváracia sila	kilonewton
I_s	kA	zvárací prúd	kiloampér
t_s	ms	zvárací čas	milisekunda
$R_{p0,2}$	MPa	medza klzu	megapascal
R_m	MPa	medza pevnosti	megapascal
A_{80}	%	Ťažnosť	percento
n	-	exponent deformačného spevnenia	bezrozmerný
t	mm	hrúbka plechu	milimeter
d_{min}	mm	minimálny priemer zvaru	milimeter
F_{ss}	kN	maximálna sila potrebná pre strih (statická skúška)	kilonewton
F_{sd}	kN	maximálna sila potrebná pre strih (dynamická skúška)	kilonewton
HV	-	tvrdosť podľa Vickersa	-

1 Úvod

V súčasnosti sa v priemysle kladú vysoké nároky na ekonomickejšie a ekologickejšie využívanie konvenčných zdrojov energie. Táto problematika sa najviac dotýka automobilového a leteckého priemyslu, ktoré sú na základe stále nových nariadení ohľadom zlepšenia vplyvu na životné prostredie tlačené k celkovému zredukovaniu emisií. Najefektívnejším spôsobom ako vyriešiť tento problém je zníženie celkovej hmotnosti prostriedku, a tým aj spotreby paliva. Keď sa k tomu pripočíta možnosť zvýšenia bezpečnosti, nižšie výrobné náklady a lepšie mechanické vlastnosti, tak sa otvára priestor pre nové progresívne materiály.

V blízkej budúcnosti by odpoveďou pre konštruktérov mohli byť sendvičové kompozity zložené z oceľových krycích plechov a polymérového jadra. Hlavnou prednosťou týchto sendvičov je skvelý pomer pevnosti a hmotnosti, vďaka ktorému sú oveľa vhodnejšie ako doteraz používané oceľové alebo hliníkové materiály. V porovnaní s hliníkovými zliatinami sú dokonca tieto kompozity cenovo výhodnejšie.

Najväčší pozitívny efekt, by použitie týchto materiálov napríklad v automobilovom priemysle dosiahlo pri zakomponovaní do karosérie vozidla. To by v konečnom dôsledku mohlo priniesť výrazné zníženie hmotnosti a lepšie bezpečnostné vlastnosti. Avšak problém pri takýchto konštrukčných prvkoch je ich nevyhnutná potreba nerozoberateľného spájania jednotlivých častí. Ako najlepšou variantou sa v tomto prípade ukazuje bodové odporové zváranie, ktoré v súčasnosti v automobilovom priemysle tvorí približne 90% všetkých technológií zvárania.

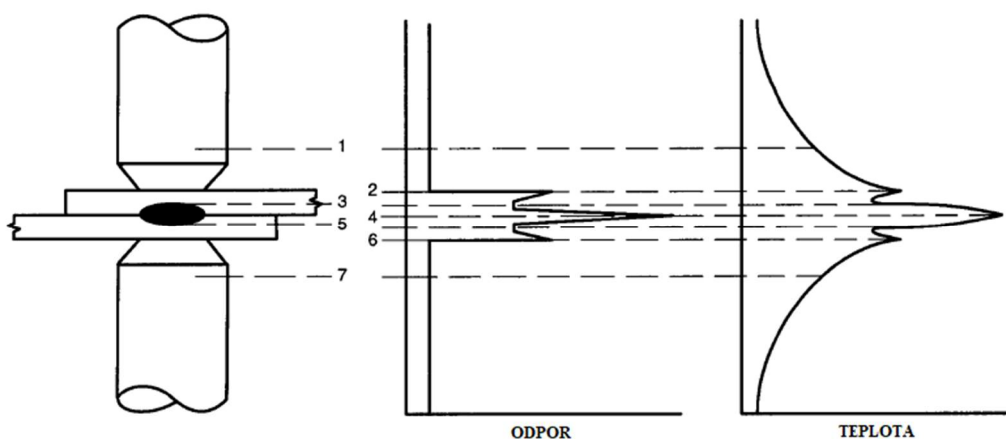
Tento spôsob spájania je však pre sendvičový materiál pri bežnom princípe nepoužiteľný. Problémom je nevodivé polymérové jadro, ktoré nedovoľuje prechod elektrického prúdu zváranými časťami. Vzhľadom na to je v súčasnosti snaha o vytvorenie prípravku, ktorý dokáže tieto komplikácie vyriešiť.

2 Odporové zvaranie

Odporové zvaranie definujeme ako spôsob zvarania, pri ktorom sa vytvára zvar bez prídavného materiálu krátkodobým prechodom prúdu vysokej intenzity cez miesto neskoršieho zvaru pri súčasnom pôsobení prítlačnej sily. Prechádzajúcim prúdom privedeným elektródami a spolupôsobením odporu v oblasti zvaru sa vytvára teplo potrebné na dosiahnutie zvaracej teploty. Zvárané časti zohriate na teplotu tavenia sa následne k sebe pritlačia, čím sa navzájom zvaria. [1]

2.1 Fyzikálny princíp odporového zvarania

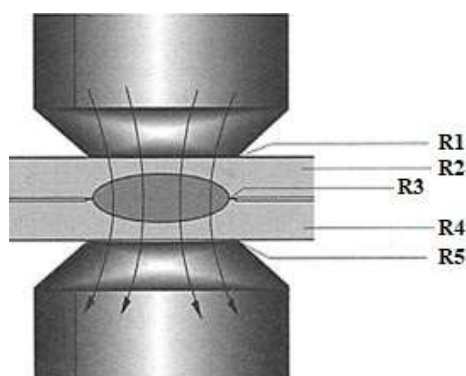
Spoj vzniká pri prechode elektrického prúdu cez stlačené zvárané časti. Pri vzniku spoja sa využíva jav, že pri prechode elektrického prúdu vodičom vzniká teplo, prostredníctvom ktorého sa dosiahne zvýšenie teploty spájaných materiálov na požadované hodnoty (Obr.1). Prechodom elektrického prúdu zváraným miestom sa materiál zváraných súčastí ohreje odporovým teplom, stane sa tvárnym, alebo sa roztaví pričom sa spájané materiály stlačia, a tým sa metalurgicky spoja. Zdrojom tepla je elektrický prechodový odpor v mieste styku zváraných materiálov. [2]



Obr. 1 Pomery odporov a teplôt pri odporovom zvaraní [3]

2.2 Prechod elektrického prúdu pri odporovom zváraní

Elektrický prúd musí v mieste dotyku zváraných polotovarov pri prechode z jednej elektródy do druhej prekonať niekoľko aktívnych odporov. Sú to prechodové odpory medzi elektródami a zváranými materiálmi, odpory zváraných materiálov a prechodový odpor v mieste dotyku zváraných materiálov, t. j. v mieste zvarového spoja. Snahou pri odporovom zváraní je maximalizovať prechodový odpor medzi zváranými materiálmi a minimalizovať prechodové odpory medzi elektródami a zváranými materiálmi (Obr.2).



Obr.2 Odpor v oblasti bodového zvaru [4]

Celkový odpor, ktorý kladú elektródy a zváraný materiál prechádzajúcemu prúdu je daný vzťahom:

$$R = R_p + R_m \quad [\Omega] \quad (1)$$

Výsledný odpor zo vzťahu (1) je súčet prechodových a materiálových odporov v oblasti zvaru. Prechodové odpory R_p vznikajú na rozhraní dvoch dotýkajúcich sa materiálov.

$$R_p = R_{p-e} + R_{p-z} + R_{p-e} \quad [\Omega] \quad (2)$$

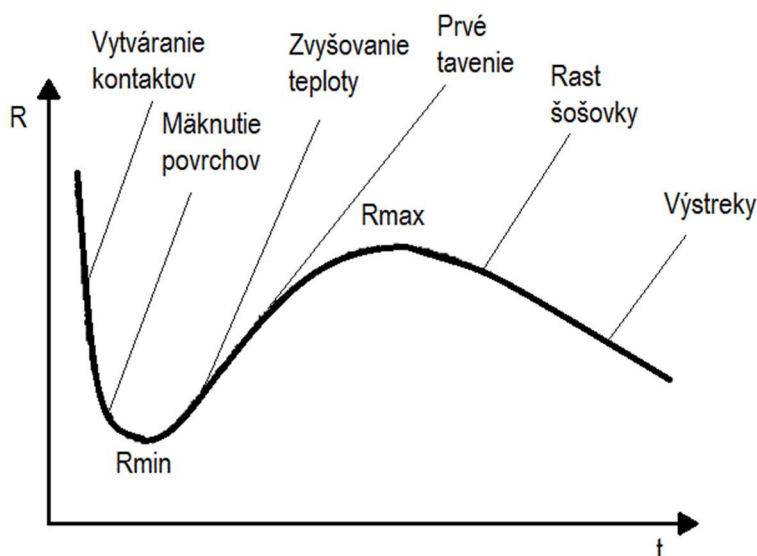
Čím bude prítlačná sila väčšia, tým bude prechodový odpor menší. Na prechodové odpory vplyva vodivosť dotýkajúcich sa kovov, ich čistota, drsnosť dotýkových plôch, povrchová úprava, ale aj režim tepelného spracovania. Zvárací režim a chladenie

elektrod. Prechodové odpory medzi elektródou a zváraným materiálom by mali byť čo najnižšie.

Materiálové odpory R_m sú dané vodivosťou materiálu respektíve odporom zváraného materiálu a zváracích elektród. Dôležitú úlohu zohráva hrúbka zváraných plechov, počet plechov a prierez prúdovej cesty. [5]

$$R_p = R_{m-1} + R_{el-1} + R_{m-2} + R_{el-2} \quad [\Omega] \quad (3)$$

V priebehu zvárania sa odpor zvaru mení (Obr. 1). Po privedení zváracieho prúdu sa celkový odpor rýchlo zníži, pretože stykové miesta sa navzájom prispôbia zmäknutím spájaných materiálov, a tým sa zníži prechodový odpor v mieste ich dotyku. Pri teplotách 600 – 800 °C sa tento prechodový odpor zníži na minimum a po vytvorení zvaru úplne zanikne (fázy I a II na Obr.3). S postupujúcim časom sa začnú zvárané materiály medzi elektródami ohrievať, a tým sa začne zvyšovať ich odpor (fázy III a IV na Obr.3). Tým udržiavajú proces zvárania v chode a umožňujú dokončenie zvaru za spolupôsobenia prítlačnej sily. Po dosiahnutí maxima začína odpor v sústave z dôvodu rastu zvarovej šošovky opäť klesať. Ak by neboli materiály navzájom prítlačené, roztavený materiál by vystrekol vo forme prúdu iskier z miesta zvaru a došlo by k vytvoreniu studeného spoja. Zvárací prúd treba prerušiť skôr, ako by došlo k pretaveniu zváraných materiálov. Zvarová šošovka by potom bola hrubšia ako hrúbka zváraných materiálov. [6]



Obr. 3 Metalurgický proces počas bodového odporového zvárania

2.3 Tepelný proces

Podstatou odporového zvarania je sústredenie tepla vzniknutého prechodom elektrického prúdu cez zvarané súčasti do miesta zvaru. Množstvo vznikajúceho odporového tepla možno stanoviť podľa Joule-Lenzovho zákona [5,6]:

$$Q = 0,239 \cdot R \cdot I^2 \cdot t \quad [\text{J}] \quad (4)$$

kde:

Q – teplo (J)

R – celkový elektrický odpor (Ω)

I – zvarací prúd (A)

T – zvarací čas (s)

Množstvo tepla, ktoré je potrebné vynaložiť na zohriatie daného objemu materiálu na potrebnú teplotu možno určiť zo vzťahu:

$$Q = \frac{m \cdot c_s \cdot (T_z - T_o)}{\eta} \quad [\text{J}] \quad (5)$$

kde:

m – hmotnosť ohrievaného materiálu (kg)

c_s – stredné merné teplo v rozpätí teplôt T_o až T_z ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_o – teplota okolia, resp. začiatku zvarania (K)

T_z – teplota zvarania (K)

η – účinnosť procesu

Pretože množstvo zohrievaného materiálu m je súčasťou zvaraného materiálu, ktorý je smerom od miesta zvaru stále chladnejší, je problematické určiť presne potrebné množstvo tepla.

Účinnost' η je funkciou účinnosti použitého zdroja a tepelných strát v materiáli počas jeho ohrevu vyžarovaním, vedením a pod. [5,6]

Celkové teplo, ktoré vzniká v priebehu odporového zvarania je dané vzťahom:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

kde:

Q_1, Q_5 - teplá, ktoré vznikajú medzi elektródami a zváranými materiálmi,

Q_2, Q_4 - teplá, ktoré vznikajú vo zváraných materiáloch,

Q_3 - teplo, ktoré vzniká v mieste dotyku zváraných materiálov.

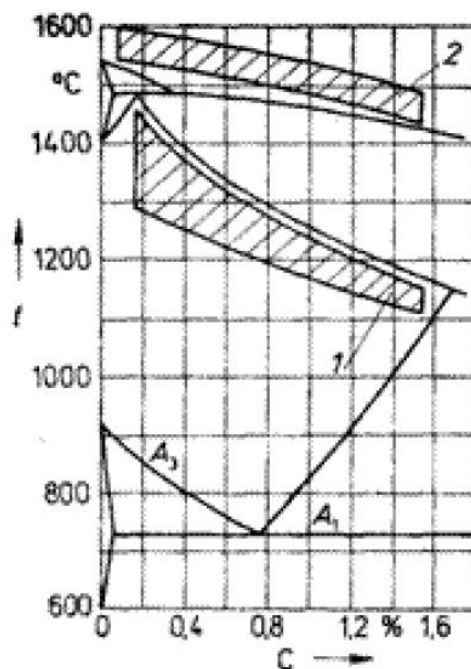
Pri rovnakých hrúbkach a zváraných materiáloch platí $Q_1 = Q_5$ a $Q_2 = Q_4$.

Teplo, ktoré vzniká v procese odporového zvarania sa všetko nevyužije na vytvorenie zvaru. Využije sa len určitá časť, zmenšená o straty tepla v elektródach, vo zváraných materiáloch a v prostredí okolo zvaru. Najväčšie straty tepla sú v elektródach. [6]

K zvareniu spájaných materiálov po natavení dochádza po ich silnom stlačení. Zváračky pre zvaranie elektrickým odporom preto musia obsahovať okrem výkonného zdroja elektrického prúdu aj mechanické prvky umožňujúce veľmi silné stlačenie zváraných materiálov v mieste zvaru. [7]

2.4 Metalurgický proces

Odporovým zvaraním sa vytvárajú tavné zvary, ktoré sa vyznačujú vysokou kvalitou. Difúzne zvary vznikajú iba pri stlačacom stykovom zvaraní, resp. v prípadoch použitia nevhodných technologických parametrov. Charakter spoja závisí predovšetkým od hodnôt teploty dosiahnutých v mieste jeho vytvárania. Teploty typické pre jednotlivé spôsoby odporového zvarania sú uvedené na Obr.4. [8]



Obr. 4 Oblasti zvaracích teplôt pri odporovom zváraní ocelí [8]

1 – stláčacie stykové zváranie, 2 – odtavovacie stykové, bodové a švové zváranie

Keďže teplota v jadre zvaru prekročí počas zvaracieho procesu teplotu tavenia zvaraných materiálov, odporové zvary majú charakter roztaveného a stuhnutého kovu. Zvarová šošovka je vytvorená liatym kovom s výrazne vyvinutými stĺpovitými kryštálmi (dendritmi), ktoré majú hlavné osi orientované v smere odvodu tepla, t. j. kolmo na hranice zvarovej šošovky. [9]

Tepelne ovplyvnená oblasť odporových zvarov je pomerne úzka, najmä u zvarov vytvorených tvrdým režimom. Zóna natavenia, ktorá oddeľuje zvarový kov od ostatného materiálu, je obklopená úzkou oblasťou (poz. 2 na obr. 8), v ktorej prebehli chemické reakcie v polotuhom a tuhom stave. Dochádza v nej k difúzii uhlíka a segregácii ostatných prvkov. Štruktúra v tejto oblasti je hrubozrná. Tento proces však nastáva pri vyšších rýchlostiach a trvá kratší čas. Preto pri odporovom zváraní nedochádza až k takému výraznému zhrubnutiu zrn ako pri iných spôsoboch zvárania. [9]

V ďalšej zóne tepelne ovplyvnenej oblasti, v ktorej nastáva ohrev materiálu nad teplotu A_3 , dochádza k zjemneniu zrna prostredníctvom normalizačných žihacích procesov.

Hranicu tepelne ovplyvnenej oblasti tvoria zóny zohriate na teploty okolo A_1 , ktoré sú charakteristické čiastočným rozpustením perlitu, resp. žiadnym tepelným ovplyvnením. V zóne 5 môže dôjsť výnimočne k premene štruktúry rekryštalizačnými procesmi. [10]

2.5 Mechanický proces

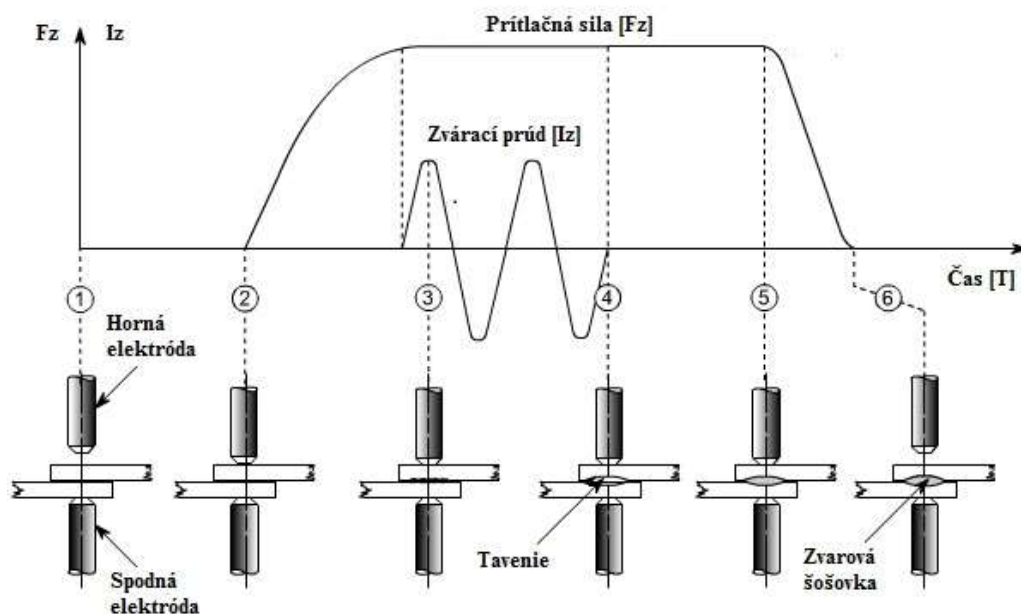
Mechanický proces pri odporovom zvaraní sa vyznačuje pôsobením tlaku počas procesu zvarania (Obr.5). Pôsobenie tlaku rozdeľujeme do troch po sebe idúcich operácií:

- I. Pritlačenie
- II. Zvarenie
- III. Kovanie

Pri pritlačení elektród pomáha pritlačná sila zlepšiť priľnutie zvaraných častí k sebe. Zváracie elektródy dosadnú na povrch polotovaru, prispôbia ho zvaranému proti-kusu, čím vytvoria ideálne podmienky pre vznik prechodového odporu. V mieste styku je tak ideálne prostredie pre vznik zvaru. [5,10]

Počas doby zvarania – metalurgického procesu, pretrváva funkcia z prvého procesu a zároveň udržiava zvarací tlak taviaci sa kov v dutine, čím bráni jeho vystreknutiu. [5,10]

V poslednej fáze mechanického procesu, pri ktorom začína tuhnúť vytvorený zvar, má pôsobenie tlaku (vyššieho ako pri ostatných) zlepšiť štruktúru. Pôsobením vyššieho tlaku je možné zjemniť vytvorenú hrubozrnnú štruktúru a taktiež v istých prípadoch odstrániť stiahnutiny. [5,10]



Obr.5 Proces odporového bodového zvarovania [11]

2.6 Parametre odporového zvarovania

Základné parametre zvarovania elektrickým odporom sú [12]:

- zvarovací prúd I ,
- prítlačná sila F ,
- čas zvarovania t .

Zo vzťahu pre vznik tepla v odporovom zvare (4) z kapitoly 2.3 vyplýva, že najdôležitejším parametrom je zvarovací prúd I . Množstvo vzniknutého tepla závisí od neho s druhou mocninou. Hodnota zvaracieho prúdu výrazne ovplyvňuje priebeh metalurgických procesov počas zvarovania a má rozhodujúci vplyv na výsledné parametre zvaru. Čím vyšší je zvarovací prúd, tým kratšie časy zvarovania sa používajú. Pri nedostatočnej intenzite prúdu sa vo zvare nevytvorí dostatočné množstvo tepla na roztavenie spájaných materiálov a namiesto metalurgického spoja vznikne spoj difúzny, ktorého pevnosť je oveľa nižšia. Okrem toho určuje zvarovací prúd aj režim zvarovania, tým pádom aj zvarovací čas t . Pretože čas zvarovania je vo väčšine prípadov veľmi krátky (kratší než 1 s), používa sa na jeho vyjadrenie perióda ($=1/50$ s).

Tretím základným parametrom odporového zvarovania je prítlačná sila F . Pri voľbe veľkosti prítlačnej sily sa vychádza zo základného tlaku (pre tvrdý režim je to viac než

80 N.mm⁻²) a z plochy elektródy. Čím väčšia je hrúbka materiálu, tým je potrebná väčšia prítlačná sila. Veľkosť prítlačnej sily má bezprostredný vplyv na veľkosť prechodových odporov, a teda aj na veľkosť zvaracieho prúdu. Čím je prítlačná sila väčšia, tým sú prechodové odpory menšie, a tým preteká väčší prúd. Popri vplyve na prechod prúdu má prítlačná sila aj metalurgickú funkciu, zabraňuje nožnej expanzii roztaveného kovu a zjemňuje zrno. Elektródy by mali vyvodzovať prítlačnú silu aj po vypnutí prúdu, kým teplota neklesne pod 400 °C. [13]

Parametre zvarania sa určujú pre konkrétne zvarané hrúbky a druhy materiálov. Nastavenie parametrov ovplyvňuje i vzájomný rozstup zvarov a vzdialenosť od okraja plechu.

V Tab.1 sú uvedené orientačné hodnoty zvaracích parametrov pre odporové bodové zvaranie rôznych materiálov.

Tab.1 Hodnoty odporúčaných zvaracích parametrov pre rôzne typy materiálov [14]

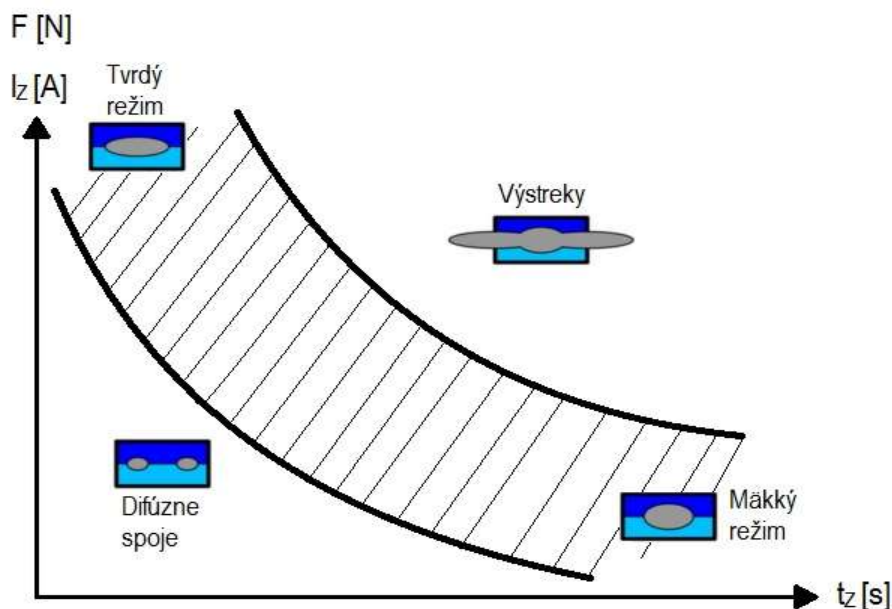
Materiál	Hrúbka plechu	Sila	Prúd	Čas	Priemer elektródy	Min. priemer zvaru
	[mm]	[kN]	[kA]	[perióda]	[mm]	[mm]
Nízkouhlíkové ocele	0,5	1	5	7	3,5	3,5
	1,0	1,5	7	10	4,5	5
	1,5	2,5	8,5	12	5,5	6
	2,0	3,5	13	15	6,5	6,5
	2,5	4,7	15	17	7,5	7
	3,0	6,3	17	20	8,5	7,5
Nehrdzavejúce ocele	0,5	2,5	5	3	3,5	3,5
	1,0	3,5	8	5	4	5
	1,5	5	10	7	5	6
	2,0	7	13	10	6,5	6,5
	2,5	10	15	15	7	7
	3,0	15	17	18	7,5	7,5
Vytvrdiviteľné Al zliatiny	0,5	3,5	21	3	*	3,5
	1,0	5	25	4	*	5
	1,5	6	30	5	*	6
	2,0	7	33	6	*	6,5
	2,5	8	35	7	*	7
	3,0	8,5	37	8	*	7,5
* Používajú sa sférické pracovné plochy (R= 100 - 200 mm)						

2.7 Režimy odporového zvarania

Z Joule-Lenzovho vzťahu (4) v kapitole 2.3 vyplýva, že rovnaké množstvo tepla dodaného do zvaru je možné získať buď nižším prúdom a dlhším časom (mäkký režim) alebo vysokým prúdom a krátkym časom (tvrdý režim).

Pri mäkkom režime zvarania vzniká šošovka s malým priemerom a veľkou výškou (obr. 9). Výška šošovky niekedy zaberá celú hrúbku spájaných materiálov. Štruktúra zvaru po stuhnutí je hrubá a dendritická. Pri tomto režime sú elektródy veľmi namáhané, a preto majú krátku životnosť. Spotreba energie je vyššia, pretože je malá účinnosť a tepelné straty sa zvyšujú. Vplyvom tepelných strát sa zahrieva širšie okolie zvaru, materiál chladne pomalšie, a tým vzniká menšie riziko vzniku zakalenej štruktúry.

Pri tvrdom zvaracom režime má zvarová šošovka väčší priemer a menšiu výšku (Obr.9). Aj ostatné parametre sú opačné než pri mäkkom režime. Výhodnou tvrdého režimu je vysoká kvalita zvarového spoja, hospodárna prevádzka a vysoká produktivita. Stroje pre tvrdý režim však vyžadujú väčšie príkony a musia byť konštruované na väčšie prítláčne sily. [13]



Obr.6 Oblasti mäkkého a tvrdého zvaracieho režimu [5]

Voľba druhu režimu závisí od zváraného materiálu. Vo väčšine prípadov sa používa tvrdý režim. [12]

Rozsahy parametrov tvrdého a mäkkého režimu pre jednotlivé metódy odporového zvárania sú uvedené v Tab.2.

Tab.2 Rozsahy parametrov mäkkého a tvrdého režimu [12]

Druh odporového zvárania	Mäkký režim		Tvrdý režim	
	Zvárací tlak [Mpa]	Zvárací prúd [A.mm-2]	Zvárací tlak [Mpa]	Zvárací prúd
Bodové	2-6	140-200	nad 5	nad 200
Švové	2,5-6	160-375	nad 5	nad 35
Výstupkové	7,5-11	do 120	nad 11	max. 500
Stykové	2-4	do 20	nad 4	nad 20

2.8 Metódy odporového zvárania

Podľa konštrukčného usporiadania elektród a pracovného postupu tohto procesu rozdeľujeme odporové zváranie na 4 hlavné druhy (Obr. 7):

- **a) Bodové odporové zváranie**

Zvar medzi preplátovanými časťami je v tvare šošovky

- **b) Švové odporové zváranie**

Zvar medzi preplátovanými časťami je súvislý, vytvárajú ho kotúčové elektródy

- **c) Výstupkové odporové zváranie**

Zvar vzniká v mieste vopred pripraveného výstupku, ktorý je väčšinou iba na jednom z materiálov

- **d) Stykové odporové zváranie**

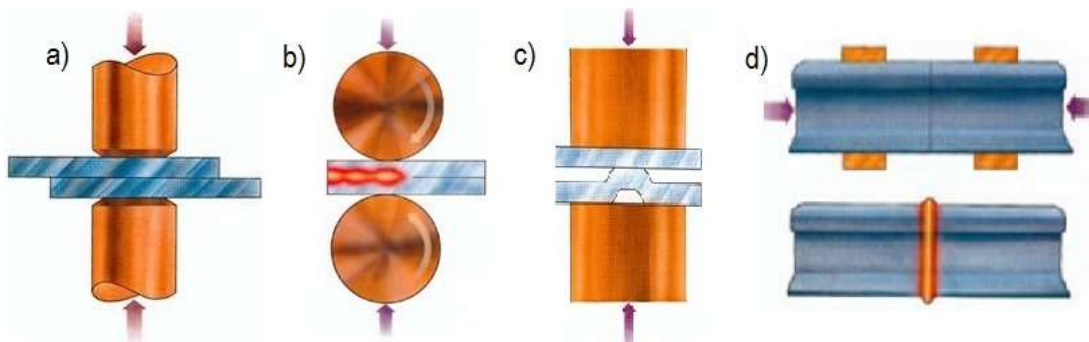
Zvar vzniká po prechode prúdu vzájomne pritlačených častí, ktorých stykové plochy sú vďaka najväčšiemu odporu prednostne ohrievané. Túto metódu rozdeľujeme na:

➤ **Stykové stlačacie zváranie**

Zvárané diely sú mechanicky upnuté do čeľustí, ktorými prechádza prúd a zároveň prenášajú zvaraciu silu a zabraňujú preklíznutiu pri vzájomnom stlačení.

➤ **Stykové odtavovacie zváranie**

Princíp zvárania je takmer rovnaký ako u stlačacieho. Rozdiel je iba v tom, že zvárané dielce k sebe nie sú pritlačené, ale len priblížené.



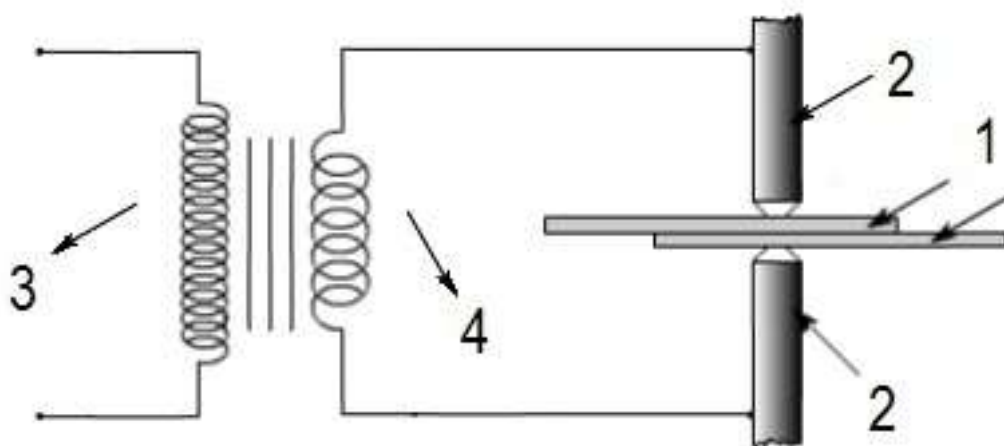
Obr. 7 Základné druhy odporového zvárania [15]

3 Bodové odporové zvarovanie

Pri bodovom zvarovaní vzniká medzi preplátovanými spájanými súčasťami spoj v tvare šošovky. Je to najpoužívanejší spôsob odporového zvarovania. Jeho využitie je najmä v automobilovom (výroba karosérií) a spotrebnom (výroba skriň prístrojov) priemysle. Najväčšie využitie nachádza v zvarovaní plechov rôznych hrúbok, štandardne však od 0,4 do 10 mm. [16]

3.1 Princíp bodového odporového zvarovania

Spoj vzniká pri prechode elektrického prúdu cez stlačené zvarované časti, ktoré sú k sebe pritláčané väčšinou medenými elektródami, ktoré sú pripojené na sekundárny obvod zvaracieho transformátora. Prechádzajúcim prúdom sa zahrievajú všetky časti obvodu, ale najviac tepla sa vytvára v mieste s najväčším odporom, ktorým je prechod medzi zvaranými materiálmi. Pripojením transformátora na elektrickú sieť začne pretekať primárnym okruhom zvaracieho transformátora elektrický prúd, ktorý indukuje zvarací prúd v sekundárnom obvode (Obr.8). Veľkosť zvaracieho prúdu je taká veľká, že zvarané miesta sa zohrejú na zvaraciu teplotu v priebehu niekoľkých desiatín sekundy. Odpojením transformátora od siete sa preruší zároveň i prívod zvaracieho prúdu, v dôsledku čoho roztavený alebo vysoko-zohriaty základný materiál oboch spájaných dielcov za spolupôsobenia prítlačnej sily stuhne. [5]



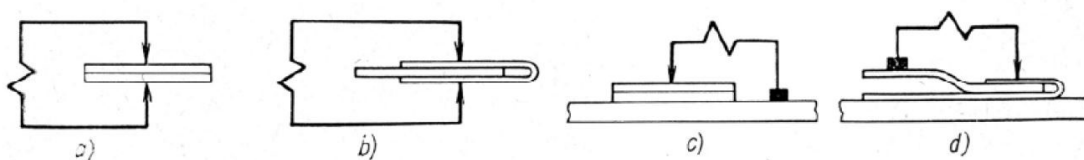
Obr.8 Princíp odporového bodového zvarania

1 – zvarané materiály, 2 – tyčové elektródy, 3 - primárne vinutie transformátora,
4 – sekundárne vinutie transformátora [17]

3.2 Druhy bodového odporového zvarania

Podľa usporiadania zvaracích elektród a spôsobu vytvárania zvaru rozlišujeme bodové zvaranie na dve hlavné skupiny [18]:

- priame bodové zvaranie, pri ktorom sa vytvárajú zvary medzi elektródami umiestnenými zvyčajne súsovo z opačných strán zvaraných súčastí (Obr. 9 a, b). Touto metódou je spravidla možné urobiť iba jeden zvar.
- nepriame bodové zvaranie, pri ktorom sa vytvárajú zvary tak, že elektródy sú umiestnené zvyčajne v rôznych polohách z jednej strany zvaraných súčastí a vodivej podložky prípadne mostíku. (Obr.9 c,d).



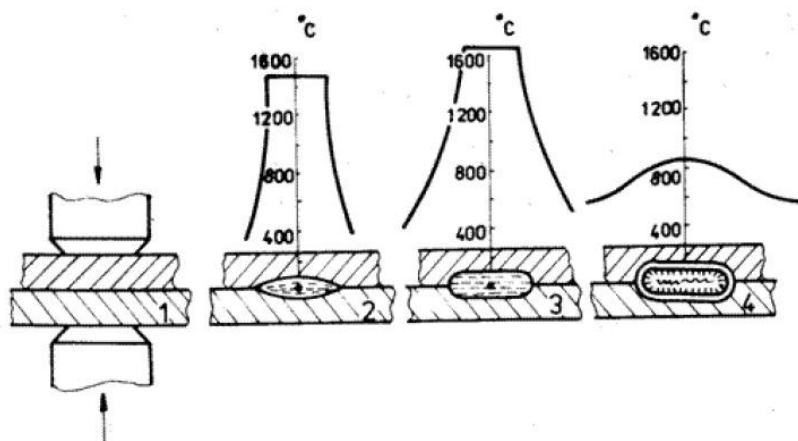
Obr. 9 Základné druhy bodového odporového zvarania [18]

a) priame bez bočného prúdu, b) priame s bočným prúdom, c) nepriame bez bočného prúdu,

d) nepriame s bočným prúdom

3.3 Metalurgia a štruktúra bodového zvaru

Pre prechod elektrického prúdu sústavou a z toho vyplývajúci vznik tepla pri bodovom zváraní platia princípy zhodné s princípmi uvedenými v kap. 2. 3 a 2.4. Na Obr.10 je možné vidieť princíp vzniku bodového zvaru pri odporovom zváraní.



Obr. 10 Proces vzniku bodového zvaru pri zváraní elektrickým odporom [6]

Rýchlosť ohrevu zváraných materiálov je veľmi vysoká a dosahuje niekoľko tisíc stupňov Celsia za sekundu (v extrémnych prípadoch až 100 000 °C.s⁻¹). V prvej fáze vytvárania zvaru nastáva ohrev v úzkej zóne, pričom sa dosahuje teplota tavenia zváraných materiálov (poz 2 na obr. 13). V druhej fáze dochádza k zvýšeniu teploty a k rozšíreniu tepelného ovplyvnenia (poz. 3 na obr. 13). Po vypnutí elektrického prúdu nastáva rýchle ochladzovanie, pričom nahromadené teplo je odvádzané do zváraných materiálov (poz. 4 na obr. 13). [6]

Typická makroštruktúra zvarového spoja vytvoreného bodovým odporovým zváraním je uvedená na Obr.11.



Obr.11 Makroštruktúra bodového zvarového spoja [5]

Pri veľkých rýchlostiach ohrevu a následných veľkých rýchlostiach ochladzovania môže nastať zakalenie aj tam, kde by za iných okolností (pri pomalšom ochladzovaní) nevzniklo. Toto riziko treba brať do úvahy najmä pri bodových zvaroch [9].

3.4 Parametre bodového odporového zvarania

Na dosiahnutie zlepšenia vlastností zvarových spojov, najmä pri horšie zvariteľných materiáloch, sa používajú počas zvarania rozličné priebehy parametrov zvarania. V praxi sa používajú rôzne kombinácie programového priebehu prítlačnej sily a zváracieho prúdu. [13]

Pri zvaraní vysokolegovaných alebo vytvrditeľných hliníkových zliatin sa používa svahový (postupný) nárast prúdu doplnený kovacou silou, ktorá je vyššia ako zváracia sila. Predchádza sa tým vzniku trhlín vo zvarovej šošovke a zlepšuje sa výsledná štruktúra zvarového kovu.

Programový priebeh parametrov v podstatnej miere ovplyvňuje dynamiku procesu (postupný vznik šošovky), metalurgické zmeny a konečné vlastnosti spoja. [9]

3.5 Využitie bodového odporového zvarania

Bodovým zvaraním sa vytvárajú preplátované zvarové spoje. Bodové zvary sa využívajú najčastejšie v jednoradovom, výnimočne i v dvojradovom usporiadaní. [14]

Bodové zvaranie možno úspešne využívať na zvaranie tenkých plechov. Najmä automobilový priemysel by dnes bez bodového zvarania nemohol existovať. Len na oceľových karosériách automobilov sú tisíce bodových zvarov (tab. 1). Zvára sa pomocou robotov a v tvrdom režime. Vďaka tomu sú automobilky schopné produkovať také množstvá automobilov v takých krátkych časových intervaloch. [16]

Okrem plechov sa bodujú aj guľatiny (drôty, tyče) pri výrobe tzv. drôteného programu pre domácnosti (nábytkové súčasti, police a pod.). Zo spotrebného priemyslu

je to ešte uplatnenie bodového zvarovania pri výrobe doskových radiátorov, príp. pri výrobe plášťov a súčastí chladničiek, pračiek a pod. [16]

Z hľadiska materiálov sa najčastejšie bodujú konštrukčné ocele, ale možno bodovať aj koróziivzdorné ocele, hliník a ďalšie materiály. Problematické je bodovanie pozinkovaných plechov. Pri spracovaní plechov z ľahkých zliatin (napr. titánu) nachádza táto technológia uplatnenie aj v leteckom a kozmickom priemysle. Na veľkých lietadlách je to viac ako milión zvarov. V leteckom priemysle je to aj zvarovanie žiarupevných zliatin (napr. Nimonic) pri výrobe prúdových motorov. [16]

Jedným z najdôležitejších parametrov pri aplikácii bodového zvarovania z hľadiska použiteľnosti zvarov je dovolené namáhanie bodových zvarov. Bodové zvary totiž nemožno namáhať krutom. V krute je pevnosť bodových zvarov minimálna. Naopak v ťahu je ich pevnosť vysoká. Na toto je potrebné dať pozor pri návrhu konštrukcie s využitím bodového zvarového spoja. [16]

3.5.1 Bodové odporové zvarovanie v automobilovom priemysle

Vysoký podiel pozinkovaných plechov vo výrobe karosérií automobilov spôsobuje, že je častokrát použitých viacej zvarov, ako je nevyhnutné na dosiahnutie požadovaných vlastností.

Zinkový povlak výrazne ovplyvňuje tvorbu zvarovej šošovky a opotrebovanie elektród, čo sa negatívne podpisuje na kvalite spoja.

V súčasnosti je hlavným cieľom dosiahnuť úplnú automatizáciu zvaracích pracovísk, a tým zvýšiť dennú produkciu. Automatizáciou výrobných pracovísk sa znižujú ekonomické náklady na výrobu. Robotizované pracoviská (Obr.12) na odporové zvarovanie preto už takmer vytlačili ľudskú ruku z procesu zvarovania v automobilovom priemysle. [5]

Pri zvarovaní zvaracími kliešťami je oproti ručnému zvarovaniu veľkou výhodou robotického zvarovania rovnomerné priloženie elektród na zvaraný materiál pod rovnakým uhlom a lepším využitím krokového zvyšovania prúdu. Vlastný robot je vybavený zvaracími kliešťami so zabudovaným transformátorom a s pneumatickým, prípadne

elektromotorickým dosiahnutím prítlačnej sily. Zváracie pracovisko pozostáva z otočného stola, kde na jednej strane obsluha zakladá diely do upínacieho prípravku, po otočení stola robot diely zvarí a opäť rovnakou stranou vráti zvarený kus na vybratie. Upínacie prípravky sú nastaviteľné na všetkých osiach. Pneumatické upínače sú v upnutej polohe samo-držiace, takže pri náhlej strate tlaku nevzniká nebezpečný stav. [19]



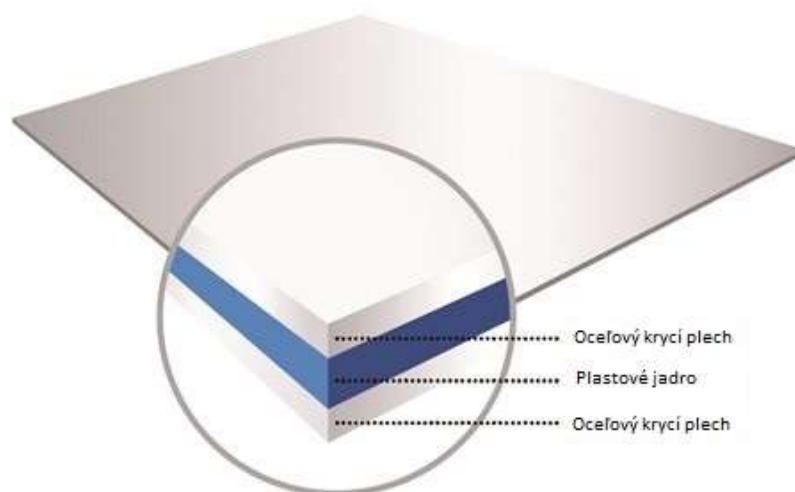
Obr.12 Automatizované zvaracie pracovisko [20]

4 Sendvičové kompozitné plechy

Autá novej generácie by mali byť ľahšie, bezpečnejšie a úspornejšie, čo je samozrejme neľahká úloha pre konštruktérov. Normatívne predpisy požadujú od európskych producentov automobilov od roku 2020 výrazne zredukovať emisie CO₂ na 95 g.km⁻¹. Už pri znížení spotreby paliva o jeden liter dochádza k zmierneniu emisií CO₂ o 12g. S tým súvisí aj tlak na efektívnejšiu konštrukciu karosérie s cieľom zníženia jej hmotnosti. [21]

Pre automobilové spoločnosti zo segmentu stredných a nižších tried, čo je 70% celkového automobilového trhu, je stále dominujúcim materiálom oceľ, respektíve oceľové ľahké konštrukcie karosérií. V segmente vyšších tried sa uplatňuje dlhodobý koncept karosérie z ľahkých zliatin na bázi hliníku, prípadne kombinovaná materiálová konštrukcia ocele a hliníku. Určite výrazná váhová úspora je však za cenu komplikovanej a nákladnej výrobných technológií a drahých surovín. [21]

Alternatívou pre vonkajšie diely karosérie zo zliatin z ľahkých kovov môže byť v budúcnosti sendvičový kompozit oceľ – polymér – oceľ. Kombinácia plastu a ocele však nie je nová. Tento typ materiálu sa už v automobilovom priemysle využíva, avšak za úplne iným účelom. Sendviče s veľmi tenkým plastovým jadrom (0,025 – 0,05 mm) sú vhodne využívané pre svoje tlmiace a antivibračné schopnosti. Svoje použitie tak našli ako materiály pre komponenty prevodoviek a agregátov. Medzi tieto typy materiálov patrí aj Litecor (Obr.13). [21]



Obr.13 štruktúra sendvičového plechu Litecor [21]

4.1 Použitie sendvičových plechov

Sendvičové plechy sú už v súčasnosti používané v rôznych odvetviach a to najmä vďaka vysokému pomeru medzi tuhosťou alebo pevnosťou a hmotnosťou konštrukcie. Sendvičové materiály sú len ťažko prekonateľné v aplikáciách kde je vyžadovaná vysoká pevnosť a malá hmotnosť. Z tohoto dôvodu sa využívajú v rôznych priemysloch, ako napríklad dopravný, stavebný, letecký a pod. [22]

V dopravnom priemysle sa môžeme stretnúť so sendvičovými plechmi v takmer všetkých odvetviach ako je letecký, železničný, automobilový ale aj lodný. Medzi hlavné výhody, ktoré plynú z použitia týchto materiálov, patrí zvýšená bezpečnosť, lepší aerodynamický dizajn, úspora hmotnosti, prevádzková efektívnosť a vyššia pevnosť.

Lietectvo a kozmonautika patria medzi prvé obory, ktoré začali vo väčšej miere využívať kompozitné materiály. Ťažké kovové diely sa postupne začali nahradzovať dielmi s nízkou hmotnosťou pre šetrenie paliva, predĺženie vzdialeností letu a pod. Okrem trupov lietadiel sú tieto materiály využité na výrobu vrtule, krídiel, tlakových nádob na palivo, v radarovej technike a tryskách rakiet. Použité sú taktiež v interiéroch lietadiel v podobe sedadiel, palubných mechanizmov alebo potáhov a podláh. [22,23]

V železničnej doprave sa s týmito materiálmi môžeme stretnúť hlavne vo vagónoch a to konkrétne pri podlahách, dverách, ale aj pri bezpečnostných zaradeniach ako sú napríklad absorbéry energie. V interiéroch vysokorýchlostných vlakov, metra, električiek alebo osobných vlakov sú často používané hliníkové sendviče, hlavne vďaka svojej nízkej hmotnosti, odolnosti voči stlačeniu, vysokej tuhosti, nehorľavosti a taktiež slúžia ako akustická izolácia. Používané bývajú najčastejšie ako toaletné moduly, prístupové rampy, podlahové krytiny alebo prípojky. [24]

Hliníkové sendviče môžeme taktiež nájsť v lodnom priemysle a to napríklad vo výletných lodiach, veľkých jachtách, hliadkových člnoch alebo dokonca aj na vrtných plošinách. Najmä vo vysokorýchlostných plavidlách na prepravu cestujúcich sa využívajú tieto materiály z dôvodu zvýšenia rýchlosti. [22]

4.2 Zvariteľnosť sendvičových plechov

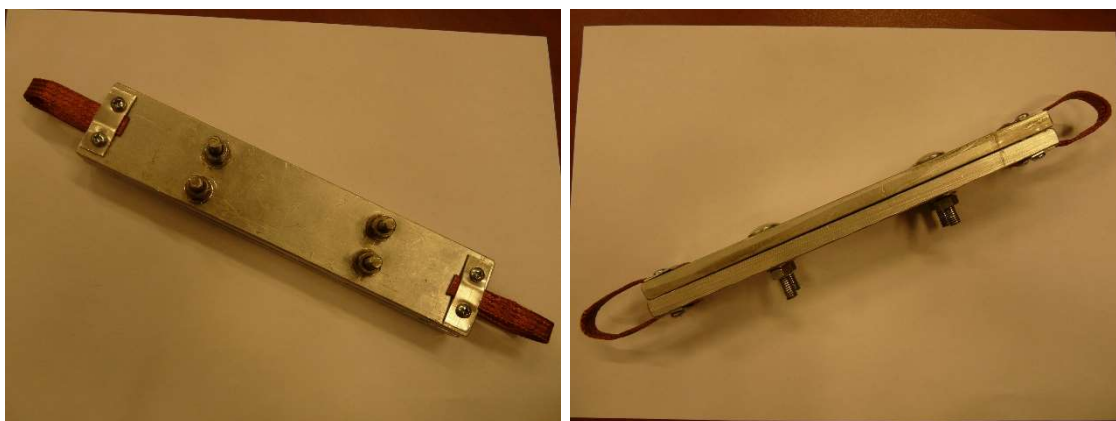
Jedným z hlavných obmedzení v spracovateľnosti tohto typu materiálu v automobilovom priemysle je jeho zvariteľnosť. Vďaka plastovému nevodivému jadrú sa pri odporovom zvarení vyžaduje použitie špecifického režimu. Tavné MIG a MAG zvaranie a laserové zvaranie sú kvôli materiálovej stavbe nemožné. S vývojom sendvičových plechov je tak spojený aj rozvoj lepenia a mechanického spájania jednotlivých dielov. V prípade technológií lepenia sú aplikované rovnaké podmienky a vlastnosti ako pri lepení bežných typov elektrolyticky pozinkovaných ocelí.

4.2.1 Odporová zvariteľnosť sendvičových plechov

Odporovú zvariteľnosť sendvičových materiálov sprevádzajú dva hlavné problémy. Prvým je už spomínaná elektrická nevodivosť polymerového jadra a druhým je vytlačanie polyméru v dôsledku rýchleho ohrievania, čo v konečnom dôsledku spôsobuje stratu významu a predností sendvičových materiálov, ale aj kvalitu zvarania.

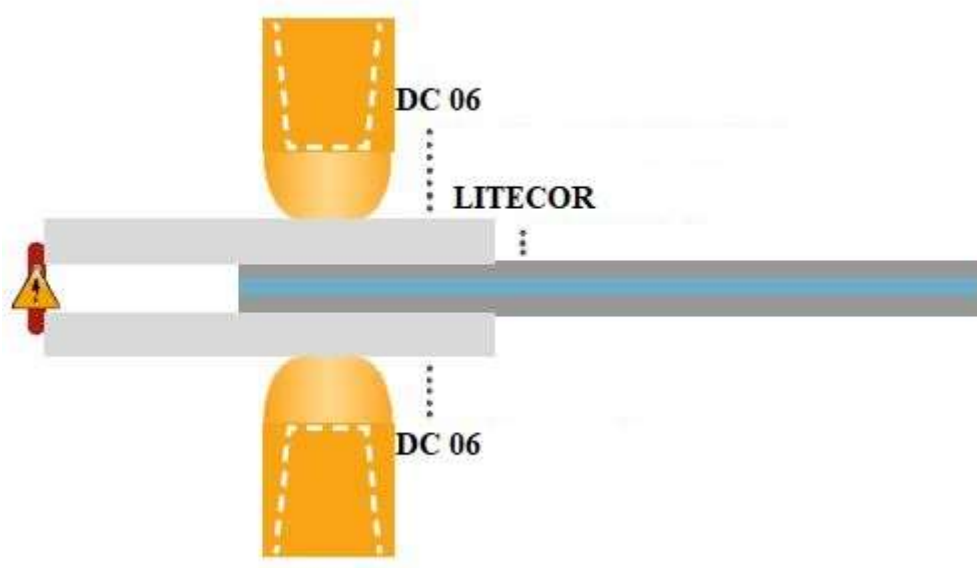
Problém s nevodivosťou polymérového jadra sa podarilo vyriešiť prípravkom, ktorý vytvára vodivé spojenie medzi kryciami plechmi (Obr.14). Vďaka tomuto nástroju

sa tak pri prechode elektrického prúdu dokáže vygenerovať dostatočné teplo na roztavenie polyméru, ktorý je následne prítlakom elektród vytlačáný von z neskoršieho miesta zvaru. Akonáhle sú všetky štyri plechy vo vzájomnom kontakte, prúd začne prúdiť priamo do miesta medzi zvaracie elektródy a vygenerované teplo tak roztaví kov a v tejto oblasti vytvára zvarovú šošovku. Práve z tohoto dôvodu je potrebné, aby bol prípravok čo najďalej od elektród. V prípade, že by bol nástroj moc blízko, prúd by prechádzal cez neho, a tým by sa stratila časť energie, čo by sa nepriaznivo prejavilo na kvalite zvarania.



Obr.14 Prípravok použitý pre vodivé spojenie krycích plechov [25]

Keďže vzdialenosť nástroja od elektródy opačne ovplyvňuje oba problémy (čím bližšie sú elektródy, tým sa generuje väčšie teplo potrebné na roztavenie polyméru, ale zároveň absorbuje časť prúdu potrebného na vytvorenie zvarového spoja) je potrebné čo najideálnejšie odladiť umiestnenie prípravku. Princíp prípravku je ilustrovaný v Obr.15.



Obr.15 Princíp použitia prípravku pre zváranie sendvičových plechov [26]

5 Praktická část

Experimentální část práce je zaměřená na návrh a výrobu přípravku pro bodové odporové svařování sendvičových plechů k homogenním ocelovým plechům. Kdyžže sendvičové plechy jsou složeny z ocelových krycích plechů a nevodivého plastového jádra, tak jejich není možné svařovat typickým způsobem. Právě tento problém je hlavním důvodem návrhu a následné výroby zmíněného přípravku. V experimente je také porovnání jednotlivých zhotovených svařových spojů při různých parametrech.

5.1 Ciele práce

Ciele práce môžeme zhrnúť do týchto bodov:

- Návrh a výroba přípravku pro odporové svařování sendvičových plechů
- Návrh a overenie parametrov svařování
- Hodnotenie kvality, celistvosti a mechanických vlastností svařových spojů s využitím nasledujúcich metód:
 - Vizuálna kontrola
 - Skúška ultrazvukom
 - Odlupovacou skúškou (podľa ČSN EN 12814-4)
 - Metalografická skúška
 - Meranie mikrotvrdości

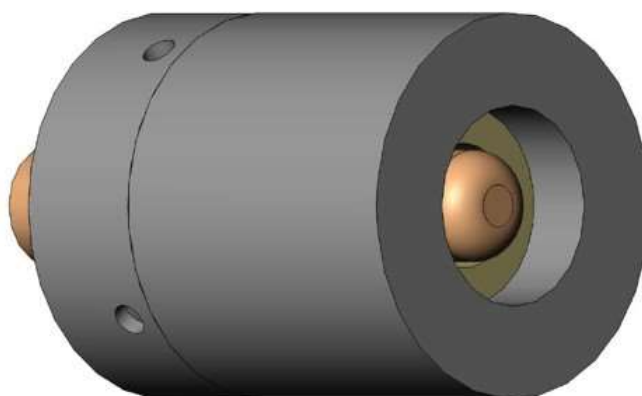
5.2 Návrh a výroba přípravku

Návrh přípravku, ktorý je hlavným bodom diplomovej práce vychádza z princípu popísaného v kapitole 4.3.1. Hlavným dôvodom navrhnutia a konečnej výroby nového nástroja, sú praktické nedostatky, ktoré sprevádza momentálne používaný prípravok. Medzi tieto nevýhody patrí časovo náročná manipulácia (na každý vyhotovený zvar musí byť nástroj upnutý samostatne), čo eliminuje jednu z hlavných výhod odporového

zvárania, ktorou je veľká rýchlosť zvárania. Ďalej to je možnosť zvárania iba plechov, ktoré majú dostatočné miesto na upevnenie prípravku, ale aj použiteľnosť iba u experimentálne pripravených polotovarov.

Z dôvodu, že v čase písania tejto diplomovej práce ešte nie je vyriešená situácia týkajúca sa patentových práv, nemôžu byť zverejnené detailné informácie ohľadom konštrukcie, materiálu a princípu, na ktorom prípravok funguje.

Konečný prípravok je druhou generáciou nástroja. Prvý prípravok (Obr.16) bol založený na rovnakom princípe, avšak disponoval množstvom konštrukčných nedostatkov, ktoré boli odhalené postupným testovaním. Počas testovania bolo zároveň navrhnutých niekoľko úprav, ktoré sa v konečnom dôsledku kladne podpísali na efektívite a použiteľnosti nástroja. V rámci vývoja a výroby bola snaha napríklad o zlepšenie stykových plôch pomocou pružiniek, ktoré by dokonale dotlačali polotovary k sebe. Jednou z variant bolo aj použitie kompozitu s uhlíkovými vláknami.



Obr.16 Model prvej verzie navrhnutého prípravku

Vo vnútri prípravku sa nachádza mechanizmus, vďaka ktorému líčna časť kopíruje plochu v okolí budúceho miesta zvaru pri dotlačení elektród. Prípravok je z konštrukčných a fyzikálnych dôvodov vyrobený z troch rôznych materiálov a je ľahko rozoberateľný pre prípad menenia čapičiek.

Nástroj je zložený z dvoch rovnakých častí (Obr.16), ktoré sú navzájom vodivo spojené, a tak tvoria samostatnú časť montovanú priamo na odporový lis (Obr. 17). Hlavnými výhodami sú:

- prípravok pracuje bez ďalšej potrebnej manipulácie
- nepotrebuje výrazne väčší operačný priestor
- odolný voči rázom (vyššia trvanlivosť)
- ľahká inštalácia
- použiteľný do vysokosériovej výroby (iba výmena čapičiek)



Obr.17 Umiestnenie prípravku na zváracom lise

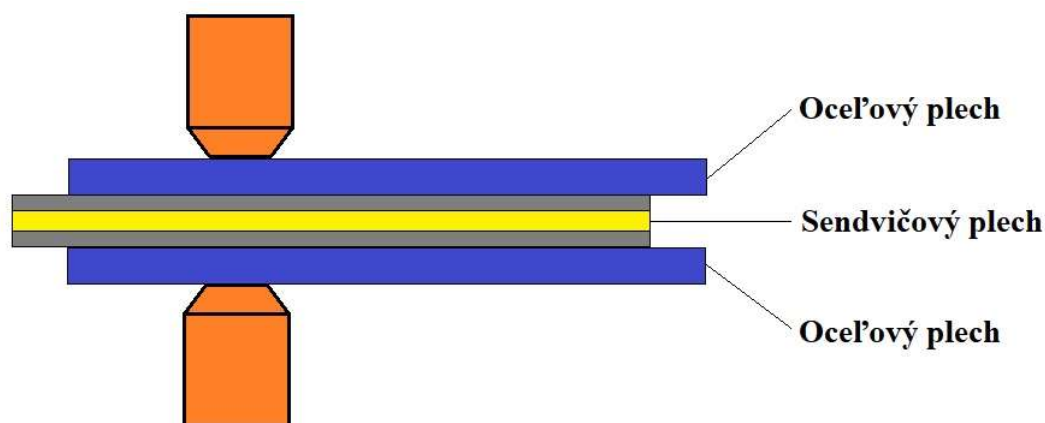
Aj keď prípravok dokázal eliminovať množstvo nedostatkov, ktoré mali predchádzajúce varianty, tak ani táto generácia nie je úplne bez chyby. Hlavnými nedostatkami a nevýhodami sú:

- väčšia teplota ovplyvnená oblasť oproti bežným plechom
- potreba tvarovo menej-náročných zváraných komponentov
- absencia chladenia prípravku (pri vysokosériovej výrobe by dochádzalo k prehrievaniu)

5.3 Příprava zváraných vzoriek

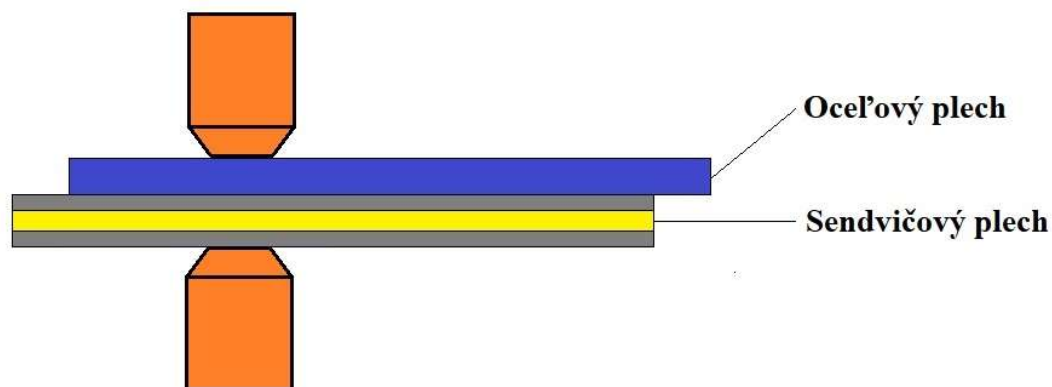
Skúšobné sendvičové plechy s celkovou hrúbkou 0,7 mm a oceľové plechy s hrúbkou 0,8 mm boli narezané na požadované rozmery pre odlupovaciu skúšku (125 x 45 mm).

V prvom kroku sa testovala zvariteľnosť dvoch oceľových plechov k plechu zo sendvičového materiálu podľa Obr.18. Zváranie prebehlo v mäkkom aj tvrdom zvaracom režime pri rôznych variáciách parametrov. Testovanie však ukázalo, že túto kombináciu materiálov je možné zvärať iba v mäkkom režime.



Obr.18 Schéma umiestnenia pri zváraní sendviču s dvomi oceľovými plechmi

V druhej fáze experimentu sa mala testovať aj zvariteľnosť jedného oceľového plechu k plechu zo sendvičového materiálu (Obr.19). Bohužiaľ v dôsledku rozsiahleho testovania prvej varianty sa nepodarilo pozvárať dostatočné množstvo zvarových spojov, a tak by experiment nepriniesol relevantné výsledky.



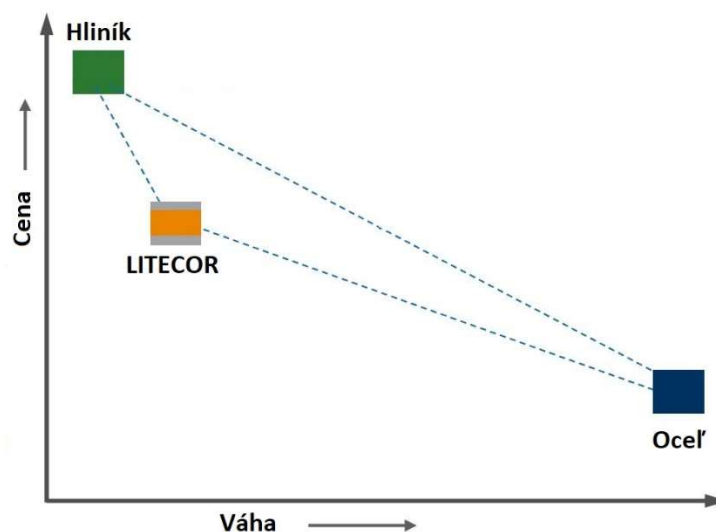
Obr.19 Schéma umiestnenia pri zváraní sendviču s jedným oceľovým plechom

5.4 Použité materiály

Testované vzorky v experimentálnej časti boli zhotovené zo sendvičového plechu Litecor a plechu z hlbokotážnej ocele valcovanej za studena DC 06.

5.4.1 Sendvičové plechy Litecor

Litecor pozostáva z dvoch krycích vrstiev oceľového plechu s hrúbkou 0,2 - 0,3 mm a plastovým jadrom s hrúbkou 0,3 - 1,0 mm. Vytvára tak dokonalé spojenie vysokej pevnosti ocele a nízkej hmotnosti plastu. Táto kombinácia tak v konečnom dôsledku vytvára obzvlášť úsporné zníženie hmotnosti karosérie, ktorá je ľahšia ako oceľ a zároveň lacnejšia ako hliník (Obr.20).



Obr.20 Porovnanie Litecor s oceľou a hliníkom [27]

Medzi hlavné prednosti Litecor, okrem vyššie spomínaných, patrí odolnosť voči korózii, možnosť zvarovania bodovým odporovým zvaraním a vysokou odolnosťou voči preliačeniu. Jednou z najdôležitejších vlastností pre automobilový priemysel je vynikajúca tvariteľnosť za studena, ktorá umožňuje vytvárať aj tvarovo zložitejšie komponenty z jedného kusu. V kombinácii s možnosťou individuálneho prispôsobenia hrúbky materiálu, tak vytvára ideálny materiál pre určenú aplikáciu automobilu.

Ďalšou veľkou výhodou je vplyv na životné prostredie. Vo fáze spracovania a výroby dochádza k nízkemu úniku CO₂ a v konečnom dôsledku je materiál rovnako recyklovateľný ako oceľ.

Zo statickej skúšky ťahom boli namerané hodnoty v Tab.3.

Tab.3 Mechanické vlastnosti Litecor [28]

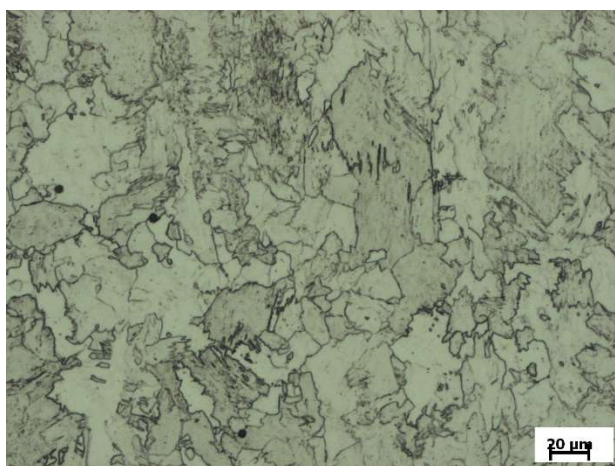
R_{p 0,2} [Mpa]		R_m [Mpa]		A₈₀ [%]
min.	max.	min.	max.	min.
120	180	190	240	28

Oceľový krycí plech

Krycie plechy s hrúbkou 0,2 mm majú pred zhotovením sendviču mechanické vlastnosti uvedené v Tab.4. Typická mikroštruktúra je na Obr.21 a chemické zloženie je v Tab.5.

Tab.4 Mechanické vlastnosti Litecor [28]

C max [%]	Si max [%]	Mn max [%]	P max [%]	S max [%]	Al min [%]	Ti max [%]	Nb max [%]
0,01	0,3	0,9	0,08	0,025	0,01	0,12	0,09



Obr.21 Mikroštruktúra krycích oceľových plechov v sendvičovom materiáli Litecor

Tab.5 Mechanické vlastnosti krycieho plechu v sendvičovom materiáli Litecor [28]

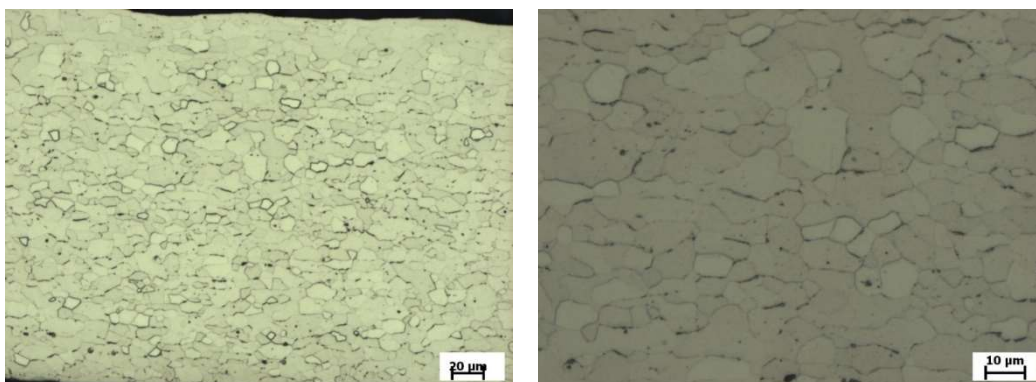
$R_{p\ 0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_{80} [%]
240 - 300	350 - 410	29 -39

Plastové jadro

Plastové jadro pozostáva z PE/PA polyméru s nasledujúcimi vlastnosťami:

- Teplota tavenia: 220 °C
- Teplota tuhnutia / kryštalizácie: 192 °C
- Kryštalizačná entalpia: 30 J / g
- Hustota: 1,03 g / cm³ (v rozsahu teplôt od 120 °C do 160 °C)
- Špecifická tepelná kapacita C_p : 2,22 J / g.k

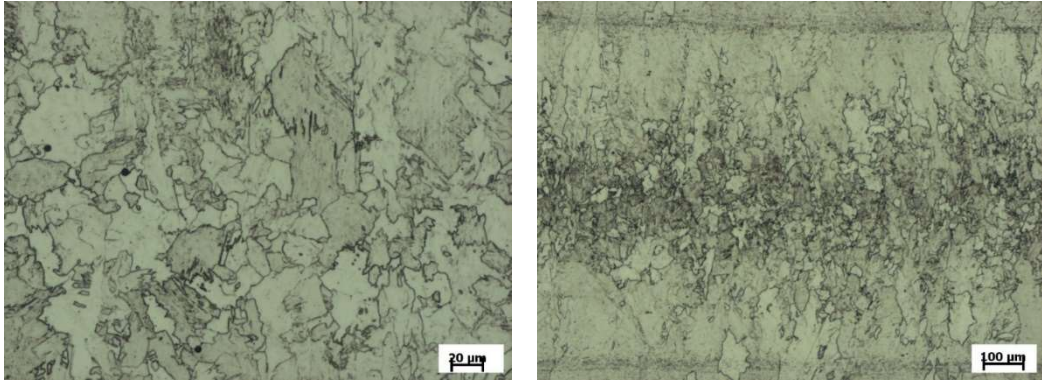
Mikroštruktúra polymérového jadra je uvedená na Obr.22.



Obr.22 Mikroštruktúra polymérového jadra sendvičového materiálu Litecor v rôznych zväčšeniach

5.4.2 Hlbokot'ážná oceľ valcovaná za studena DC 06

Ide o hlbokot'ážnú stabilizovanú oceľ. Jedná sa o ušľachtilú nízkouhlíkovú feritickú oceľ mikrolegovanú titánom. Titán v tejto oceli slúži ako karbonitridačný stabilizátor k úplnému vyčisteniu feritu od intersticiálne rozpusteného uhlíku a dusíku. Zníženie obsahu týchto prvkov zvyšuje hodnotu normálovej anizotropie a zaručuje lepšie hlbokot'ážné vlastnosti. Mikroštruktúru tejto ocele je možné vidieť na Obr.23.



Obr.23 Mikroštruktúra hlbokoťahnej ocele DC 06 v rôznych zväčšeniach

5.5 Použité zvaracie zariadenie

Všetky zvarové spoje sa vyhotovili v laboratóriách Ústavu strojírenské technologie, FS ČVUT v Prahe, na zvaracom lise PMS 11-4 od firmy DALEX (Obr.24), na ktorý bol umiestnený prípravok spomínaný v kapitole 4.2. Charakteristika zvaracieho lisu je uvedená v Tab.6.



Obr.24 Zvarací odporový lis PMS 11-4

Tab.6 Charakteristika zvaracieho odporového lisu PMS 11-4

Poloha zvarania	vertikálny
Pohon zvaracej hlavy	pneumatický
Maximálny zvarací výkon	246 kVA
Menovitý výkon transformátora	100 kVA
Rozsah zvaracieho prúdu	29,6 kA
Sekundárny skratový prúd	37 kA
Rozsah elektródovej sily	200 až 6000 N
Rozsah vzdialeností medzi ramenami	115 až 415 mm
Dĺžka výložníku ramien	550 mm

5.6 Zvaracie parametre a vizuálna kontrola

Všetky testované vzorky boli na základe predošlých experimentov zvarané v mäkkom zvaracom režime s rôznymi parametrami (Tab.7). Celkovo prebehlo zvaranie s 50 rôznymi parametrami, z ktorých bolo vybratých 20, pri ktorých došlo k spojeniu jednotlivých plechov. V tab.5 je vidieť, že to boli parametre 1 až 10, pri ktorých sa menil zvarací prúd (10,0 až 11,5 kA) a prítlačná sila (5,0 až 6,0 kN) pri konštantnom zvaracom čase 600 ms. Pri parametroch 11 až 20 sa zvýšil konštantný zvarací čas na 800 ms, sila sa menila od 2,5 do 6,0 kN a menil sa zase zvarací prúd (8,5 kA až 10,0 kA). V treťom prípade (21-36) sa menila prítlačná sila od 2,0 do 6,0 kN, zvarací čas sa zväčšil na 1000 ms a zvarací prúd sa postupne zvyšoval z 2,0 na 6,0 kA. Predposlednou skupinou parametrov boli parametre 37-43 kde sa opäť menil zvarací prúd (7,0 až 8,5) a prítlačná sila (5,0 až 6,0) pri konštantnom zvaracom čase 1200 ms. Nakoniec to boli parametre 44-50, pri ktorých sa obdobne ako v predošlom prípade menil zvarací prúd a prítlačná sila avšak pri konštantnom zvaracom čase 1400 ms.

Prvotným kritériom pri výbere vhodných parametrov bola kvalita zvarového spoja po vizuálnej kontrole. Za vhodné parametre sa pokladali tie, pri ktorých sa plechy nerozdelili pri odtlačení opačných koncov. V opačnom prípade bolo jasné, že polotovary sa k sebe neprivarili, ale len pritlačili silou elektród plus mohla prebehnúť čiastočná difúzia.

Tab.7 Parametre zvrárania a vyhodnotenie po vizuálnej kontrole

Poradové číslo	Zvárací čas	Zvárací prúd	Sila	Nezvárené	Prepálené	Zvárené	
						Nev.	Vyh.
[-]	[ms]	[kA]	[kN]				
1	600	10,0	6,0			x	
2	600	10,5	6,0				✓
3	600	11,0	6,0				✓
4	600	11,5	6,0				✓
5	600	10,0	5,0	x			
6	600	10,0	5,5	x			
7	600	10,5	5,0	x			
8	600	10,5	5,5	x			
9	600	11,0	5,0	x			
10	600	11,0	5,5	x			
11	800	8,5	6,0				✓
12	800	9,0	6,0			x	
13	800	9,5	6,0			x	
14	800	10,0	6,0			x	
15	800	8,5	2,5	x			
16	800	8,5	3,0	x			
17	800	8,5	3,5	x			
18	800	8,5	4,0	x			
19	800	8,5	4,5	x			
20	800	8,5	5,5	x			
21	1000	7,5	5,5	x			
22	1000	8,0	5,5	x			
23	1000	8,5	5,5	x			
24	1000	9,0	5,5	x			
25	1000	9,5	5,5				✓
26	1000	10,0	5,5		x		
27	1000	10,5	5,5		x		
28	1000	9,5	2,0				✓
29	1000	9,5	2,5				✓
30	1000	9,5	3,0				✓
31	1000	9,5	3,5				✓
32	1000	9,5	4,0				✓
33	1000	9,5	4,5				✓
34	1000	9,5	5,0				✓
35	1000	9,5	5,5				✓
36	1000	9,5	6,0				✓

Poradové číslo	Zvárací čas	Zvárací proud	Sila	Nezvárené	Prepálené	Zvárené	
						Nev.	Vyh.
[-]	[ms]	[kA]	[kN]				
37	1200	7,0	6,0	x			
38	1200	7,5	6,0			x	
39	1200	8,0	6,0			x	
40	1200	8,5	6,0				✓
41	1200	9,0	6,0		x		
42	1200	8,5	5,0		x		
43	1200	8,5	5,5		x		
44	1400	7,0	6,0	x			
45	1400	7,5	6,0	x			
46	1400	8,0	6,0	x			
47	1400	8,5	6,0		x		
48	1400	9,0	6,0		x		
49	1400	8,5	5,0		x		
50	1400	8,5	5,5		x		

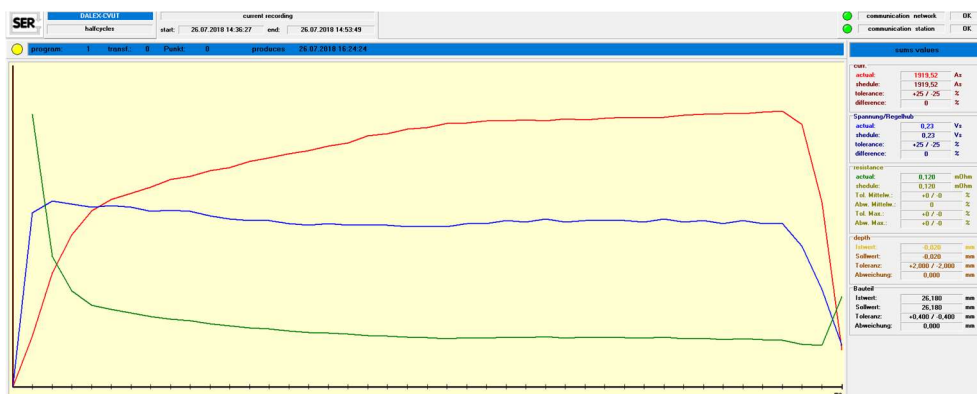
Za vhodné boli vyhodnotené vzorky zvárané parametrami č. 2 až 4, 11, 25, 28 až 36 a 40. Pri pohľade na Tab.5 je vidieť, že prítláčná sila neovplyvňovala zvárenie polotovarov. Naopak privarenie plechov záviselo od zváracieho prúdu a zváracieho času, ktorých hodnota odráža celkové dodané teplo (kapitola 1.3).

Čo sa týka nevhodných parametrov, tie môžeme rozdeliť do 3 kategórií. Prvou boli vzorky, ktoré sa k sebe nepodarilo privariť. Išlo najmä o studené spoje a neprievary. Týchto vzoriek bolo zo všetkých kombinácií parametrov najviac. Ďalšou nevhodnou skupinou boli „prepálené“ vzorky. V tomto prípade dochádzalo k veľkým deformáciám oboch materiálov, vytláčaniu polyméru von z polotovaru, ale aj prepáleniu niektorých vzoriek. Poslednou skupinou boli už spomínané vzorky, ktoré neboli k sebe dostatočne privarené.

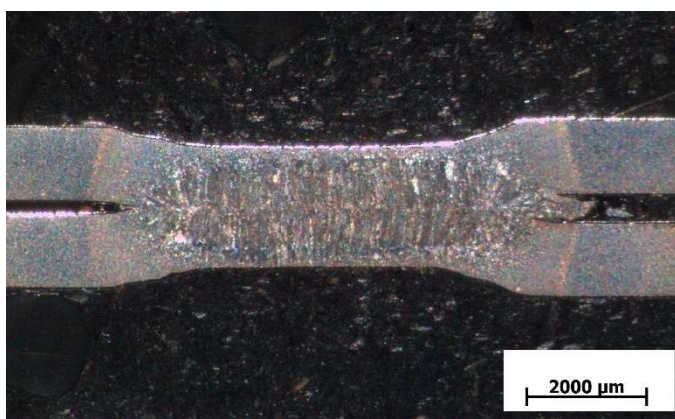
5.6.1 Proces zvarania

Počas zvarania jednotlivých vzoriek, bol pre každú kombináciu parametrov monitorovaný proces zvarania. Snímacie zariadenie bolo umiestnené na obe ramená elektród a pomocou programu boli zhotovené krivky prúdu (červená krivka), napätia (modrá krivka) a odporu (zelená krivka) závislé na čase.

Pre lepšie porovnanie a pochopenie procesov ktoré prebiehajú počas zvarania bol zhotovený aj záznam zo zvarania obyčajných ocelových plechov pri odporúčaných parametroch (Obr.25). Metalografia zvarového spoja pre príslušný záznam je na Obr.26.

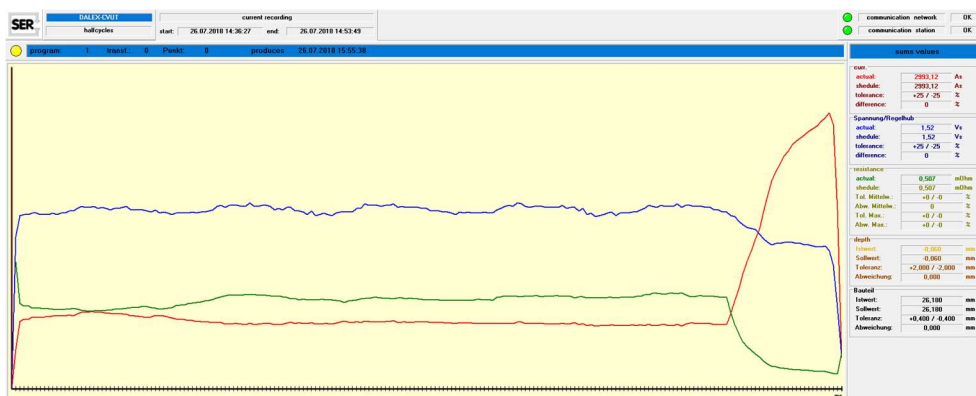


Obr.25 Záznam zo zvarania obyčajných ocelových plechov



Obr.26 Makroštruktúra odporového bodového zvaru zvarného odporúčanými parametrami [5]

Vzhľadom na to, že boli záznamy všetkých vhodných vzoriek takmer totožné, tak pre porovnanie bol vybratý graf reprezentujúci parametre č.32 (Obr.27). Snímok vtlačku po elektróde tejto vzorky je znázornený na Obr.28.

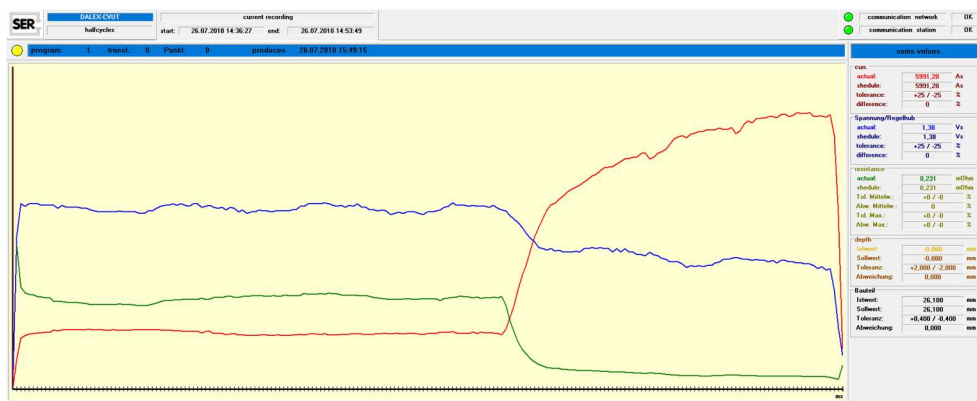


Obr.27 Záznam zo zvárania vhodnými parametrami



Obr.28 Snímok vtlačku po elektróde po zváraní vhodnými parametrami

Rovnako na tom boli aj záznamy nevhodných parametrov, na porovnanie boli tak vybrané parametre č.40 (Obr.29). Snímok vtlačku po elektróde tejto vzorky je systematicky znázornený na Obr.30. Na obrázku je vidieť, že oproti prvému prípadu je vtlačok omnoho hlbší a prepálenejší.



Obr.29 Záznam zo zvárania nevhodnými parametrami



Obr.30 Snímok vtlaku po elektróde po zváraní nevhodnými parametrami

Z jednotlivých záznamov vyplýva, že podľa očakávania je proces zvárania obyčajných oceľových plechov stabilnejší. Je vidieť, že odpor pri zváraní týchto vzoriek klesne podstatne skôr ako pri procese so sendvičovým plechom. Je to spôsobené tým, že v druhom prípade sa najskôr musí roztaviť nevodivé polymérové jadro a následne musí odporový lis prekonať aj odpor krycích plechov. Čo sa týka rozdielu medzi vhodnou a nevhodnou vzorkou, tak je to opäť nástup klesania odporu, tým pádom aj narastania prúdu a zároveň ich doba trvania. Toto je spôsobené tým, že v druhom prípade bolo vygenerované väčšie teplo, ktoré skôr roztavilo polymérové jadro. Túto skutočnosť je vidieť aj pri porovnaní jednotlivých vtlakov po elektróde.

5.7 Kontrola ultrazvukom

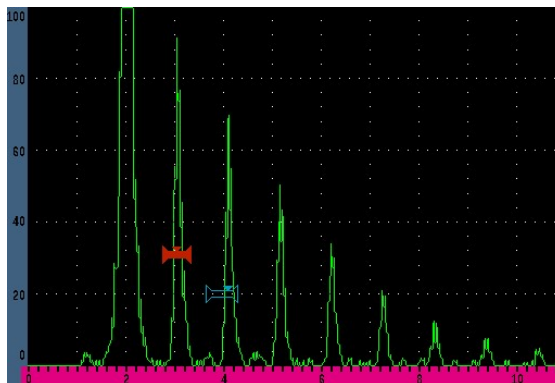
Cieľom použitia ultrazvuku je detekcia vnútorných chýb umiestnených v zvarovom spoji, ako sú rozličné póry, neprievary a pod. Okrem toho umožňuje meranie hrúbok materiálu a zisťovanie úbytkov materiálu vplyvom korózie. Táto kontrola využíva prechod ultrazvukového vlnenia pružným homogénnym prostredím kontrolovaným materiálom. Pri prechode vlnenia materiálom dochádza k zmenšovaniu jeho intenzity a amplitúdy kmitov. Ak vlnenie narazí na rozhranie dvoch prostredí (napr. materiál – vzduch), dochádza k odrazu a lomu vlnenia.

Skúška ultrazvukom bola vykonávaná v laboratóriách Ústavu strojírenské technologie, FS ČVUT v Prahe. Kontrolovaných bolo všetkých 14 vyhovujúcich parametrov, ktoré boli po vizuálnej kontrole označené ako vhodné. Pre tieto sa z každého pozvárali 3 skúšobné vzorky. V prvej fáze merania sa priamou sondou kontrolovala kvalita zvarového spoja (Tab.8).

Tab.8 Výsledky kontroly ultrazvukom

Poradové číslo [-]	Zvárací čas [ms]	Zvárací prúd [kA]	Sila [kN]	Vyhodnotenie [Vyh. / Nevyh.]
2	600	10,5	6,0	
3	600	11,0	6,0	
4	600	11,5	6,0	
11	800	8,5	6,0	
28	1000	9,5	2,0	
29	1000	9,5	2,5	
30	1000	9,5	3,0	
31	1000	9,5	3,5	
32	1000	9,5	4,0	
33	1000	9,5	4,5	
34	1000	9,5	5,0	
35	1000	9,5	5,5	
36	1000	9,5	6,0	
40	1400	8,5	6,0	

Za vyhovujúce boli vyhodnotené len tie parametre, pri ktorých boli v poriadku všetky 3 skúšané vzorky. Príklad vyhovujúceho záznamu z ultrazvuku je znázornený na Obr.31 a jeho metalografický výbrus na Obr.32.

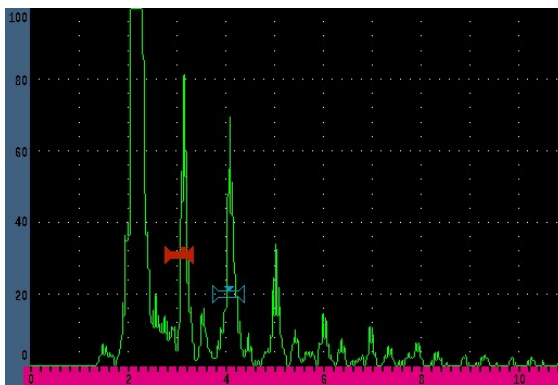


Obr.31 Príklad vyhovujúceho záznamu ultrazvuku



Obr.32 Metalografický výbrus vyhovujúceho zvaru po kontrole ultrazvukom

Skúška ultrazvukom však ukázala, že väčšina zvarových spojov bola nevyhovujúca. Príklad jedného z nevyhovujúcich záznamov je na Obr.33 a príslušný metalografický výbrus je na Obr.34. Ako vyhovujúce boli vyhodnotené len parametre 3, 31 a 32.



Obr.33 Příklad nevyhovujícího záznamu ultrazvuku



Obr.34 Metalografický výbrus nevyhovujícího zvaru po kontrole ultrazvukom

5.7.1 Meranie hĺbky vtlačku po elektróde ultrazvukom

Ultrazvukom bolo vykonané aj meranie hrúbky zvaru, z ktorého sa následne určila hĺbka vtlačku po elektróde (Tab.9). Prípustná hodnota hĺbky vtlačku v súlade s ČSN EN ISO 14373 je maximálne 20 % z hrúbky plechu, čo v našom prípade znamenalo 0,23 mm (celková hrúbka všetkých plechov 2,3 mm teda polovica 1,15 mm).

Tab.9 Hĺbky vtlaku po elektróde jednotlivých parametrov

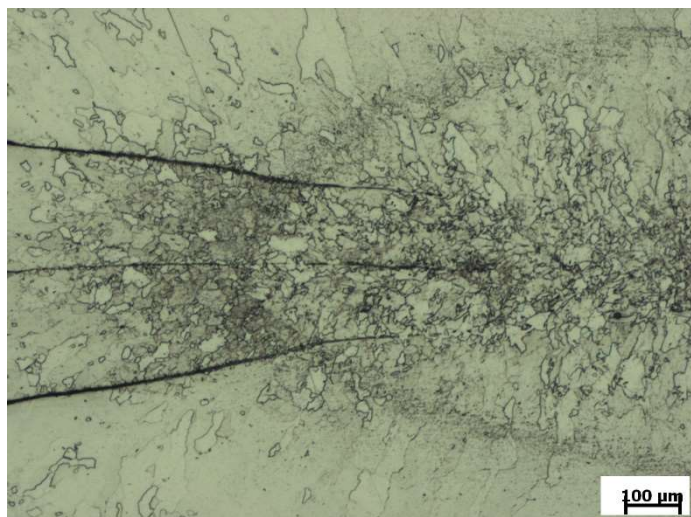
Poradové číslo [-]	Hĺbka č 1 [mm]	Hĺbka č. 2 [mm]	Hĺbka č. 3 [mm]
2	0,34	0,26	0,29
3	0,29	0,27	0,24
4	0,31	0,27	0,41
11	0,26	0,29	0,28
28	0,28	0,26	0,24
29	0,28	0,28	0,27
30	0,34	0,27	0,28
31	0,26	0,20	0,29
32	0,23	0,21	0,22
33	0,24	0,24	0,21
34	0,21	0,23	0,19
35	0,28	0,27	0,28
36	0,29	0,28	0,28
40	0,24	0,28	0,18

Vyhodnocované boli opäť všetky 3 vzorky z vyhovujúcich parametrov. V tomto prípade môžeme považovať za vyhovujúce iba parametre č. 32 a 34.

5.8 Odlupovacia skúška a meranie priemeru šošovky

Skúška bola vykonávaná v súlade s ČSN EN ISO 10447 takisto v laboratóriách Ústavu strojírenské technologie, FS ČVUT v Prahe. Skúška prebiehala vždy na 2 vzorkách pre jednotlivé vyhovujúce parametre. Táto kontrola zahŕňala aj meranie priemeru šošovky.

Odlupovacia skúška priniesla 2 rôzne varianty porušenia zvaru. Prvým typom porušenia bolo úplné vytrhnutie zvaru v okolí teplom ovplyvnenej oblasti (Obr.35) z jedného z vonkajších plechov a zároveň aj zo sendvičového plechu. Tento prípad dokazuje výbornú húževnatosť spojeného materiálu a v Tab.9 je tak označený zelenou farbou.



Obr.35 Teplom ovplyvnená oblasť zvarového spoja sendvičového a ocelového plechu

Druhým prípadom bolo oddelenie zvaru naprieč deliacou rovinou. Táto varianta je spôsobená zlým, prípadne neúplným prevarením. Na základe toho boli tieto prípady vyhodnotené ako nevyhovujúce a sú v Tab.10 označené červenou farbou.

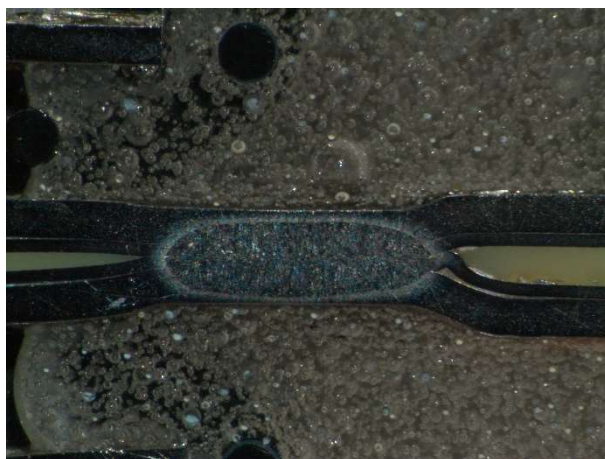
Tab.10 Výsledky odlupovacej skúšky s jednotlivými priermi zvarovej šošovky

Poradové číslo [-]	Priemer č 1 [mm]	Priemer č. 2 [mm]
2	6,57	6,21
3	7,12	6,68
4	7,24	7,41
11	6,47	6,11
28	4,94	5,28
29	5,22	5,14
30	5,95	5,45
31	5,47	5,72
32	5,21	5,53
33	5,98	6,11
34	6,12	5,54
35	6,41	5,57
36	6,98	6,65
40	7,24	7,36

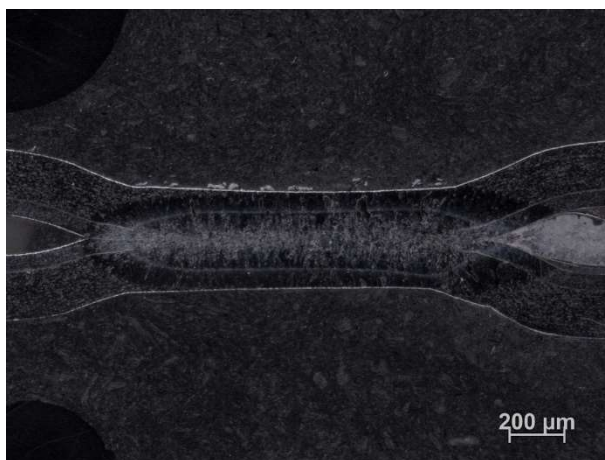
5.9 Metalografia a meranie mikrotvrdości

Skúmanie metalografických výbrusov prebehlo rovnako ako pri ostatných skúškach na všetkých vzorkách, ktoré vyhoveli vizuálnej kontrole. Kontrola prebehla v laboratóriách Ústavu strojírenské technologie, FS ČVUT v Prahe.

Jednotlivé skúmané vzorky je možné z metalografického hľadiska rozdeliť do niekoľkých skupín. Prvou sú vzorky, ktoré boli vyhodnotené ako vyhovujúce. Tieto zvary je možné vidieť na Obr.36 a Obr.37.

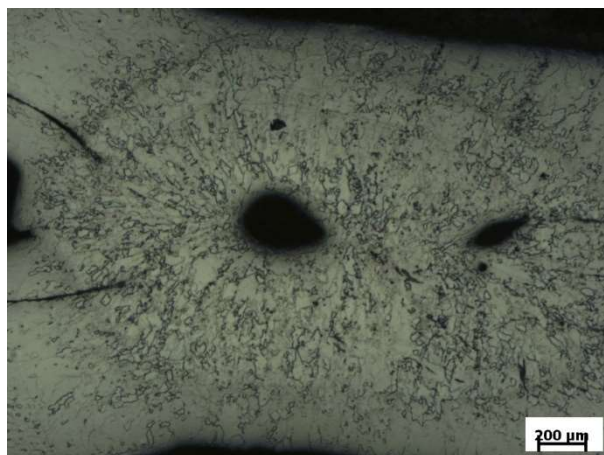


Obr.36 Metalografický výbrus vzorku zváraného parametrami č.31

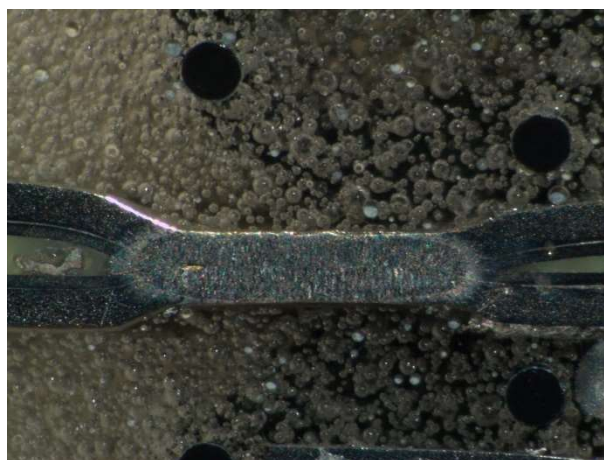


Obr.37 Metalografický výbrus vzorku zváraného parametrami č.3

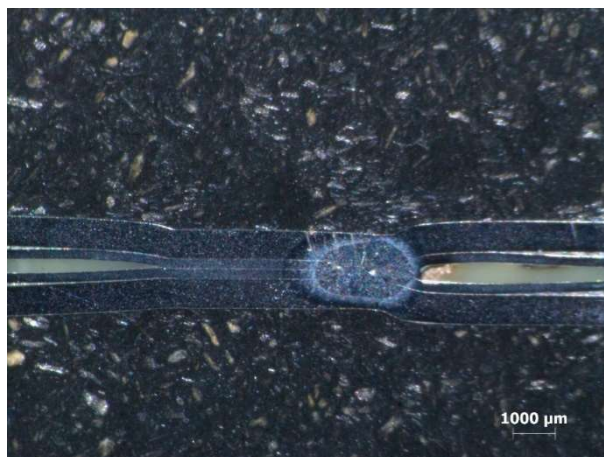
Ďalšie dve kategórie zastupujú nevyhovujúce zvarové spoje. Prvým dôvodom tohto vyhodnotenia je výskyt vnútorných defektov a neprievarov. Takéto prípady sú na Obr.38, Obr.39, Obr.40 a Obr.41.



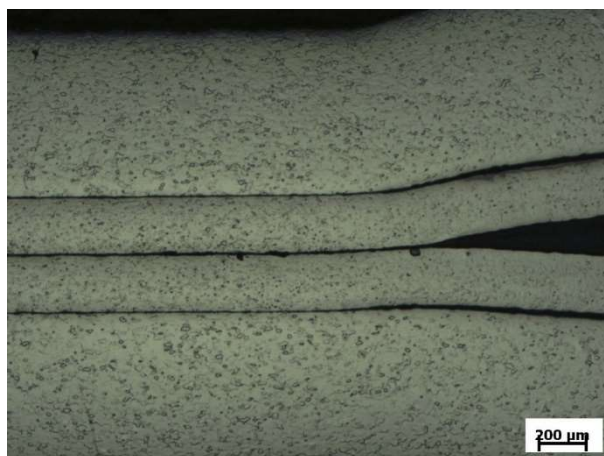
Obr.38 Mikroštruktúra nevyhovujúceho zvarového spoja s vnútornou vadou



Obr.39 Metalografický výbrus nevyhovujúceho zvarového spoja s vnútornou vadou



Obr.40 Metalografický výbrus neprevarenej vzorky

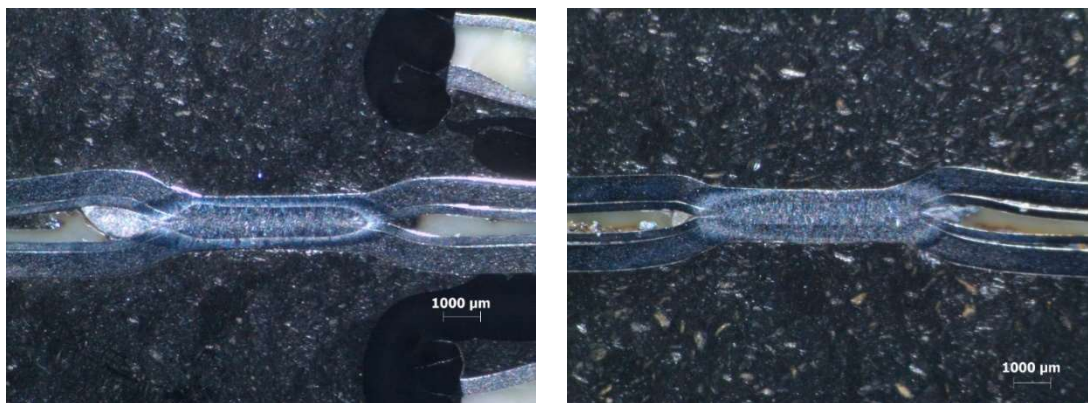


Obr.41 Mikroštruktúra sendvičového materiálu neprevarenej vzorky

Posledné vzorky sú nevyhovujúce na základe príliš veľkej deformácie okolia zvaru, prípadne nerovnomernej deformácie základného materiálu. Tieto vzorky sú na Obr.42, Obr.43 a Obr.44.



Obr.42 Metalografický výbrus vzorky s nesúmernou deformáciou



Obr.43 Metalografické výbrusy vzoriek s príliš veľkým vybulením v okolí zvaru

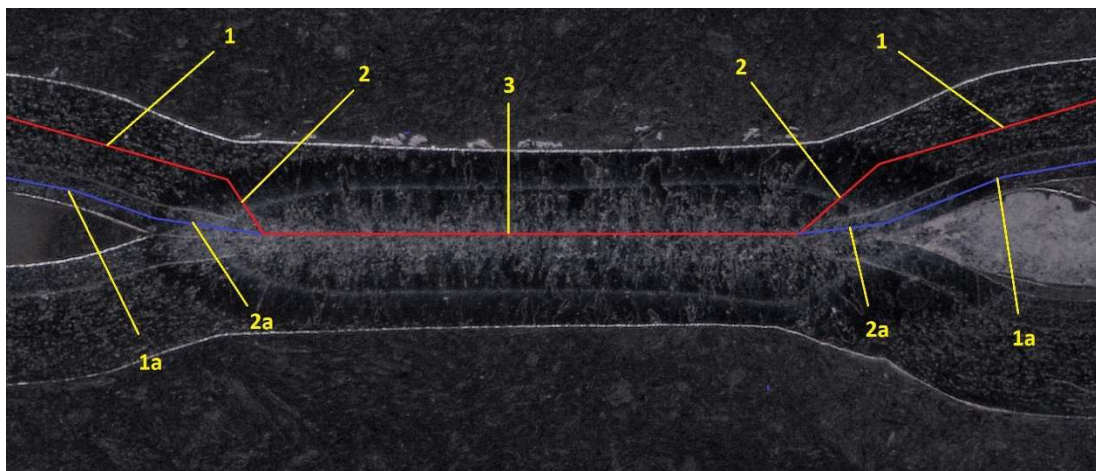


Obr.44 Metalografický výbrus vzorky s vytlačeným polymérovým jadrom

5.9.1 Meranie Mikrotvrdości

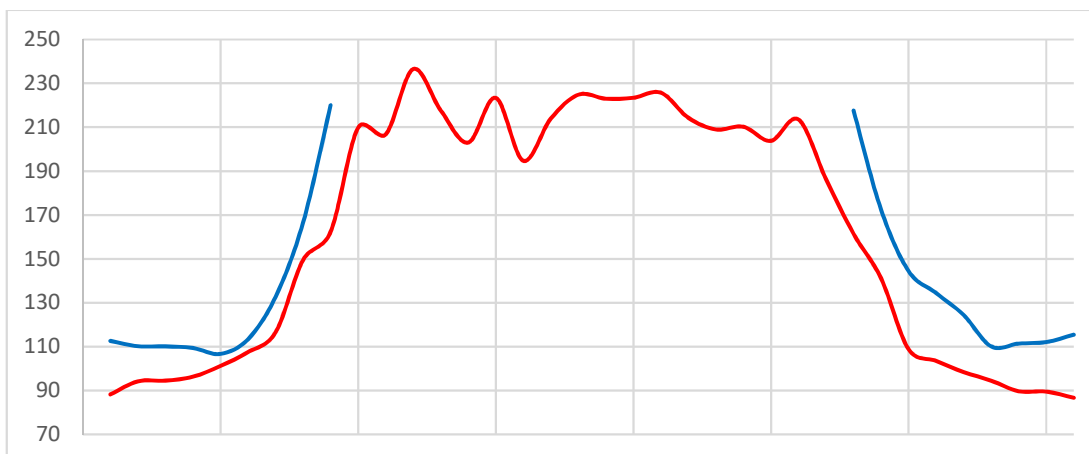
Meranie mikrotvrdości podľa Vickersa bolo vykonávané v laboratóriách Ústavu strojírenské technologie, FS ČVUT v Prahe na tvrdomere IndentaMet od firmy BUEHLER. Testovali sme metalografické výbrusy na vzorke pozváranej vyhovujúcimi parametrami zo všetkých skúšok (Graf.1) a pre porovnanie priebehu tvrdosti zároveň aj na vzorke, ktorej parametre nevyhoveli žiadnej (Graf.2).

Vtláčaným telesom bol diamantový štvorboký ihlan s vrcholovým uhlom 136° . Merali sme so zaťažением 0,5 kPa (HV0,5), ktoré na vzorky pôsobilo 10 s. Každá vzorka bola podrobená meraniu na 60 rôznych miestach (Obr.45). Mikrotvrdość bola meraná v základnom materiáli a to vonkajšieho plechu (poloha č. 1) a krycieho sendvičového plechu (poloha č. 1a), teplom ovplyvnenej oblasti (obdobne 2 a 2a) a materiáli v zvarovej šošovke (poloha č. 3).

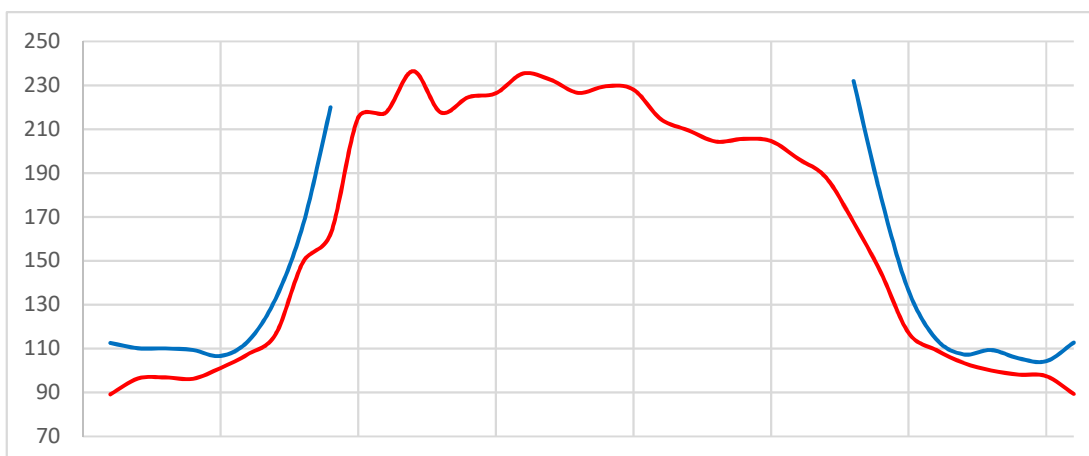


Obr.45 Testované miesta mikrotvrdości na zváraných vzorkách

Graf.1 Meranie mikrotvrdości (HV 0,5) na vyhovujúcej vzorke



Graf.2 Meranie mikrotvrdości (HV 0,5) na nevyhovujúcej vzorke



Pri podrobnom meraní mikrotvrdości bolo zistené, že najnižšia tvrdosť bola v oboch prípadoch nameraná v základnom materiáli vonkajšieho plechu. Z meraní vyplýva, že tvrdosť nebola podľa normy prekročená a zároveň od teplom ovplyvnenej oblasti až po stred šošovky takmer lineárne rastie tvrdosť. Je to spôsobené tým, že roztavený kov rýchlejšie chladne na rozhraní a najpomalšie v strede. Skúmanie ukázalo aj to, že najtvrdším miestom na vzorke je šošovka zvaru.

5.10 Zhrnutie výsledkov

Hlavným cieľom diplomovej práce bolo navrhnutie a následná výroba prípravku pre bodové odporové zváranie sendvičových plechov. Snahou bolo čo najviac eliminovať nedostatky, ktoré mali nástroje používané doteraz.

Výskumom a rozsiahlym testovaním sa podarilo navrhnuť a vyrobiť prípravok, vďaka ktorému je možné pri vhodne použitých parametroch zvärať sendvičové plechy s plechmi z bežnej ocele. Vývoj tohto prípravku je rozdelený do 3 fáz. Počiatočnou fázou bolo pozmenenie geometrie oproti prípravku, z ktorého tento výskum vychádzal. V druhej fáze boli použité vhodnejšie materiály a zmenil sa mechanizmus, na ktorom nástroj pracoval. V poslednej je už nástroj v konečnej podobe, kde oproti predošlej verzii prešiel konštrukčnými a materiálými zmenami. Na rozdiel od predošlých je tento nástroj schopný pracovať samostatne, bez potreby manipulácie či upínania medzi jednotlivými zväracími procesmi. Ďalšou veľkou výhodou je zmenšenie operačného priestoru v okolí miesta budúceho zvaru, čo v konečnom dôsledku vytvára možnosť zvárania zložitejších komponentov. V neposlednej rade je veľkým prínosom aj ľahká inštalácia a jednoduchá obsluha pri výmene čapičiek.

Ďalším z cieľov diplomovej práce bolo odladenie parametrov odporového zvárania, pre ktoré je možné zvärať sendvičové plechy s plechmi z bežnej ocele. Pre vyhodnotenie kvality zvarových spojov, boli využité nasledujúce kontroly a kritériá (Tab.11).

Tab.11 Výsledky jednotlivých skúšok a kontrol

Poradové číslo [-]	Vizuálna kontrola [Vyh. / Nevyh.]	Kontrola ultrazvukom [Vyh. / Nevyh.]	Hĺbka vtlačku po elektróde [Vyh. / Nevyh.]	Odlupovacia skúška [Vyh. / Nevyh.]
1				
2				
3				
4				
11				
12				
13				
14				
28				
29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				
38				
39				
40				

Prvým bodom vyselektovania parametrov bolo určenie rozsahov, pri ktorých je možné zvarané polotovary spojiť. V počiatočnej fáze experimentu vstupovalo do testovania 50 rôznych kombinácií parametrov, z ktorých sa iba pri 20 podarilo docieľiť spojenie materiálov. Následne sa vizuálnou kontrolou vyhodnocovala kvalita zvarového spoja. Táto skúška odhalila, že aj keď sa v 6 prípadoch podarilo materiál spojiť, tak sa ho nepodarilo prevariť. Do všetkých ďalších skúšok tak vstupovalo už len 14 „vyhovujúcich“ parametrov.

Ďalším rozhodujúcim kritériom bola kontrola ultrazvukom. Tá odhalila chyby vo väčšine zvarových spojov a iba v troch prípadoch sa podarilo vytvoriť vyhovujúci spoj. Boli to parametre č.3. ($t = 600 \text{ ms}$, $I = 11 \text{ kA}$, $F = 6 \text{ kN}$), č.31. ($t = 1000 \text{ ms}$, $I = 9,5 \text{ kA}$, $F = 3,5 \text{ kN}$), a parameter č.32. ($t = 1000 \text{ ms}$, $I = 9,5 \text{ kA}$, $F = 4 \text{ kN}$). Ultrazvukom sa však

kontrolovala aj hĺbka vtlačku po elektróde, ktorej vyhoveli iba dva parametre a to č.32 a č.34. To znamenalo, že po tejto skúške ostal jediný vyhovujúci parameter po všetkých kontrolách (č.32) (Obr.46).



Obr.46 Makroštruktúra zvarového spoja zvaraného parametrami č.32

Posledným porovnávacím faktorom, boli výsledky vyhodnotené po odlupovacej skúške. Skúška ukázala, že ako nevyhovujúce boli vyhodnotené len parametre č.3, č.5, č.14 a č.15.

V konečnom dôsledku sa podarilo nájsť jediná kombináciu parametrov, ktorá vyhovela všetkým skúškam. Na základe toho, môžeme za ideálnu kombináciu materiálov pre odporové zvaranie sendvičových plechov a plechov z hlbokotážnej oceli považovať parameter č.13 ($t = 1000 \text{ ms}$, $I = 9,5 \text{ kA}$, $F = 4 \text{ kN}$).

6 Závěr

Výsledky diplomovej práce ukazujú, že sendvičové plechy je možné zvärať s plechmi z bežnej ocele odporovým bodovým zvaraním. Výskum ukázal, že pri použití vhodného mechanizmu a výbere správnych materiálov môžeme eliminovať nedostatky, ktoré majú iné nástroje.

V rámci diplomovej práce sa podarilo navrhnuť a vyrobiť prípravok, vďaka ktorému je možné zvärať sendvičové plechy. Tento nástroj sa ukázal ako veľmi efektívny, čo sa týka rýchlosti celého procesu a veľmi odolný, čo sa týka počtosti zvarových cyklov. Zároveň boli odstránené niektoré nevýhody, ktorými disponovali predošlé generácie. Medzi hlavné výhody teda patrí napríklad zmenšenie operačného priestoru, ľahká inštalácia, nenáročná výmena čapíčiek, ale hlavne samostatnosť nástroja, ktorý nepotrebuje ďalšiu manipuláciu.

Súčasťou experimentálnej časti je aj výskum, ktorý sa zaoberá výberom vhodných parametrov pre odporové zvaranie sendvičových plechov za použitia vyššie spomínaného prípravku. Na základe niekoľkých skúšok a kontrol (vizuálna kontrola, kontrola ultrazvukom, kontrola hĺbky vtlačku po elektróde a odlupovacia skúška) sa podarilo určiť vhodnosť jednotlivých kombinácií parametrov. Vďaka týmto kritériám sa podarilo nájsť vhodnú variáciu parametrov ($t = 1000$ ms, $I = 9,5$ kA, $F = 4$ kN), ktorá sa pri tomto spôsobe zvarania ukázala ako najideálnejšia.

Na záver môžeme skonštatovať, že sa nám podarilo naplniť ciele, ktoré sme si stanovili na začiatku.

Použitá literatura

- [1] KRIVOŠÍK, M [online] *Odporové zvarovanie*. Dostupné na internete:
<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=382>
- [2] KUBÍČEK, J. 2002 . *Technologie svařování* [online]. [cit 2011-04-03]. Dostupné na internete: <http://www.scribd.com/doc/39711167/Technologie-svarovani-Kubicek>
- [3] BERTIN, L. 2014. *Tensile Strength of Automotive Aluminum Joints Using Resistance Spot Welding, Self-Piercing Riveting and Adhesive Hybrid Joining*. Electronic Theses and Dissertations. 5234. Dostupné na internete:
<https://scholar.uwindsor.ca/etd/5234>
- [4] RAZMPOOSHT, M – SHAMARIAN, M – ESMAILZADEH, M. 2015. *The microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded Fe–31Mn–3Al–3Si TWIP steel*
- [5] FERANEC, J. 2016. *ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ VYSOKOPEVNÝCH OCELÍ S VARIANTNÍM TEPELNÝM ZPRACOVÁNÍM*. Bakalářská práce, Praha
- [6] ADAMKA, J. – GRUTKA, E. – VESELKO, J. 1985. *Teória zvarovania*. 1. vyd. Bratislava : Alfa
- [7] HLAVATÝ, I. 2009. *Rozdělení metod odporového svařování* [online]. [cit 2011-04-03] Dostupné na internete: <http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/10-21.pdf>
- [8] KUNCIPÁL et al. 1986. *Teorie svařování*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1986, 272 s.
- [9] LIPA, M. 1966. *Bodové a švové zvarovanie*. 1. vyd. Bratislava : SNTL, 1966, 344s.
- [10] HOLASEK, J. 1968. *Odporové zvarovanie*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry

- [11] PRŮMYSLOVÁ AUTOMATIZACE REGULOVANÉ POHONY
ROBOTICKÁ PRACOVIŠTĚ KAMEROVÉ SYSTÉMY OBCHOD -
PDF. [online] Dostupné z: <http://docplayer.cz/10256348-Prumyslova-automatizace-regulovane-pohony-roboticka-pracoviste-kamerove-systemy-obchod.html>
- [12] DRASTÍK, F. et al. 2004. *Strojnická příručka*. Praha : Dashöfer Holding & Verlag Dashöfer, 2004. 200 s. ISBN 80-86229-65-3
- [13] TOLNAI, R. 2002. *Strojárska technológia. I. časť. 3.* nezm. vyd. Nitra : SPU, 2002. 319 s. ISBN 80-8069-035-9
- [14] LIPA, M. 2000. Odporové zvaranie. In *Zváracie metódy a zariadenia*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2000, 610 s. ISBN 80-85771-84-5
- [15] ESAB[online][cit2013-12-11].
Dostupné na internete: <http://sk.esab.net/sk/sk/education/processes.cfm> >é
- [16] BETÁK, T. 2011. *HODNOTENIE KVALITY ZVAROV VYHOTOVENÝCH ODPOROVÝM ZVÁRANÍM*, Bakalárska práca, Trnava
- [17] NPTEL[online] 2009, *Resistance welding*. Dostupné na internete:
<http://nptel.ac.in/courses/112107144/welding/lecture11&12.htm>
- [18] HLAVATÝ, I. 2009. *Rozdělení metod odporového svařování* [online]. [cit 2011-04-03] Dostupné na internete: <http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/10-21.pdf>
- [19] JESVA s.r.o. , 2005-2006. *Robotizované zvaracie pracovisko*. [online] Dostupné na internete: <http://www.jesva.cz/produkty.php?idp=120&title=Robotizovan%C3%A9+zv%C3%A1racie+pracovisko>

- [20] Blumenbecker Prag s.r.o., *Robotická pracoviště*, Dostupné na internete:
<http://docplayer.cz/10256348-Prumyslova-automatizace-regulovane-pohonyroboticka-pracoviste-kamerove-systemy-obchod.html>
- [21] PILVOUSEK, T. – ŠANOVEC, J. *Lehké konstrukce automobilů - sendvičové materiály*. 2016. Škoda Auto, ČVUT FS v Praze. Dostupné na internete:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-automobilu-sendvicove-materialy.html>
- [22] Hexcel.com [online]. [cit. 2015-12-14]. Products. Dostupné na internete:
<http://www.hexcel.com/products>
- [23] Kt.tul.cz [online]. [cit. 2015-12-12]. Výzkum trhu kompozitů. Dostupné na internete: <http://www.kht.tul.cz/items/ABP/2010/%C5%A0afa%C5%99%C3%ADkov%C3%A1%20-%20V%C3%Bdzkum%20trhu%20kompozitn%C3%AAdch%20materi%C3%A1l%C5%AF%20v%20%C4%8CR.pdf>
- [24] BITZER, T. 1997. Honeycomb technology. V UK 1. vyd. Glasgow: SpringerScience+Business Media, 1997, 230 s. ISBN 978-94-010-6474-3
- [25] KOLAŘÍK, L. 2016. *Ověření svařitelnosti materiálu LITECOR*. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie
- [26] APPLICATION POTENTIAL OF LITECOR IN THE BODY, The project ThyssenKrupp InCar plus, Springer Vieweg, 2014 [online]
Dostupné na internete: <https://slideheaven.com/application-potential-of-litecor-in-the-body.html>
- [27] THIER, J. 2015. *Litecor der innovative werkstoffverbund für die autoindustrie*. Škoda Auto.

- [28] Technische daten für LITECOR [online] Dostupné na internete:
www.thyssenkrupp-steel-europe.com

Zoznam obrázkov

Obr. 1	Pomery odporov a teplôt pri odporovom zváraní.....	11
Obr.2	Odpor v oblasti bodového zvaru.....	12
Obr. 3	Metalurgický proces počas bodového odporového zvárania.....	13
Obr. 4	Oblasti zvaracích teplôt pri odporovom zváraní ocelí.....	16
Obr.5	Proces odporového bodového zvárania.....	18
Obr.6	Oblasti mäkkého a tvrdého zvaracieho režimu.....	21
Obr. 7	Základné druhy odporového zvárania.....	23
Obr.8	Princíp odporového bodového zvárania.....	25
Obr. 9	Základné druhy bodového odporového zvárania.....	25
Obr. 10	Proces vzniku bodového zvaru pri zváraní elektrickým odporom.....	26
Obr.11	Makroštruktúra bodového zvarového spoja.....	26
Obr.12	Automatizované zvaracie pracovisko.....	29
Obr.13	štruktúra sendvičového plechu Litecor.....	31
Obr.14	Prípravok použitý pre vodivé spojenie krycích plechov.....	33
Obr.15	Princíp použitia prípravku pre zváranie sendvičových plechov.....	34
Obr.16	Model prvej verzie navrhnutého prípravku.....	36
Obr.17	Umiestnenie prípravku na zvaracom lise.....	37
Obr.18	Schéma umiestnenia pri zváraní sendviču s dvomi oceľovými plechmi.....	38
Obr.19	Schéma umiestnenia pri zváraní sendviču s jedným oceľovým plechom.....	39
Obr.20	Porovnanie Litecor s oceľou a hliníkom.....	40
Obr.21	Mikroštruktúra krycích oceľových plechov v sendvičovom materiáli Litecor..	41

Obr.22 Mikroštruktúra polymérového jadra sendvičového materiálu Litecor v rôznych zväčšeniach.....	42
Obr.23 Mikroštruktúra hlbokot'ážnej ocele DC 06 v rôznych zväčšeniach.....	43
Obr.24 Zvárací odporový lis PMS 11-4.....	43
Obr.25 Záznam zo zvárania obyčajných oceľových plechov.....	47
Obr.26 Makroštruktúra odporového bodového zvaru zvarového odporúčanými parametrami.....	47
Obr.27 Záznam zo zvárania vhodnými parametrami.....	48
Obr.28 Snímok vtláčku po elektróde po zváraní vhodnými parametrami.....	48
Obr.29 Záznam zo zvárania nevhodnými parametrami.....	49
Obr.30 Snímok vtláčku po elektróde po zváraní nevhodnými parametrami.....	49
Obr.31 Príklad vyhovujúceho záznamu ultrazvuku.....	51
Obr.32 Metalografický výbrus vyhovujúceho zvaru po kontrole ultrazvukom.....	51
Obr.33 Príklad nevyhovujúceho záznamu ultrazvuku.....	52
Obr.34 Metalografický výbrus nevyhovujúceho zvaru po kontrole ultrazvukom.....	52
Obr.35 Teplom ovplyvnená oblasť zvarového spoja sendvičového a oceľového plechu	54
Obr.36 Metalografický výbrus vzorku zvarového parametrami č.31.....	55
Obr.37 Metalografický výbrus vzorku zvarového parametrami č.3.....	55
Obr.38 Mikroštruktúra nevyhovujúceho zvarového spoja s vnútornou vadou.....	56
Obr.39 Metalografický výbrus nevyhovujúceho zvarového spoja s vnútornou vadou..	56
Obr.40 Metalografický výbrus neprevarenej vzorky.....	57
Obr.41 Mikroštruktúra sendvičového materiálu neprevarenej vzorky.....	57
Obr.42 Metalografický výbrus vzorky s nesúmernou deformáciou.....	58
Obr.43 Metalografické výbrusy vzoriek s príliš veľkým vybulením v okolí zvaru.....	58

Obr.44 Metalografický výbrus vzorky s vytlačeným polymérovým jadrom.....	58
Obr.45 Testované miesta mikrotvrdości na zváraných vzorkách.....	59
Obr.46 Makroštruktúra zvarového spoja zváraného parametrami č.32.....	63

Zoznam tabuliek

Tab.2 Hodnoty odporúčaných zvaracích parametrov pre rôzne typy materiálov.....	20
Tab.2 Rozsahy parametrov mäkkého a tvrdého režimu.....	22
Tab.3 Mechanické vlastnosti Litecor.....	40
Tab.4 Mechanické vlastnosti Litecor.....	41
Tab.5 Mechanické vlastnosti krycieho plechu v sendvičovom materiáli Litecor.....	41
Tab.6 Charakteristika zvaracieho odporového lisu PMS 11-4.....	44
Tab.7 Parametre zvarania a vyhodnotenie po vizuálnej kontrole.....	45, 46
Tab.8 Výsledky kontroly ultrazvukom.....	50
Tab.9 Hĺbky vtláčku po elektróde jednotlivých parametrov.....	53
Tab.10 Výsledky odlupovacej skúšky s jednotlivými priermi zvarovej šošovky.....	54
Tab.11 Výsledky jednotlivých skúšok a kontrol.....	62

Graf.1 Meranie mikrotvrlosti (HV 0,5) na vyhovujúcej vzorke.....61

Graf.2 Meranie mikrotvrlosti (HV 0,5) na nevyhovujúcej vzorke.....61