

Vliv způsobu řízení svařovacího procesu na kvalitu odporových svarů

Ondřej Balihar*, Marie Kolaříková¹

¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

Výsledkem práce je porovnání dvou způsobů řízení odporového svařovacího procesu a vyhodnocení jeho vlivu na kvalitu bodových svarových spojů. Jako základní materiál byla použita za tepla tvářená vysokopevnostní mangan-borová ocel 22MnB5 s povrchovou vrstvou AlSi, která se v automobilovém průmyslu používá na pevnostní prvky karoserie. Ocelové plechy byly před svařováním upraveny tepelným zpracováním pro simulaci tepelného cyklu během tváření za tepla. Teplota ohřevu byla 920°C a doba výdrže na teplotě byla 7 minut, 11 minut, 14 minut a 5 minut. Pro bodové svařování byl použit odporový lis od firmy Dalex a svařovací zdroj s adaptivním řízením od firmy Elmatech. Pro hodnocení svarových spojů byla použita mechanizovaná stříhová zkouška, měření průměrů svarových čochek a metalografické zkoušky.

Klíčová slova: STČ; svařování; bodové odporové svařování; PMS 11-4; MIDIsport VISION AV

1. Úvod

V dnešní době probíhá obrovský rozvoj a vývoj technologií v automobilovém průmyslu. Používají se samonosné konstrukce a využívají se ve větším množství vysokopevné martenzitické oceli v karosériích vozů (zejména pro bezpečnostní prvky). Zrychlení a zjednodušení výroby pomáhá používání metod spojování materiálů pomocí bodového odporového svařování.

Materiály používané v automobilovém průmyslu jsou hlavně hlubokotažné oceli s mezi kluzu $\sigma_{kt} < 200 \text{ N/mm}^2$, vysokopevnostní oceli s mezi kluzu $\sigma_{kt} = 200-400 \text{ N/mm}^2$, ultra vysokopevnostní oceli s mezi kluzu $\sigma_{kt} = 400-700 \text{ N/mm}^2$, speciální vysokopevnostní oceli s mezi kluzu $\sigma_{kt} = 700-1000 \text{ N/mm}^2$ a za tepla tvářené vysokopevnostní oceli s mezi kluzu $\sigma_{kt} = 1000-1200 \text{ N/mm}^2$. Na bezpečnostní prvky se používá vysokopevnostních ocelí hlavně s martenzitickou strukturou a jedná se o za tepla tvářené manganbórové oceli. Ve firmě Škoda Auto je nejčastěji používaná 22MnB5.

V automobilovém průmyslu se již nepoužívají oceli, které by neměly povrchovou úpravu. Povrchová úprava slouží k zamezení koroze a tedy ke zvýšení životnosti karoserie. Povlak AlSi na oceli 22MnB5 je nanášen za účelem zabránění oxidace při tváření za tepla. Základní složení je 90% Al + 10% Si s tloušťkou vrstvy 40 μm .

Při tepelném zpracování dochází k difuzi Fe do Al-Si a k tvorbě přechodové vrstvy na bázi Al-Fe-Si. Díky obsahu malého množství bóru je tato ocel vhodná pro kalení lisováním a zároveň podporu svařitelnosti. [1],[2]

2. Materiál a použitá zařízení (metody)

Ocel 22MnB5 je od výrobců dodávána s feriticko-perlitickou strukturou a v tomto stavu má mez kluzu $R_{p0,2}$ 350 - 550 MPa, mez pevnosti R_m 500 - 700 MPa, a tažnost A_{80} vyšší než 15 % (Tabulka 1). Chemické složení oceli je uvedeno v tabulce (Tabulka 2) a povlaku

10% Si a 90% Al. Tloušťka plechu je 1,2 mm, tloušťka povlaku z každé strany je 40 μm .

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 [1]

Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 v dodaném stavu (feriticko-perlitická struktura)		
$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
320 - 550	500 - 700	≥ 10
Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 po tepelném zpracování (martenzitická struktura)		
$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
1100	1500	≥ 6

Tabulka 2: Chemické složení 22MnB5 [1]

Prvek	min	max
C [%]	0,19	0,25
Si [%]	0	0,4
Mn [%]	1,1	1,4
Cr [%]	0,15	0,25
Mo [%]	0	0,35
P [%]	0	0,025
S [%]	0	0,015
Ti [%]	0,02	0,05
Al [%]	0,02	0,06
B [%]	0,0008	0,005

Zařízení použité pro svařování byli středofrekvenční odporový lis PMS 11-4 (1 000 Hz) od firmy Dalex s elektrodovými čepičkami typu 39D 1978-2 z materiálu A2/2-CuCr1Zr, jejichž složení je: Cu= 99,98%, Cr= 0,9% a Zr= 0,12%. Řízení svařovacího procesu probíhá pomocí nastavených parametrů svařovacího času, přítlaku a procentuálního vyjádření svařovacího proudu. Řídící jednotka si pak podle nastavených parametrů během prvních tří (tzv. učicích) svarů sama mírně reguluje

* Kontakt na autora: ondrej.balihar@fs.cvut.cz

proces svařování, přičemž poslední, třetí, učící svar považuje za optimální. Průběh svařování pro každý další svar se snaží nastavovat na právě tento optimální průběh.



Obr. 1: svařovací lis PMS 11-4

Druhým zařízením byly robotické kleště MIDISpot VISION AV (10 000Hz) od firmy Elmatech se stejnými elektrodoými čepičkami typu 39D 1978-2 z materiálu A2/2-CuCr1Zr, jejichž složení je: Cu= 99,98%, Cr= 0,9% a Zr= 0,12%. Řízení svařovacího procesu probíhá pomocí senzorů a SW bez nastavování parametrů. Výhodou použitých 10 tisíc Hz je právě možnost regulace udržení téměř konstantního svařovacího proudu. Proces je řízen neustálým dopočítáváním svařovacího času podle velikosti elektrického náboje.



Obr. 2: robotické kleště MIDISpot VISION AV

3. Experiment

Vzorky z materiálu 22MnB5 s povrchovou úpravou AlSi byly tepelně zpracovány. Ohřáty byly na stejnou teplotu, pouze se lišila doba průchodu průběžnou pecí. Teplota pece byla 920 °C, viz Tabulka 3 a podle doby průchodu se liší zbarvení oxidů na povrchu (Obr. 3).

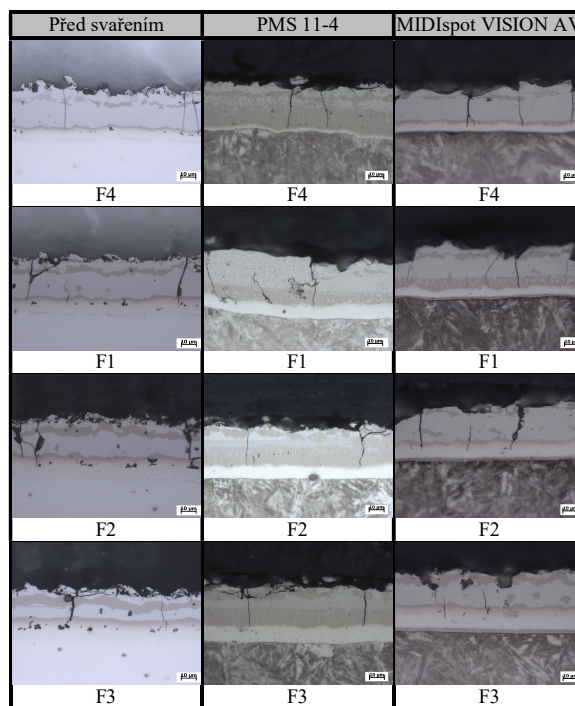
Tabulka 3: Parametry ohřevu před tvářecím procesem

Vzorek	F4	F1	F2	F3
Čas [min]	5	7	11	14



Obr. 3: Změna barvy oxidů na povrchu

Pro každý typ tepelného zpracování byla na obou svařovacích zařízeních odporově svařena sada sedmi bodových svarů, u kterých byla následně hodnocena kvalita spoje pomocí destruktivních a nedestruktivních metod. Vzorky měly rozměry 50 mm x 20 mm a tloušťka 1,2 mm. Na Obr. 4 jsou příčné řezy všemi typy povlaku. Vlevo je neovlivněný povlak před svařováním, uprostřed a vpravo je povlak v místě svaru pro obě svařovací zařízení.

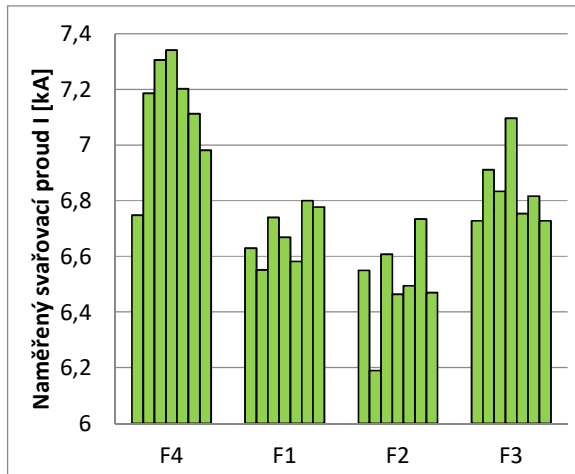


Obr. 4: Povrchová vrstva materiálu

Svařovací parametry byly na středofrekvenčním odporovém lisu PMS 11-4 nastaveny na hodnoty svařovacího času $t = 280$ ms, přítlaku $P = 2,5$ kN a svařovacího proudu 28,5 % (což odpovídá 6,8 kA).

Parametry na robotických kleštích MIDISpot VISION AV si řídicí jednotka nastavuje sama na základě tloušťky a typu svařovaného materiálu. Svařuje pak s konstantním svařovacím proudem (pro vysokopevnostní ocel je to 7,16 kA) a potřebné množství elektrické energie dohání prodlužujícím se časem.

Monitorované parametry na odporovém lisu jsou: svařovací proud [kA] (Graf 1), odchylka svařovacího proudu od optimálního průběhu [%], napětí [V] a elektrický náboj [As]. Na robotických kleštích jsou monitorované parametry: čas přítlaku před svařováním [ms], čas svařování [ms], čas výdrže po svařování [ms], velikost přítlaku [kN] a vnesené teplo [kWs].



Graf 1: Naměřený svařovací proud u středofrekvenčního odporového lisu

Z naměřených hodnot svařovacího proudu je vidět, že vzorky s nejkratší výdrží v peci byly při stejných nastavených parametrech svařeny nejvyšším proudem a to s poměrně velkým rozptylem hodnot. S rostoucí prodlevou v peci průměrný svařovací proud postupně klesá až na poslední sadu vzorků, kde průměrný proud mírně narostl. Bylo to v případě vzorků s prodlevou v peci min, kdy se povlak z větší části transformoval na houževnatou fázi AlFe.

Na všech vzorcích byla změřena velikosti průměru svarových čoček, byla provedena mechanizovaná stříhová zkouška pro zjištění maximální síly potřebné na přestřížení vzorku a metalografická zkouška. Způsob řízení svařovacího procesu byl porovnán z hlediska vneseného tepla. Vnesené teplo bylo u středofrekvenčního odporového lisu vypočítáno podle vzorce:

$$E[kWs] = P[kW] \times t[s] = I[A] \times U[V] \times t[s]$$

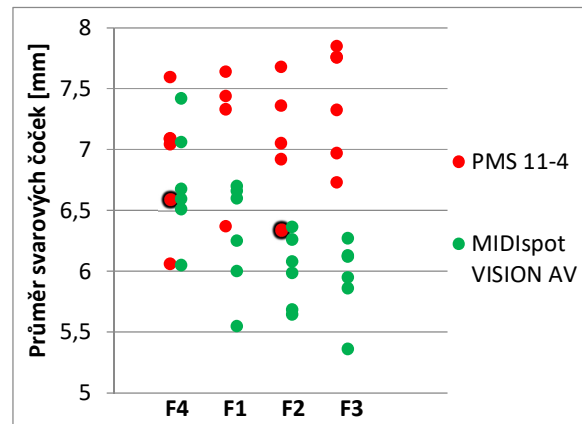
4. Výsledky a jejich Diskuze

Měření průměrů svarových čoček bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 14273. Následně byl vypočten aritmetický průměr z naměřených rozměrů každého bodového svaru, viz Graf 2. Průměr čočky má být minimálně 3,8 mm, dle vzorce:

$$d_{min} = 3,5 \cdot \sqrt{t}$$

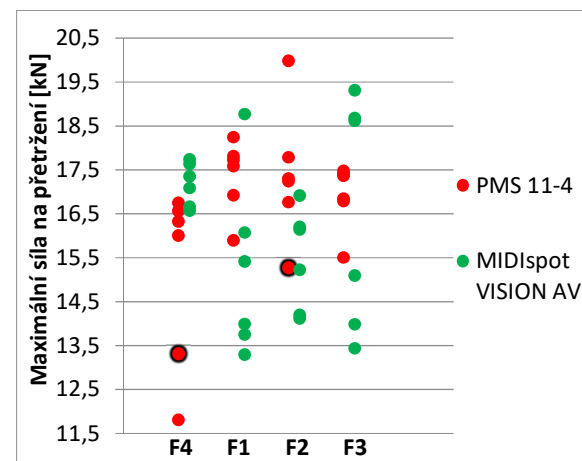
Z měření velikosti svarových čoček je vidět, že v případě nejkratší prodlevy v peci obě svařovací zařízení (oba způsoby řízení svařovacího procesu) jsou schopny dosáhnout stejných průměrů svarových čoček, a to 6 až 7,5 mm. Rozptyl hodnot je v tomto případě také téměř totožný. Průměry svarových čoček spojů vyrobených na svařovacím zdroji s regulací pomocí učičích svarů (PMS 11-4) mírně narůstají s rostoucí prodlevou v peci, přičemž rozptyl hodnot zůstává přibližně stejný. V případě svařování na zařízení s adaptivním řízením (MIDI spot) průměry svarových čoček s rostoucí prodlevou v peci poměrně rychle klesají, a rozptyl hodnot se zmenšuje.

Nicméně podmínka minimálního průměru svaru byla ve všech případech splněna. V grafu 2 jsou černým orámováním vyznačeny vzorky, u kterých došlo při mechanizované stříhové zkoušce k rozdělení ve středové rovině (tedy ose svaru).



Graf 2.: Průměry svarových čoček

Mechanizovaná stříhová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení LabTest 5.100SP1. Z každé série sedmi vzorků bylo vždy 6 roztrženo a následně zjištěna maximální střížná síla. Výsledky jsou uvedeny v grafu 3. Dle podnikové normy VW 01105-1 měla být střížná síla minimálně 3,75 kN, aby mohl spoj být vyhodnocen jako vyhovující. Z grafu je vidět, že všechny svary u obou způsobů svařování vyhovují podmínce minimální střížné síly. F_{min} v průměru překročena čtyřnásobně.

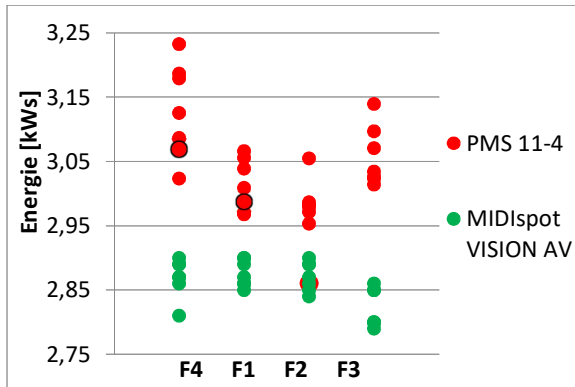


Graf 3.: Rozptyl pevnosti svarových spojů

Z grafu 3 je patrné, že průměrné hodnoty maximálních sil potřebných na přestřížení vzorku u obou typů svařovacích zařízení s výraznou rezervou splňují podmínku minimální síly a s prodlužující se prodlevou v peci mírně narůstají. Rozptyl hodnot byl v případě zařízení s adaptivním řízením (MIDI spot) viditelně větší.

Velikost vneseného tepla je zobrazena na Grafu 4. Při svařování robotickými kleštěmi MIDIsport VISION AV množství vneseného tepla, potřebného k tvorbě svaru u všech vzorků o něco málo menší než v případě PMS 11-4. Z grafu je vidět vliv způsobu řízení svařovacího procesu.

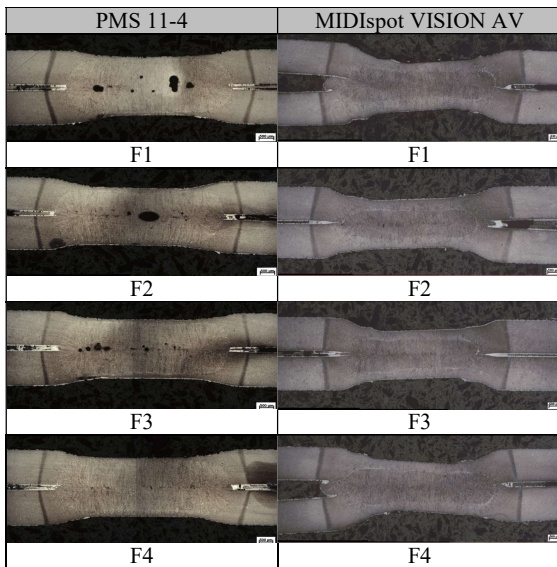
Adaptivní způsob řízení umožňuje vnášet do svarů stabilní množství energie, přičemž pokles energie u poslední sady vzorků (nejdelší prodleva v peci) je pravděpodobně daný vlivem transformace většiny povlaku na fázi AlFe. Naproti tomu na řízení procesu na bázi tzv. učících svarů se projevuje vliv poměru fází v povlaku poměrně výrazně. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší vnesenou energií a je 300 Ws.



Graf 4.: Množství vneseného tepla

Metalografická zkouška byla provedena na 1 svaru z každé sady vzorků Tabulka 4.

Tabulka 4.: Výsledky metalografické zkoušky



Výsledky ukazují, že kvalitnější (bez vnitřních vad) spoje vznikají za použití zařízení s adaptivním řízením MIDIsport VISION AV. Na druhou stranu všechny tyto svary vykazují větší hloubku vtisku elektrod. Dle normy ČSN EN ISO 14373 musí být hloubka vtisku elektrody maximálně 20 % tloušťky svařovaného plechu, což v našem případě je 240 μm . Tato podmínka v případě spojů svařených s adaptivním řízením procesu splněna nebyla ani v jenom případě, viz Tabulka 5. To může být způsobeno použitím 100% svařovacího proudu, což je parametr, kterým se na zdroji s adaptivním řízením reguluje velikost svarové čochky.

	F4	F1	F2	F3
PMS 11-4	220 μm	239 μm	255 μm	236 μm
MIDIsport VISION AV	330 μm	365 μm	362 μm	370 μm

Tabulka 4: Hloubka vtisku

4. Závěr

Svarové spoje z hlediska pevnosti a velikosti svarové čochky jsou ve všech případech vyhovující. Adaptivní řízení procesu se projevuje na stabilitě vneseného tepla, ale za cenu klesajícího průměru čochky vlivem nárůstu fáze AlFe v povlaku s prodlužujícím se časem v peci. Klasické nastavování svařovacích parametrů vede k tomu, že svařovací proud značně kolísá. Rozdíl mezi nejvyšším svařovacím proudem a nejnižším byl více než 1 kA. V praxi znamená značnou nestabilitu procesu u jediného materiálu, vlivem rozdílného fázového složení povlaku, přestože velikost svarové čochky je přibližně stejná. To se nakonec projeví na větším rozptýlení hodnot maximální síly potřebné na přestřížení vzorku, u procesu s adaptivním řízením, u kterého průměr čochky klesá, se zvyšujícím se podílem fáze AlFe

Poděkování

Děkuji firmě Elmatech a panu Voborovi za zapůjčení svařovacího zařízení s adaptabilním řízením.

Seznam symbolů

- E vnesené teplo [kWs]
- P elektrický výkon [kW]
- t čas [s]
- I proud [A]
- U napětí [V]
- d_{min} průměr svarové čochky [mm]
- t tloušťka materiálu [mm]

Literatura

- [1] KOLAŘÍKOVÁ, Marie. *Svařování vysokopevných manganborových ocelí elektrickým odporem a vliv povrchových úprav na jejich svařitelnost*. Praha, 2019. Habilitační práce. České Vysoké Učení Technické v Praze.
- [2] FOREJTOVÁ, Lucie, Ladislav KOLAŘÍK, Jan SUCHÁNEK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Tomáš PILVOUSEK. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, s. r. o., 2017, (3), - [cit. 2019-01-28]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>
- [3] ŠIMON, Petr. *Karoserie osobního automobilu: Interní dokument*. Praha, 2015