

OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor práce: Ing. Jaroslav Petr-Soini

Téma práce: Vliv metalurgických faktorů na kvalitu svarového spoje u vysokopevných ocelových plechů s povlakem na bázi Al-Si.

Posudek disertační práce byl zpracován na základě písemné žádosti proděkana pro vědeckou a výzkumnou činnost Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze pana prof. Ing. Tomáše Jirouta, Ph.D., č.j. 613/12921/O/2022.

Předložená disertační práce je zpracována v rozsahu 98 stran textu, obsahuje 101 obrázků a 14 tabulek. Autor se odkazuje na 34 literárních pramenů. Z toho připadá na práce s podílem autora 5 pramenů, které vznikly v období let 2016 až 2021. Dále doktorand uvádí 6 publikací, u kterých je spoluautorem. Po formální stránce je disertační práce členěná do 16 částí, neobsahuje ale obvyklou část o použitých symbolech a zkratkách. Samostatně není uvedena část o teoretickém a praktickém přínosu disertační práce. Problematická je grafická úroveň některých obrázků (např. Obr. 15 a Obr. 16) a v textu se objevují i drobné chyby.

Odporové bodové svařování v automobilovém průmyslu má dlouhou historii a dosud nenahraditelnou pozici. Na karosérii osobních automobilů je obvykle několik tisíc bodových svarů (cca 4000 až 6000) a jejich kvalita je při svařování karoserií osobních automobilů dlouhodobě ve středu zájmu. Vzhledem k stále rostoucím požadavkům na bezpečnost posádky a snižování hmotnosti vozu jsou postupně do výroby zaváděny oceli s vyššími pevnostními hodnotami. S aplikací nových konstrukčních materiálů, jako jsou např. ocelové plechy vysoké pevnosti, však vznikají i specifické problémy. Ocel 22MnB5 s povlakem na bázi slitiny Al-Si je konstrukční materiál, na který je pozornost zaměřena již delší dobu. Problematika, na kterou se autor zaměřil, je ale stále aktuální. Další získané poznatky o možnosti stanovení rozdílnosti v charakteru a struktuře ochranného povlaku typu Al-Si jsou přínosem. Výsledky své práce prezentoval autor především ve spolupráci s jinými autory, na vědeckých konferencích, seminářích a v renomovaných časopisech.

Rozboru současného stavu řešené problematiky jsou věnovány kapitoly 1 až 7. Velmi stručný úvod naznačuje, čím se disertační práce bude zabývat. Kapitola 2. zaměřená na používané oceli v automobilovém průmyslu je také velmi stručná a nelze očekávat, že poskytne detailnější informace o vlastnostech jednotlivých skupin ocelí uvedených v Obr. 1.

Stěžejní poznatky o problematice zpracování a charakteristice vlastností vysokopevnostních martenzitických ocelí autor disertace uvádí v kapitolách 3. až 6. Nejprve v kapitole 3. a 4. popisuje vysokopevné martenzitické oceli a jejich zpracování a v kapitole 4. chemické složení oceli 22MnB5. Při popisu vlivu jednotlivých prvků na vlastnosti ocelí mohl být autor méně stručný a použít vhodnější literární zdroje. V kapitole 5. je podrobněji popisována problematika ochranného povlaku plechu na bázi slitiny Al-Si, a to z hlediska výroby i dějů spojených při ohřevu během tepelného zpracování a dále i při svařování. K této problematice existuje poměrně hodně podkladů. Vybrané podklady umožnily doktorandovi provést ucelený popis těchto dějů na úrovni současných teoretických znalostí. Některé podklady, které jsou

zaměřené na obdobnou problematiku však doktorand opomenul (např. habilitační práci paní doc. Ing. M. Kolaříkové, Ph.D., IWE). Vzhledem k zaměření práce měl doktorand blíže charakterizovat také pojem „svařitelnost“ u odporového bodového svařování plechů s různými typy povlaků.

Kapitola 7. věnovaná problematice kontroly svarových spojů je zpracována ve velmi omezeném rozsahu. Přehled metod destruktivního a nedestruktivního hodnocení kvality svarů uvádí norma ČSN EN ISO 15614-12. Tato norma stanovuje zkoušky, které mohou být použity ke kvalifikaci specifikací postupů svařování pro odporové bodové, švové a výstupkové metody svařování. V této kapitole bych předpokládal také popis geometrických měření a typů lomů, které jsou používány v souvislosti se zkoušením odporových bodových, švových a výstupkových svarů podle ČSN EN ISO 14329. Ve stati 7.1 popisované tzv. zkoušky odlupem jsou zkoušky odlupovací. Tyto zkoušky jsou předmětem normy ČSN EN ISO 10447.

V závěru studijní části práce mohl doktorand provést závěrečné shrnutí dosud publikovaných poznatků k řešené problematice a na základě toho formulovat i cíle své disertace. Cíle disertace autor uvádí v kapitole 9. Bez bližšího vysvětlení jako jeden z cílů disertace uvádí vytvoření 2D simulace odporového svařování dílů z oceli 22MnB5, přitom ve studijní části o simulaci procesu bodového odporového svařování autor žádné poznatky neuvádí. To celkově snižuje úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky. Domnívám se, že rozsah cílů stanovených v disertační práci byl příliš ambiciózní. Samo řešení simulačních výpočtů bodového svařovacího procesu ocelových plechů s povlakem se stanovením všech potřebných výpočtových parametrů by bylo vhodným tématem na samostatnou disertační práci. Jako přiměřený rozsah práce bych pokládal analýzu změn struktury povlaku v závislosti na výrobních a zpracovatelských podmínkách včetně vypracování a ověření metodiky nedestruktivního stanovení parametrů povlaku v souvislosti s metalurgickou svařitelností při bodovém odporovém svařování.

Kapitola 10. se zabývá metodikou a použitými materiály. Při studiu vlivu změn povlaku v závislosti na změně parametrů tepelného zpracování doktorand využil jednak vzorky připravené v průběžné plynové peci u výrobce dílů a vzorky vyrobené v blíže nespecifikované komorové peci. Podle autora byla zastupitelnost obou způsobů přípravy vzorků ověřována, výsledky ověřovacích experimentů ale neuvádí.

V kapitole 10. potom autor disertace uvádí návrh metodik na ověřování změn povlaku na základě elektrické vodivosti a vířivými proudy včetně technických prostředků. Rovněž jsou uvedeny i metodické postupy přípravy vzorků s homogenizovaným povlakem pomocí laseru. Metodické postupy pro analýzu změn ve struktuře povlaku v závislosti na podmínkách zpracování lze pokládat za přínosné a odpovídající jsou i použité technické prostředky.

Ve stati 10.2 se zaměřil na posouzení vlivu změn povlaku na svařitelnost. Na Obr. 29 je podle autora vzorek pro statickou zkoušku tahem. V souladu s ČSN EN ISO 14273 (v seznamu literatury pod číslem 30) se ale jedná o zkoušku ve stříhu. Podle mého názoru by obdobně měla být posuzována i dynamická zkouška vyznačená na Obr. 28. Popis realizace zkušebních vzorků je nedostatečný, jsou uvedeny pouze základní svařovací parametry a typ použitého svařovacího stroje.

Kapitola 11. uvádí výsledky práce. Nejprve jsou prezentovány výsledky změn struktury povlaku v závislosti na parametrech tepelného zpracování. Z uvedených výsledků není zřejmé jak bylo postupováno při měření parametrů tloušťky povlaku (četnost měření) a výběru míst pro prvkovou analýzu. Nicméně prezentované výsledky jsou zajímavé.

Ve stati 11.2 má být posouzen vliv strukturních změn povlaku na svařitelnost plechu. Není zde bohužel proveden úplný popis postupu svařování zkušebních vzorků. O počtu svařených vzorků pro vyhodnocení velikosti svarové čočky a pro určení maximální síly při dynamických zkouškách tahem, resp. stříhem, lze soudit pouze podle uvedených grafů a tabulek. Není jasné zda pro jednotlivé série vzorků byly použity vždy nové elektrody, zda byl prováděn tzv. záběh elektrod, nebo úpravy pracovních ploch elektrod. Vady svarů na Obr. 63 až Obr. 66 jsou označovány jako ostřík, správně se v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-2 jedná o vady typu P 612 tzv. výstřiky. Na Obr. 66 se jedná zřejmě o sérii svarů na plechu s dobou výdrže na austenitizační teplotě 840 s, ne 660 s jak je uvedeno.

Podle prezentovaných výsledků experimentů s homogenizací povlaku pomocí laseru se u vzorku po přetavení středním výkonem laseru podle Obr. 72 vyskytuje souvislá elektricky nevodivá vrstva oxidů na povrchu povlaku. U kompletně přetaveného povlaku podle Obr. 75 s natavením základního materiálu takové problémy nevznikly?

Stát 11.3.1 uvádí výsledky při vývoji vhodné metody vstupní kontroly materiálu a vypracování metodiky posuzování bodové odporové svařitelnosti. Z výsledků je zřejmé, že měřením elektrické vodivosti se nedařilo prokázat změny v charakteru struktury povlaku po různém způsobu zpracování. Jako nadějná se naopak prokázala metoda využívající vířivé proudy, tak jak uvádí stát 11.3.2.

Stát 11.4 v omezené míře uvádí výsledky 2D simulace bodového odporového svařování. Není jasné proč se prováděla simulace svařovacího procesu až do času 2,0 s. Spíše by bylo vhodné stanovit čas, kdy rozměr svarové čočky dosáhne vhodné velikosti (např. 5-Vs, kde s je tloušťka plechu) a tuto skutečnost porovnat s realitou. Na Obr. 96 a Obr. 97 jsou výsledky určení průměru natavené oblasti v závislosti na čase. Pokud se jedná o simulaci vývoje svaru pro tloušťku plechu 1,2 mm, nebylo by pro zadané parametry dosaženo potřebné velikosti svaru. Na Obr. 100 a Obr. 101 jsou grafy časové závislosti kritéria rozstříku, není ale nikde uvedeno, jak je toto kritérium definováno.

Kapitola 12. je věnována diskusi k dosaženým výsledkům. Uvedená tvrzení vycházejí z předchozích uvedených poznatků a se závěry doktoranda souhlasím.

V kapitole 13. Závěr, konstatuje autor splnění vytýčených cílů práce. S tímto konstatováním autora lze souhlasit s určitými výhradami. Vzhledem k současnému přístupu k hodnocení odporové bodové svařitelnosti nelze hodnotit svařitelnost pouze z pohledu výsledků jedné z nedestruktivních zkoušek. Z hlediska aplikace hodnocených svařovaných dílů v automobilovém průmyslu jsou ale tyto výsledky zajímavé a zasluhují pozornost. V závěru je také hodnocení svařitelnosti dáno do souvislosti s vývojem náhradního průměru svarové čočky. V práci ale takový pojem není definován.

Hlavním teoretickým přínosem práce je podle mého názoru především potvrzení možnosti stanovení jakosti povlaku použitím metody vířivých proudů. Na druhé straně je nutno

konstatovat, že před použitím této metody je nutno realizovat, jak autor uvádí na str. 83 v části 11.3.2, metalografický rozbor pro stanovení tloušťky povlaku.

Za základní praktický přínos práce je možno považovat patentování metodiky vstupní kontroly plechů s povlakem (zejména na bázi Al-Si) na bázi metody vířivých proudů. Škoda, že v rámci hodnocení svařitelnosti nebyly stanoveny diagramy oblasti svařování (v souladu s ČSN EN ISO 14327) pro různé stavy povlaku plechů v závislosti na jejich přípravě.

Za základní nedostatky práce pokládám níže uvedené postupy. Předpokládám, že k těmto bodům se doktorand zaujme stanovisko během své obhajoby.

1. Nejsou uvedeny svařovací parametry a podmínky realizace odporových svarových spojů hodnocených u vzorků s různými podmínkami austenitizace. Při konstantním nastavením svařovacích parametrů dochází k opotřebením elektrod, které je nutno brát do úvahy.
2. Nejsou uvedeny podmínky, za jakých se provádí ohřev v reálných podmínkách zpracování polotovarů plechů ve srovnání s podmínkami při přípravě experimentálních vzorků. Není uvedeno, jak byla kontrolována teplota v peci při austenitizaci vzorků a jak je stanoven čas výdrže na teplotě.
3. Není specifikován vliv stavu povlaku po různém způsobu austenitizace plechu na svařitelnost. Uvedené poznatky a závěry pokládám za neuspokojivé. Postupy pro posouzení obecné svařitelnosti u odporového svařování nepovlakovaných a povlakovaných materiálů stanovuje norma ČSN EN ISO 18278-1, která je určena i pro porovnání metalurgické svařitelnosti různých materiálů. Přitom se jako základní parametr hodnocení pokládá rozsah svařovacího proudu (*welding current range WCR*). Je to oblast svařovacího proudu, která dovoluje zhotovení bodových svarů bez rozstříku a o průměru rovném nebo větším, než je předem stanovená hodnota při konstantním nastavení stroje. Důležitá jsou ale i další kritéria hodnocení svařitelnosti např. opotřebením a životností elektrody (kvalifikují schopnost průběžného vytváření svarů). Specifické zkušební postupy pro stanovení přípustného rozsahu svařovacího proudu a životnosti elektrody poskytuje norma ČSN EN ISO 18278-2. Tato norma uvádí postupy pro vyhodnocení svařitelnosti odporového bodového svařování stanovením rozsahu svařovacího proudu a životnosti elektrody.

Celkově lze konstatovat, že doktorand Ing. Jaroslav Petr-SOINI prokázal potřebné znalosti, schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu a vývoje v oboru materiálového inženýrství. Disertační práce obsahuje původní a uveřejněné výsledky, které jsou přínosem pro rozvoj vědního oboru i praktickou aplikaci. **Předložená disertační práce tak splňuje požadavky ve smyslu § 47 zákona č. 111/1998 Sb. a přes řadu připomínek ji doporučuji k obhajobě v oboru „Materiálové inženýrství“. Po úspěšném obhájení práce mu doporučuji udělit akademický titul Ph.D.**

V Liberci dne 16. 5. 2022

doc. Ing. Heinz Neumann, CSc., EWE