

Oponentský posudek dizertační práce

„Vliv metalurgických faktorů na kvalitu svarového spoje u vysokopevných ocelových plechů s povlakem na bázi Al-Si“

Autor práce: Ing. Jaroslav Petr-Soini
Školitel: doc. Ing. Jiří Janovec, CSc.
Školící pracoviště: Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní, ČVUT Praha
Studijní program: Strojní inženýrství; Studijní obor: Materiálové inženýrství
Oponent: prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.
Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera

Práce je věnována svařitelnosti konkrétní martenzitické oceli v kombinaci s povrchovou úpravou, která vnáší do obvyklých problémů svařitelnosti vysokopevných ocelí velice složitou kombinaci metalurgických procesů i výrobních omezení. Dosažení stability procesu svařování systematickou nedestruktivní kontrolou stavu povlaku, což je hlavním zaměřením a ambicí předloženého výzkumu, je nesmírně složitý problém; znamená analýzu a vymezení všech materiálově-technologických vstupů a vypořádání se s řadou nejistot. Na druhé straně použití i další perspektivy ve vývoji tohoto typu materiálu jsou de facto podmíněné právě výzkumem tohoto typu.

1. Postup řešení, použité metody

Úvodní kapitoly teoretické části jsou věnované typickému sortimentu ocelí pro automotive, se zaměřením na vysokopevné martenzitické oceli, podmínky jejich zpracování apod.

Tato část práce podává detailně a přitom čitelně výběr aktuálních informací o procesech, působících během tvorby Al-Si vrstvy, s důrazem na vliv jednotlivých technologických operací a požadavky korozivzdornosti, plasticity, svařitelnosti. V souladu se zaměřením práce obsahuje komentovaný přehled o doposud testovaných možnostech řešení problémů s Al-Si povlaky, resp. možnostech náhrady tohoto typu povlaku. V následujících kapitolách, věnovaných kontrole bodových svarů, se zaměřuje na metodu vířivých proudů na pozadí běžných metod.

Pod titulkem „Hypotéza“ vysvětluje řešený problém a následně definuje cíle práce; cíle práce zároveň velice dobře vymezují etapy práce: analýzy vlivů na svařitelnost a na jejich základě návrh metody nedestruktivní kontroly stavu povrchů a finálně tvorbu 2D simulace svařování jako podkladu pro crashové simulace. Vstupní kontrola za tepla tvářených dílů - posouzení vhodnosti ke svařování má zabezpečit vyřazení nevhodně zpracovaných dílů z výrobního procesu.

Metodika práce má jasně definovanou časovou i věcnou souslednost. Vychází z vlastních analýz změn vnitřní stavby povlaku pod vlivem tepelného zpracování - v testovaných parametrech teploty a doby austenitizace. Použité analytické metody (metalografie, chemické mikroanalýzy, rtg. difrakce, statické a dynamické zkoušky, ...) plně odpovídají kombinovaným požadavkům pro řešení problému.

Evidentní je seriózní přístup k řešení i posuzování vlastních výsledků, kupř. v ověření zastupitelnosti způsobu ohřevu (plynová pec vs. komorová pec) při experimentálním hledání vlivu tepelného zpracování. Otázkou je, proč jedna z testovaných celkem tří variant teplot austenitizace byla teplota, odpovídající teplotě A_{c3} dané oceli; zbývající varianty jsou minimální hodnota z průmyslově využívaných teplot (885°C) a nejběžněji využívaná teplota (920°C). Očekávala bych spíše zkoušky nechtěného přesahu teplot apod. Znamená tato hladina ohřevu možnost sledování odlišnosti procesu při neúplné austenitizaci, popř. jiný cíl výzkumu?

Experimentální analýzy jsou popsány jednoznačně, se všemi potřebnými detaily, což vidím u řešeného problému jako velice užitečné především proto, že tak autor otevírá a ukazuje možnost příp. navazující práce. Otázkou je kupř. účel krystalografické analýzy (str. 58, obr.53); obrázek je zařazen rovněž do tezí jako jeden z klíčových výsledků (?).

Velice zajímavá je testovaná varianta potlačení negativního vlivu difúzní mezivrstvy na svařitelnost - homogenizaci povlaku laserem, opět v několika variantách tg. parametrů.

2. Výsledky a přínos disertační práce

Cíle práce si vyžádaly kvantum různorodé výzkumné práce a také interpretaci výsledků s racionálním zohledněním použitelnosti v podmínkách výroby a kontroly dílů.

Jedním z klíčových výsledků je návrh a ověření nedestruktivní kontroly stavu povrchové vrstvy pro svařitelnost. Vývoj metodiky NDT testování svařitelnosti experimentálně připravených variantních stavů povlaků vycházel metodicky z měření vodivosti povlaků a ověření měřitelnosti změny impedance pomocí vířivých proudů.

Po ověření možností, resp. zjištění omezení indikace limitních hodnot difúzní mezivrstvy měřením vodivosti, byla „dotažena“ varianta měření vířivými proudy až ke kompletnímu vypracování metodiky vč. patentu.

Chci vyzvednout, že se autor ani při takto širokém záběru nedopouští zjednodušení. V celé realitě problému diskutuje vliv nepřesnosti pozice dílů, deformace plechů při spojování, obtížné překonání deformace přitlakem s ohledem na vysokou pevnost oceli, způsobující rozstřík svarového kovu atd. Zmiňuje i obecnější „pasti“ směrem k aplikaci - rozdíly experimentálního provedení vs. možnosti robotů s adaptivním řízením, které mají své limity při kompenzaci vstupů proměřením odporu v místě svarového bodu.

Tvorba 2D simulace svařování si vyžádala data pro zohlednění vlastností Al-Si vrstvy, tyto byly získány z měření vodivosti a ultrazvuku s vícekanálovou sondou. Uvedeno je „homogenní zasítování“, tzn. rozdíly stavu Al-Si vrstvy jsou zohledněny v parametrech vodivosti a přechodového odporu. Simulace umožnila sledování vývoje a šíření teploty v čase, i při tak krátkých časových intervalech u bodových svarů. Zajímavé je srovnání výsledků simulace s povrchem Zn ve stejných časových intervalech. Podle barevného škálování teplota dosahuje až 2 tis. °C (?). Autor na základě výsledků těchto simulací diskutuje možnost sledování vývoje průměru natavené oblasti, jako parametru ovlivňujícího rozstřík a tím i pevnost spojů.

Zajímavé jsou pokusy a výsledky laserové homogenizace vrstvy. Autor konstatuje, že další pokusy byly zastaveny z důvodů ekonomické nerentability ve výrobě. Vzhledem k tomu, jak daleko dospěly experimenty – zjištěny byly rozhodující parametry i jejich limity, vyvstává otázka zda metoda nemá jiné uplatnění / aplikaci.

V závěrečné diskuzi autor komentuje jednotlivá zjištění se zřejmou znalostí celé problematiky nejenom po teoretické stránce, ale věcně posuzuje dosažené výsledky z hlediska následků na pevnost svarů a tím pasivní bezpečnost dílů apod. a možnosti je promítnout do výrobního procesu. To dává celé práci vyšší zhodnocení výsledků. Autor se musel vypořádat s nekončící řadou obtíží, což je evidentní i v samotné diskuzi, kde se uvádí, že výzkum stále probíhá.

Důležitým výstupem směrem k praktické aplikaci je patentovaná metodika NDT. Důležité je, že metoda není ovlivněna výrobním procesem (tj. ani dodavatelem dílů).

3. Formální úroveň práce

Práce má logické členění; výborná vypovídající úroveň je daná provázáním výsledků a návazností experimentů. Grafická úroveň zpracování je velice dobrá. Některé formální chyby jako překlepy, chyby formátování („rozpadající se“ tabulky) apod. nejsou v takovém rozsahu, aby narušily přehlednost nebo úroveň celé práce.

4. Dotazy a připomínky k práci

Kromě několika výše uvedených poznámek mám k obhajobě práce následující dotazy a náměty do diskuse:

1. V souvislosti s vývojem objemu natavené oblasti autor zmiňuje další dva parametry – svařovací sílu a sílu přenášenou přes natavenou oblast, na základě kterých bylo dopočteno kritérium pro vznik rozstříku pro danou ocel s povlakem Al-Si vs. Zn. Zde by bylo vhodné bližší vysvětlení, specifikace veličin (závislosti na obr. 100, 101). Prezentované závislosti ukazují, že k neakceptovatelnému rozstříku dochází již v prvních okamžicích (?). Přinesly takto vymezené intervaly omezení doby svařování, odpovídá to parametrům/omezením v praxi? Výstup je velice užitečný s ohledem na negativa tohoto efektu.
2. Nastavené kritérium pro detekci nežádoucího stavu povrchové vrstvy bylo 16 um (19 um je uvedeno jako hraniční); tyto hodnoty jsou normativní nebo vycházejí z vlastních analýz?
3. Pole akceptovatelné odezvy při měření vířivých proudů bylo nastaveno měřením vzorků bez plastické deformace. Myslí se tím měření v rovinnějších částech výlisků? Uvedené omezení souvisí výlučně s popraskáním povlaku a tím nižší detektabilitou? Nebo se jedná o vliv deformace ve smyslu změny odporu a impedance materiálu s plastickým přetvořením?
4. Součástí metodiky je nutná kalibrace měření (frekvence, zesílení signálu) a to metalograficky měřením tloušťky difúzní vrstvy; je tím myšleno pro každý typ výlisků? Důvodem je stav deformace materiálu, celkové rozdíly vnitřní stavby Al-Si vrstvy, tloušťka plechu popř. jiný parametr?

5. Závěr

Závěrem možno konstatovat, že cíle práce byly kompletně splněny. Práce přináší konkrétní a původní výsledky, které mají nesporné praktické uplatnění a jsou příspěvkem k poznání v dané oblasti.

Na základě výše uvedeného doporučuji práci k obhajobě a v případě úspěšné obhajoby doporučuji udělit **Ing. Jaroslavu Petr-Sojimu** titul Ph.D. v daném studijním oboru.

V Pardubicích, 16.5. 2022