



OPONENTSKÝ POSUDEK DOKTORSKÉ DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor práce: **Ing. Samer Al Khaddour**

Název práce: **Lomové chování ocelí a jejich svarů pro energetiku**
Fracture behavior of steels and their welds for power industry

Doktorská disertační práce autora Ing. Samera Al Khaddoura je orientována na verifikaci aplikovatelnosti modelu univerzální křivky lomové houževnatosti (angl. Master Curve Concept) pro případ heterogenních svarů ocelí užívaných v energetickém průmyslu. Značná část práce je věnována metodice určování tzv. referenční teploty T_0 , kdy na správnosti odhadu hodnoty této veličiny závisí určení všech dalších parametrů, souvisejících s univerzální křivkou lomové houževnatosti. Autor se kromě experimentálního určování referenční teploty věnuje využití neuronových sítí pro predikci T_0 . Disertační práce je zaměřena na vývoj kvantitativních modelů s cílem predikovat referenční teplotu s využitím výsledků zkoušek tahem a měření tvrdosti.

Práce je rozdělena do sedmi kapitol. První tři kapitoly jsou věnovány úvodu do problematiky, teoretickým poznatkům, ze kterých práce vychází a formulaci cílů disertační práce. Obsahem dalších dvou kapitol je popis experimentálního materiálu a použitých experimentálních procedur, dále potom souhrn výsledků experimentů včetně jejich využití při tvorbě modelů pro určení referenční teploty lomové houževnatosti pomocí neuronových sítí. Práci uzavírají kapitoly věnované diskusi získaných výsledků a závěrům, které lze na jejich základě učinit.

Poměrně rozsáhlou částí práce je druhá kapitola, ve které se autor věnuje popisu a rozboru teoretických poznatků, na nichž jsou založeny experimentální i výpočtové partie disertační práce. Autor se postupně dostává od základních poznatků lineárně-elastické a elasto-plastické lomové mechaniky přes problematiku štěpných lomů a tranzitního chování nízkolegovaných ocelí až k popisu tzv. univerzální křivky lomové houževnatosti (master curve). Teoretický úvod uzavírají partie věnované základním poznatkům o neuronových sítích a jejich využití v oblasti materiálových věd.

Ve třetí kapitole jsou definovány cíle práce, mezi které patří (i) verifikace aplikovatelnosti modelu univerzální křivky lomové houževnatosti pro svařované materiály, speciálně pro případ heterogenních svarů, (ii) experimentální určení referenčních teplot vyšetřovaných materiálů a (iii) vývoj modelů pro predikci referenční teploty, založených na umělých neuronových sítích.

Následující dvě kapitoly jsou věnovány zevrubnému popisu postupů uplatněných v experimentálním programu a seznámení se získanými výsledky. Zkušební tělesa byla vyrobena z polotovarů, obsahujících heterogenní svar feritické a austenitické oceli. Kromě základního (dodaného) stavu materiálu polotovarů byly pro výrobu zkušebních těles použity i polotovary po různém stupni tepelného stárnutí. Zkušební tělesa byla odebírána jednak z oblasti s čistě feritickou strukturou, jednak z míst v blízkosti svaru. Pro plochá tahová zkušební tělesa je situace znázorněna v obr. 29, podle mého názoru by bylo vhodné uvést podobné schema i pro ostatní typy těles, zejména pokud se týká jejich orientace vzhledem k polotovaru a poloze svaru. Kapitola obsahuje výsledky chemického a strukturního rozboru ocelí a výsledky měření tvrdosti v různých oblastech svarového spoje. Obsaženy jsou výsledky mechanických a lomově-mechanických zkoušek, zejména zkoušek tahem na hladkých a vrubovaných zkušebních tělesech a měření lomové houževnatosti prostřednictvím standardních zkušebních těles pro excentrický tah (CT) a tříbodový ohyb (SENB). Primárním cílem bylo experimentálně určit referenční teploty T_0 všech stavů použitého experimentálního materiálu. Kapitola rovněž obsahuje výsledky numerických simulací metodou neuronových sítí, a to pro čtyři varianty modelů, lišících se počtem a typem vstupních proměnných. Výsledky jsou prezentovány ve formě závislostí referenčních teplot určených experimentálně a pomocí numerických simulací po zpracování lineární regresní analýzou.

Šestá a sedmá kapitola jsou věnovány diskuzi získaných výsledků a závěrům. Autor konstatuje, že pro vyšetřovanou ocel C20 ve všech úrovních tepelného zpracování je možné aplikovat koncepci univerzální křivky. Dokládá to skutečností, že hodnoty lomové houževnatosti této oceli leží uvnitř rozptylového pásu pro 90% pravděpodobnost porušení. V případě hodnot lomové houževnatosti oceli odebrané v blízkosti zóny natavení vykazují výsledky větší rozptyl, mimo předepsaný rozptylový pás leží větší počet hodnot lomové houževnatosti než odpovídá definici. Autor dochází k závěru, že v těchto případech byl lom iniciován jiným mechanismem než mechanismem, na základě kterého je odvozena koncepce univerzální křivky lomové houževnatosti. Dokládá to fraktografickým rozbohem lomových ploch, na nichž lze v některých případech zřetelně rozlišit osamocená místa iniciace štěpného lomu (mikromechanismus nukleace štěpné trhliny vyhovující tzv. teorii nejslabšího článku), jindy jsou takováto místa rozlišitelná velmi obtížně, resp. prakticky vůbec a mikromechanismus nukleace lze spojovat s teorií kumulace poškození. Podle autora je však možné univerzální křivku aplikovat a použít k predikci hodnot lomové houževnatosti i v tomto případě, tj. pro hodnocení heterogenních svarů. Tento názor opírá o výsledek zpracování experimentálních dat, do kterého nebyla zahrnuta data ze zkušebních těles, vykazujících iniciaci nestabilního lomu mechanismem kumulace poškození. Myslím si, že tento přístup není nejšťastnější a finální rozhodnutí o aplikovatelnosti univerzální křivky lomové houževnatosti by v těchto případech vyžadovalo hlubší analýzu.

Diskutovány jsou rovněž výsledky predikce referenční teploty založené na modelování pomocí neuronových sítí. Autor na základě statistické analýzy výsledků získaných prostřednictvím čtyř modelů považuje za nejvhodnější pro predikci T_0 model kombinující na vstupu údaje z tahových zkoušek za pokojové teploty, tvrdost a teplotu T_{GY} , tj. teplotu, odpovídající okamžiku zplasti-

zování průřezu zkušební tělesa pod vrubem („*general yield*“) v případě použití vrubovaných zkušebních těles pro zkoušku tahem. Vzhledem k nedostatku experimentálních údajů ze zkoušek tahem vrubovaných těles se podle autora pro predikci referenční teploty jeví být vhodným také model, kdy na vstupu jsou použity kombinace hodnot tvrdosti a parametrů plynoucích ze standardních zkoušek tahem za pokojové teploty. Z výsledků je nicméně patrné, že nejlepší predikce byla získána z modelů, obsahujících na vstupu některý z parametrů, související s vrubovanými zkušebními tělesy (teplota T_{GY} , lomové napětí R_u nebo kontrakce Z^*). Z prezentovaných výsledků v Tabulce 17 je patrná poměrně dobrá shoda mezi experimentálně a numericky určenými hodnotami referenčních teplot (ovšem až po její opravě, protože autor zřejmě opomněl uvést znaménko minus u některých hodnot).

Cíle disertační práce byly v zásadě splněny. Podle mého názoru by zpřesnění výsledků prospěl poněkud širěji pojatý experimentální program, zejména v souvislosti s experimentálním určováním parametrů univerzální křivky lomové houževnatosti. Práci by rovněž prospělo důkladnější matematické (statistické) zpracování výsledků experimentů. Problematika určování lomově-mechanických parametrů ocelí, případně heterogenních svarů z výsledků mechanických zkoušek jiného typu je bezesporu aktuální a z vědeckého pohledu velmi zajímavá. Výsledky, kterých bylo dosaženo ukazují, že pro hodnocení tranzitního a lomového chování ocelí spadajících do kategorie ocelí s primárně feritickou maticí je možné využít přístupů, založených na aplikovatelnosti univerzální křivky lomové houževnatosti, přičemž pro určení parametrů uvedené křivky lze použít výsledky z tahových zkoušek, zpracované umělou neuronovou sítí. Tato metoda ale určitě naráží i na některá omezení, jejichž hlubší rozbor bych očekával v kapitole věnované diskusi výsledků.

Rozčlenění disertační práce lze hodnotit jako logické a přehledné. Po grafické stránce je disertace zpracována rovněž na solidní úrovni. Práce ovšem obsahuje značné množství formálních chyb, které by se v pracích tohoto typu neměly vyskytovat vůbec nebo jen v minimální míře. Kompletní výčet chyb a připomínek byl dán autorovi práce k dispozici.

Teze disertační práce splňují po obsahové i formální stránce požadavky na ně kladené. Jsou v nich poměrně jasnou formou shrnuta základní fakta představená v disertační práci. Po opravě formálních chyb, kterých se ani zde autor nevyvaroval lze teze považovat za vhodné k publikaci. Autorův životopis je součástí tezí.

Přínos předkládané disertační práce Ing. Sámera Al Khaddoura lze spatřovat ve snaze popsat lomové chování ocelí pro energetiku obsahujících heterogenní svarové spoje pomocí univerzální křivky lomové houževnatosti a zejména v pokusu určit parametry této křivky primárně z výsledků zkoušek tahem, tzn. z výsledků principiálně odlišných mechanických testů. Nástrojem pro tyto analýzy byla metoda založená na využití umělých neuronových sítí. Uchazeč i přes některé nedostatky prokázal schopnost na základě analýzy zadané problematiky zvolit adekvátní přístupy při plnění jednotlivých cílů práce a dosažené výsledky diskutovat a hodnotit. **Vzhledem k těmto faktům doporučuji, aby byla předložená disertační práce přijata jako práce disertační a po její úspěšné obhajobě byl Ing. Samerovi Al Khaddourovovi udělen titul Ph.D.**

Prosím autora práce o zodpovězení následujících otázek:

1. Jaká zkušební tělesa byla ve skutečnosti použita pro zkoušky tahem? V kapitole 4.2 jsou zmíněna plochá zkušební tělesa, v kap. 4.3.1, resp. 4.3.2 je však rozebírána pouze problematika kruhových zkušebních těles (hladkých, resp. vrubovaných). Navíc, v obr. 33 je uvedeno těleso s průměrem měrné části 6 mm, avšak v textu jsou zmiňována tělesa $\varnothing 5$ mm.
2. V diskusi na str. 94 je uvedeno, že mikromechanismus nukleace štěpných mikrotrhlin, který lze charakterizovat jako „Weakest link“, byl identifikován u těles ležících mimo rozptylový pás. Bylo toto tvrzení skutečně prokázáno fraktografickou analýzou lomových ploch dotčených zkušebních těles?
3. V textu na str. 98 je uvedeno, že výsledky v Tab. 17 byly získány pomocí prvního modelu neuronové sítě, ovšem v záhlaví zmíněné tabulky je uvedeno, že se jedná o model druhý. Jaká je tedy skutečnost?

Brno, 10. 3. 2017

Ing. Libor Válka, CSc.

Ústav materiálových věd a inženýrství

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně