



**Oponentský posudek disertační práce Ing. Lud'ka Stratila
„Určování lomově-mechanických charakteristik
z podrozměrných zkušebních těles“.**

Cílem práce **Určování lomově-mechanických charakteristik z podrozměrných zkušebních těles**, autora **Ing. Lud'ka Stratila**, bylo vypracování metodiky určování lomové houževnatosti z „podrozměrných“ (sub-size) zkušebních těles.

Navržená metodika byla aplikována jednak na nízkoaktivovatelnou ocel Eurofer97 a také na oxidickými částicemi disperzně zpevněnou (ODS) ocel MA956. Obě tyto oceli byly vyvinuty resp. jsou uvažovány pro aplikace v jaderném průmyslu (v reaktorech IV. generace resp. fúzních reaktorech).

Rešeršní část práce je velmi obsáhlá a byl v ní podán přehled v současnosti aplikovaných metod a přístupů k hodnocení lomové houževnatosti určené pomocí zkušebních těles různé velikosti. Důraz je zejména kladen na vliv velikosti jednotlivých těles, kdy v důsledku rozdílného stísnění (constraintu) v okolí čela trhliny dochází k výraznému ovlivnění naměřených hodnot lomové houževnatosti.

V experimentální části práce autor provedl zkoušky miniaturních těles, jakož i těles větší velikosti a určil jejich J-R křivky s cílem kvantifikovat vliv velikosti v oblasti horních prahových hodnot lomové houževnatosti. V rámci práce byla věnována pozornost zejména miniaturním zkušebním tělesům pro tříbodový ohyb a excentrické zatěžování.

Následně byly realizovány simulace provedených zkoušek pomocí metody konečných prvků se zahrnutím mikromechanického modelu tvárného porušování. Na základě výsledků pak byla navržena metodika, která může být použita k predikci J-R křivky tělesa standardních rozměrů.

Pro ověření možnosti přenositelnosti výsledků na tělesa jiných velikostí byla provedena fraktografická analýza lomových ploch porušených zkušebních těles.

Získané výsledky byly shrnuty v diskusi a závěrech práce, kde byl rovněž podán komentář k závěrům a doporučením, které byly stanoveny po vyhodnocení evropského mezilaboratorního round robinu zaměřeného na numerické modelování tvárného lomu.

K vlastnímu textu disertační práce mám několik formálních i faktických poznámek:

- V textu se vyskytuje celá řada překlepů a stylistických chyb, které komplikují srozumitelnost textu a kterých by se měl autor při své budoucí vědecké činnosti vyvarovat. Pro příklad již v úvodu (str. 9) věta „Prodělaná ztráta constraintu na čele trhliny ...“ je zbytečně krkolomná, řekl bych dokonce matoucí (stačilo by uvést „Ztráta constraintu na čele trhliny ...“). Výrazy jako např. „zájmové“ těleso (str. 15) jsou poněkud „nepatřičné“ ...
- V rovnici (1) na str. 11 chybí závislost na $1/\sqrt{r}$, přestože se na ni autor odkazuje.
- Na str. 13 není uveden význam symbolu n ve vztahu $r^{-1/(n+1)}$ (exponent deformačního zpevnování). Tvrzení (na téže stránce) „Hodnoty J -integrálu mohou být přepočteny na hodnoty součinitele intenzity napětí dle experimentálně ověřeného vztahu“ – je opět chybně formulováno – ve vztahu (8) se buď jedná o vztah mezi K a J (platí obecně pro lineární elastickou lomovou mechaniku bez experimentálního ověření) nebo jde o vztah mezi K_{Ic} a J_{Ic} ...
- Na str. 14 je uvedeno „...byla shledána různá úroveň triaxiality napětí v okolí čela trhliny jako projev různé geometrie těles.“ – hovoříme-li o různé úrovni, bylo by vhodné tento parametr (trojososti) nějak nadefinovat (např. jako podíl σ_H/σ_{eq}). Obdobně je na str. 15 uvedeno „Tento parametr reprezentuje stav hydrostatického napětí na čele trhliny.“ – je tím myšlen stav napjatosti nebo velikost hydrostatického napětí? Není to totéž.
- Na str. 21 je uvedeno „Poloha tranzitní oblasti na ose teplot ... je nejcitlivější metodou monitorování degradace ocelí s feritickou strukturou.“ – poloha není metoda, navíc pojem citlivost má poněkud jiný význam, než je mu zde přisuzován.
- Str. 28 „Tělesa jsou umístěna v aktivní zóně reaktoru v zásobnících tvarově identickými palivovým tyčím, které musí být kvůli svému omezenému prostoru naplněny tělesy vhodné velikosti, tedy tělesy typu Charpy ale i jinými zkušebními tělesy.“ – v reaktorech VVER 440 ani VVER 1000 nemají kazety na svědečné vzorky stejný tvar jako palivové tyče.
- Str. 36 odst. 2.7.1. Štěpný lom
„Štěpný lom je definován jako rychlé šíření trhliny podél určité krystalografické roviny. Štěpení je nejpravděpodobnější, když je omezena plastická deformace materiálu...“ – celý odstavec je zmatečný – formulace jsou nesprávné, nepřesné, navíc si autor o kus dál sám odporuje „Štěpný lom vyžaduje dosažení patřičné úrovně plastické deformace na čele trhliny...“.
- Str. 37 odst. 2.7.2. Tvárný lom – poslední věta:
„Vzniklou trhlínu pak můžeme uvažovat jako Griffithovu trhlínu“ – co tím autor myslí?

- *Str. 38 odst. 2.8.1. Empirické přístupy:*
„Nevýhodou je ale pouze obecné řešení, které je často zatíženou poměrně velkou chybou nebo konzervativností odhadu, a jejich platnost pro patřičné vlastnosti materiálu a uvažované geometrie.“ – nevýhodou empirických přístupů je snad naopak právě to, že nejsou obecné...
- *Str. 42:* „Vznik nových dutin lze řídit také pomocí napětí. Jedná se ale o méně obvyklý způsob a to zejména kvůli jeho podstatně větší komplikovanosti. Ve většině komerčních MKP programů je proto upřednostněno deformační řízení.“ – proč je tomu tak?
- *Str. 47 – dělal autor sám TEM?*
- *Na str. 50 je uvedeno:* „Druhou možností metoda jednoho zkušební tělesa nenabízí, protože je k dispozici pouze konečný vzhled lomové plochy.“ – avšak na str. 51 sám autor tuto možnost nabízí: „Tělesa byla proto po skončení testu obarvena krátkodobým ohřevem ...“.
- *Str. 51:* „Vlastní zkouška metody jednoho tělesa se skládá z počátečních cyklických zatěžování, kdy je ustaveno zkušební těleso, po kterém následují další cykly pro stanovení počáteční délky trhliny z poddajnosti tělesa.“ – nerozumím, co myslí autor ustavením zkušební tělesa.
- *Str. 64 Nesouhlasím s tvrzením:* „Velikost jamek u hladkého tělesa je prokazatelně menší než je tomu u vrubovaných těles.“ Je v přímém rozporu s Obr. 40, navíc je charakterizace (distribuce) velikosti tvárných důlků náročná vzhledem k jejímu fraktálnímu charakteru a musí se proto dělat při poměrně širokém rozsahu zvětšení...
- *Str. 65:* „... kdy se uplatňuje mechanismus koalescence a růst dutin je velice dramatický.“ – co si mám představit pod pojmem dramatický?
- *Str. 65:* „... vlivem nerovnoměrné plastické deformace v oblasti krčku postupně mění jednoosý stav napjatosti podél průřezu krčku na lokalizovaný a dochází k vývoji trojosého stavu napjatosti.“ Tento výrok je opět mírně zavádějící – k vývoji trojosého stavu napjatosti dochází v důsledku lokalizace a vytvoření krčku...
- *V odst. 4.5.2 Stanovení materiállové křivky by mělo být uvedeno, že závislost σ - ϵ pro vstup do MKP modelu byla určena za předpokladu, že nedochází k tvorbě dutin.*
- *Str. 69: parametr f_c byl stanoven jako přibližná hodnota podílu dutin z hladkého a vrubovaného tělesa s 3 mm vrubem (0,0045). Skutečná hodnota je větší nebo menší? Jak to souvisí s triaxialitou (resp. aspect ratiem)?*
- *Str. 70:* „Při procesu kalibrace byla proto použita velikost prvku $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$, která se zdá být průměrnou velikostí získanou studiem relevantních prací“ –

v těchto pracích byla tato hodnota volena v relaci na velikost zrna. Studovaná ocel Eurofer97 má zrno jemnější. Zvolená velikost prvku má zásadní vliv na parametry modelu (jak sám autor dále uvádí).

- Str. 71: „Parametr f_0 je výrazný rys mikrostruktury ...“ – žádný parametr z principu není rysem struktury.
- Str. 71: Tvrzení „Hodnoty parametrů určené v této práci byly prokazatelně odůvodněny detailním mikrostrukturním studiem oceli a jejího mikromechanismu porušení.“ neodpovídá skutečnosti, že byla použita pouze unimodální distribuce nukleace dutin, přestože na str. 64 sám autor uvádí „Na lomových plochách byly pozorovány dvě rozdílné populace jamek. Jamky větší velikosti, prokazatelně vznikají na větších částicích sekundární fáze oceli, patrně oxidické částice a vměstky větší velikosti nebo velké karbidy typu $M_{23}C_6$ [113]. Jamky menší velikosti, pak pocházejí od menších karbidů“.
- Str. 78: „Na základě výsledků provedených simulací, kdy nebylo dosaženo přiměřené shody s experimentálně určenými průběhy křivek pro tělesa různých velikostí, bylo rozhodnuto určit velikost prvku pro zbývající dvě tělesa zvlášť.“. Co by se stalo, kdyby se tato velikost prvku použila na hladká resp. vrubovaná tělesa?
- Str. 84: závislost velikosti prvku na rozměru ligamentu je ze tří bodů proložena polynomem. Co když je tato závislost např. lomená čára?
- Str. 88 (a dále např. str. 96): „V případě kalibrovaného GTN modelu porušení pro studovaný materiál tedy existuje jednoznačný vztah mezi velikostí plastické zóny a velikostí prvku na čele trhliny.“ - je poněkud odvážné tvrzení. Hodnota hranice plastické (v tomto případě spíše procesní) zóny odpovídá hodnotě parametru stř. hodnota deformace při nukleaci nových dutin ε_N (0,3 – ostatně, jak sám autor uvádí). Tvárné porušování je ve studovaném případě řízeno hlavně nukleací dutin, změnou velikosti sítě se de facto mění hodnota (resp. účinek) tohoto parametru na čele trhliny.

Bez ohledu na nesporný přínos práce si dovoluji vyslovit jisté pochybnosti na aplikovatelnost (resp. přenositelnost) této metodiky na jiné geometrie zkušebních těles (včetně ohybových). Toto by však vyžadovalo ověření na výrazně větším souboru těles různých geometrií.

Při obhajobě by bylo vhodné, aby se kandidát k uvedeným faktickým připomínkám vyjádřil.

Závěrem konstatuji, že cíle disertační práce byly splněny. V disertační práci je zahrnuto mnoho výsledků, které mohou sloužit jako základ dalšího výzkumu. Kladně hodnotím, že disertační práce má dobrou grafickou úroveň. Předkládané teze splňují všechny požadavky na ně kladené.

Předloženou disertační prací prokázal autor předpoklady k samostatné výzkumné činnosti, došel k řadě užitečných poznatků a prokázal, že se dokáže správně orientovat v dané problematice. Přesto, že je odbornou veřejností dané problematice věnována pozornost již poměrně dlouhou dobu, je téma práce stále aktuální, získané výsledky jsou původní, zvolené metody adekvátní.

Doporučuji proto, aby předložená disertační práce byla přijata k obhajobě a po jejím úspěšném průběhu byl Ing. Lud'ku Stratilovi udělen akademický titul philosophiæ doctor – Ph.D.

doc.Dr.Ing. Petr Haušild

v Praze

16.6. 2014