

# POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

**Uchazeč:** Ing. Radek Procházka

**Název pojednání:** Vyhodnocování mechanických vlastností konstrukčních materiálů pomocí miniaturních zkušebních vzorků

**Aktuálnost tématu a význam pro obor:** Hlavním tématem disertační práce je výzkum možností, jak miniaturizovat zkušební vzorky pro únavové zkoušky. Autor se zaměřuje na širokou oblast únavy začínající od velmi malého počtu cyklů dolomu až k mezi únavy pro  $10^7$  cyklů. Pro experimentální práci si vybral dva typy ocelí, které jsou prakticky velmi zajímavé. Téma odběru malých vzorků ze stávajících konstrukcí, zejména v energetice a stavebnictví, je velice aktuální, protože prodloužení životnosti energetických zařízení nebo mostních konstrukcí je výrazným ekonomickým přínosem. V oblasti únavových testů je miniaturizace vzorků náročnější, protože zejména pro větší počty cyklů do lomu o porušení rozhoduje poměrně malý objem materiálu a tedy roste význam lokálních nehomogenit. Proto si myslím, že téma práce je zajímavé a aktuální. Výsledky práce mají přímý aplikační potenciál.

**Metody a postupy řešení:** Samotná práce je zaměřená zejména experimentálně. Stěžejní částí je provedení únavových zkoušek jak v oblasti vysokocyklové, tak v oblasti nízkocyklové únavy na sadě experimentálních vzorků od průměru 2 mm do 12 mm. Pro každou variantu bylo navrženo speciální zkušební těleso. Rozdělení napjatosti ve zkušebních tělesech bylo ověřeno jak pomocí metody konečných prvků, tak pomocí DIC. Zajímavou technikou je také stanovení meze únavy pomocí termografické analýzy. Myslím si, že metody pro stanovení cílů práce byly zvoleny vhodně. V práci mě chybí, systematická fraktografická analýza, které může pomoci vysvětlit některé odlišnosti při měření únavových vlastností na vzorcích různých průměrů zejména v oblasti vysokocyklové.

**Splnění cílů disertační práce:** Definované cíle disertační práce byly splněny. Autor ověřil možnosti testování miniaturizovaných vzorků pomocí různých technik a zatěžovacích režimů.

**Vědecký přínos práce:** Jak už je uvedeno v předchozích kapitolách, otázky řešené v disertační práci jsou aktuální a zajímavé. Dosažené výsledky ukazují možnosti miniaturizace únavových vzorků. Analýza výsledků je ale mnohdy povrchní. Zejména v oblasti vysokocyklové únavy, by si výsledky zasloužily hlubší fraktografickou analýzu. Ta by mohla vysvětlit jak, experimentální rozptyl, tak některé rozdíly mezi vzorky různých průměrů. Také výsledky získané pomocí termografie by zasloužily hlubší komentář. Publikační činnost autora je poměrně bohatá s počátkem v roce 2011, kde se poprvé jako spoluautor podílel na konferenčním příspěvku. Celkem je autorem 33 publikací a konferenčních příspěvků. Proto je třeba hodnotit publikační činnost autora a jeho zapojení do výzkumných projektů velmi pozitivně.

**Formální úprava disertační práce:** Z formálního hlediska je práce členěna poměrně logicky. Po nezbytném úvodu do problematiky a definici předběžných cílů následuje obsáhlá teoretická kapitola (Teoretická část). Tato kapitola shrnuje teoretické základy nutné pro následně popsané experimenty. Tato kapitola působí trochu encyklopedicky, místy bez hlubší rešerše relevantní literatury. Následuje experimentální část popisující použitý experimentální materiál, strukturní analýzu, návrh zkušebních těles a experimentálně

dosažené výsledky. V další kapitole jsou výsledky diskutovány a práce je ukončena stručným závěrem. Práce je psána poměrně čtivě, i když obsahuje některé nepřesnosti a překlepy.

**Závěrečné zhodnocení disertace:**

Předkládaná disertační práce pana Ing. Radka Procházky je zaměřena na zajímavou oblast miniaturizace zkušebních vzorků pro mechanické testy. Ukázalo se, že v oblasti nízkocyklové lze použít podrozměrné vzorky bez problémů. V oblasti vysokocyklové, zejména v blízkosti mezí únavy jsou již výsledky ovlivněny lokálními defekty ve struktuře a výsledky na vzorcích z různým objemem zkoušeného materiálu již nelze tak jednoduše korelovat. Výsledky disertační práce jsou zajímavé a **doporučuji tuto disertační práci k obhajobě.**

**Otázky na autora disertace:**

Jako experimentální materiál byly vybrány dvě oceli 22CrMoNiWV a 34CrNiMo6. Do jaké míry lze zobecnit výsledky získané na těchto materiálech?

Ukazuje se, že v nízkocyklové oblasti miniaturizace vzorků nemá vliv na výsledné únavové charakteristiky, zatímco v oblasti vysokocyklové je vliv velikosti vzorku markantnější. Je to obecný závěr, nebo záleží na testovaném materiálu?

Jaký je důvod k tomu, že mez únavy stanovená pomocí termografické metody je vždy vyšší, než mez únavy naměřená klasickým způsobem?

Jedním ze závěrů je, že ocel 34CrNiMo6 je nevhodná pro cyklicky namáhané komponenty. Proč, když mez únavy této oceli je výrazně vyšší než u oceli 22CrMoNiWV?

Brno 19.11.2019

  
doc. Ing. Pavel Hutař, Ph.D.



# OPONENTNÍ POSUDEK

*disertační práce*

**Ing. Radka Procházky**

## VYHODNOCOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ POMOCÍ MINIATURNÍCH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

V Praze dne 11. 11. 2019

Vypracoval : **Prof. Ing. Milan Růžička, CSc.**

---

### Úvod

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Radka Procházky, vypracovaná v rámci doktorského studia na Strojní fakultě Západočeské univerzity v Plzni. Práce se zabývá vývojem pokročilých technik v oblastech nízko a vysokocyklové únavy s využitím miniaturních zkušebních vzorků. Práce obsahuje 124 stran textu a je rozčleněna do devíti kapitol.

### Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Predikce únavové pevnosti a životnosti dílů je jedním z hlavních témat řešení při navrhování dílů strojních konstrukcí. Rovněž tak posuzování zbytkové životnosti již provozovaných zařízení. Protože se práce zaměřuje na tuto oblast s cílem vývoje nových pokročilých metodik s možností zkoušení na malém množství odebraného materiálu, lze toto téma hodnotit jako velmi potřebné a aktuální pro praxi.

### Zhodnocení použitých metod, postupu řešení a dosažení cílů práce

Autorovým hlavním cílem disertační práce bylo vyvinout a ověřit nekonvenční metodiky zkoušek využívajících miniaturizovaných zkušebních těles pro hodnocení mechanických vlastností v oblastech NCÚ i VCÚ. Snahou bylo zejména postihnout změny mechanických vlastností novými zkušebními metodami a výsledky dát do kontextu se standardně užívanými postupy. Konkrétní cíle autor formuloval následovně:

- Vyhodnocení vlivu velikostního faktoru zkušebních těles na výsledky zkoušek životnosti NCÚ a VCÚ
- Vývoj a ověření metodik deformačně a napětově řízených únavových zkoušek na miniaturních zkušebních tělesech
- Vývoj metodiky měření VCCÚ na miniaturizovaných tělesech s využitím termografie

- Konstrukce křivek životnosti s platností pro celý průběh únavového života.

Pro splnění cílů autor použil klasické i nové experimentální přístupy a metody. Pro stanovení napěťově deformačních charakteristik použil klasických zkoušek v tahu s ověřením homogenity materiálových vlastností napříč materiálem. Pro možnost nasazení metod zkoušek miniaturizovaných vzorků popsal možnosti odběru zkušebního materiálu z provozovaných zařízení pomocí odběrných zařízení s třiskovým principem typu SSam-2 (Rolls-Royce), resp. elektroerozivní metodu EDSE. Při stanovení vlivu velikosti se zabýval návrhem rozměrově proporcionálních těles s hodnocením vlivu průřezu na stabilitu v tlaku a eventuální koncentrace napětí pro tělesa s neválcovým profilem. Navrhl a ověřil metodiku řízení deformace miniaturních vzorků pomocí zpětnovazebního zapojení výsledků z digitální korelace obrazu v reálném čase. V rámci nekonvenčních zkoušek v oblasti vysoko cyklové únavy byla použita metoda termografického měření a odhadu meze únavy materiálu. Kladně lze hodnotit, že se autor nespokojil s výzkumem na jediném typu materiálu, ale zvolil dva typy slitinových ocelí využívaných v energetice.

Protože si práce dala za cíl vyhodnocení faktoru velikosti zkušebních těles, očekával bych v použitých postupech použití statistických metod při srovnávání jednotlivých získaných únavových křivek a použití statistických testů při hodnocení jejich významnosti či nevýznamnosti sledovaného vlivu. Rovněž tak u vývoje nových metodik a porovnání s technikami klasickými postrádám metody, které by relevantně prokázaly takové porovnání (např. testování odchylky získaných mezi únavy s využitím různých metod).

### **Stanovisko k výsledkům disertační práce**

Autor se zabývá zejména tématem možnosti stanovení mechanických parametrů na miniaturizovaných tělesech. Při tom neopomíná hledisko škálování objemu vzhledem k materiálové struktuře tak, aby po tloušťce vzorků (po průměru vzorku) byl vždy dostatečný počet zrn. Pozornost věnuje také struktuře materiálu, z hlediska možného výskytu vad nebo materiálové anizotropie, případně odlišných vlastností na povrchu nebo uvnitř polotovaru. Správně si všímá regulérní realizace zkoušek, zejména z hlediska vyloučení vzniku přídavného ohybu u tahových/tlakových zkoušek nebo vyloučení možnosti ztráty stability válcové části vzorku při tlaku. Podobně svědomitě se zabývá hodnocením a splněním požadavků na dodržení kvality jakosti povrchu zkušebních vzorků a zabránění vzniku a vlivu mikrovrubů na únavu. To svědčí o svědomité přípravě experimentů i jejich realizace.

Autor si však možná vytyčil v disertaci velmi ambiciózní cíle, se snahou popsat vliv rozměrového faktoru vzorků jak v nízkocyklové, tak i vysokocyklové únavě materiálu. Pro experimenty měl k dispozici omezený počet vzorků pro získání popisu jedné únavové křivky (i když standardně používaný: platných 6-12 výsledků). Výsledky zkoušek však vykazují rozptýl, i když nikoli neobvyklý. Přesto je ze závěrů práce patrné, že autor se nemůže jednoznačně k hodnocení vlivu velikosti tělesa na výsledky jednoznačně vyjádřit i třeba tím, že chybí příslušné statistické testování nebo znalost parametrů Weibullova rozložení, kterým se faktor velikosti vyznačuje.

Např. jako oponenta mě zaujalo, že na základě jiných publikovaných dat, např. [1]<sup>1</sup> by měl být Weibullův exponent statistického modelu vlivu objemu pro jeden ze zkoušených materiálů (34CrNiMo6) o hodnotě  $m=28$ . Odtud vycházejí teoretické poměry mezních napětí malých a velkých těles (statických i únavových) dle vztahu  $\frac{\sigma_D}{\sigma_d} = \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{-3}{m}}$  pro vzorky o průměrech 2 mm ku 4 mm a dále ku 8 a 12 mm v poměrech 1,212 : 1,125 : 1,044 : 1,000. Mez únavy, resp. i amplituda napětí ve VCÚ malého vzorku 2 mm by měla být o 21 procent vyšší oproti tělesu s průměrem 12 mm. To tedy navádí k otázce na disertanta: „**Lze ze získaných experimentálních výsledků zjištěných pro tento materiál získat nějakou obdobnou relaci vztahu mezních hodnot materiálu na základě realizovaných zkoušek, resp. jak vychází podobné vyčíslení pro zkoušené materiály?**“

Disertace zpracovává i další důležitá témata, která dávají prakticky využitelné výsledky. Jedná se zejména o realizaci zpětnovazebního řízení pro zkoušky malých vzorků na základě DIC v reálném čase. Uchazeč ukázal použitelnost i dostatečnou přesnost metody pro řízení zkoušek pomocí virtuálního optického průtahoměru. „**Do jaké míry by byla metoda využitelná pro řízení vzorků s vrubem? Byla by aplikovatelná pouze na pro nastavení a řízení nominální deformace nebo též deformace lokální? To by mohlo významně zpřesnit představy o cyklickém chování v exponované oblasti s vysokým gradientem napětí. Jaký na to má doktorand názor?**“

V neposlední řadě se práce rovněž zabývá experimentálním stanovením meze únavy s využitím termografických měření v oblasti infračerveného spektra, tj. měřením změny lokální teploty zkušebních těles. V literatuře je popsána řada metod vyhodnocování odhadu pro mez únavy, autor porovnává tři metodiky s klasickou konvenční. Výsledky ukazují, že konvenční metody, vycházející z mechanických zkoušek, jsou mnohem konzervativnější. „**Našel autor příklady z publikací, zda je tomu i při zkouškách jiných typů materiálu, případně jaká jsou publikována zdůvodnění?**“

### **Původní přínosy disertační práce**

Disertační práce ing. Radka Procházky přináší řadu původních experimentálních výsledků a návrh nových pokročilých metod zkoušení v oblasti statické, nízkocyklové a vysokocyklové únavy na miniaturizovaných tělesech, s možností využití odebrání vzorků materiálu z již provozovaných konstrukcí. To umožňuje zvýšení spolehlivosti při predikování zbytkové životnosti konstrukcí.

### **Formální úroveň práce**

Formální úroveň práce hodnotím jako velmi dobrou. Pisatel užívá srozumitelný technický jazyk bez významových i stylistických nepřesností. Definuje a vysvětluje všechny potřebné pojmy a veličiny. V práci jsem nelezl nadbytek překlepů a obecně nese známky pečlivosti. Tabulky, grafy i obrázky jsou čitelné a vypovídající, v textu komentované.

Za formální nedostatek však považuji absenci citací vlastních prací autora přímo v textu disertační práce. Ze soupisu celkem 33 prací autora, uvedených v závěru DP vyplývá, že řada

---

<sup>1</sup> Hans-Peter Gaenser> Some notes on gradient, volumetric and weakest link concepts in fatigue. Computational Materials Science 44 (2008) 230–239.

z nich úzce souvisí s tématem disertace. Protože autor má prokázat, že výsledky disertace byly publikovány, je uvádění odkazů v příslušných kapitolách práce velmi žádoucí, neboť k tématu problematiky se mohou vztahovat pouze některé.

#### **Další dotazy a připomínky pro zodpovězení na obhajobě práce**

1. V regulační smyčce při řízení deformace pomocí virtuálního extenzometru pomocí DIC vzniká fázový posun, který je softwarově kompenzován, jak autor uvádí. Jaká je cca limitní frekvence zkoušek pro její realizaci s dostatečnou přesností řízení síly a deformace?
2. V grafech na obr. 3-31 až 3-34 a 3-34 – 3-37 jsou uváděny aproximace experimentálních bodů, ze kterých není patrné, zda se jedná o lineární nebo jinou funkci v daném grafickém zobrazení. Lze to upřesnit a zdůvodnit výběr funkce?
3. Tab. 3-13 obsahuje parametry cyklických deformačních křivek určených na základě saturovaných hysterezních smyček, jak autor uvádí v textu. Dále jsou v tab. 3-15 uvedeny parametry únavových křivek deformace v NCÚ a v tab. 3-21 jsou uvedeny parametry únavových křivek napětí ve VCÚ. V teoretické části autor odkazuje na známé vztahy (20) – (22), které popisují relace mezi parametry. Ověřoval autor jejich platnost, případně okomentoval by příčinu neshod s teorií pro dané zkoušené materiály?
4. Pro materiál 22Cr byl zjištěn zvýšený výskyt vměstků, pro materiál 34Cr značné množství inkluzí, jak demonstruje autor na obr. 3-6 až 3-10. Jaký vliv přisuzuje autor těmto vlivům na získané výsledky? Lze očekávat, že podobná struktura by mohla být běžná i pro výrobky a jak by bylo možno tento fakt zakomponovat do návrhových metod?

#### **Závěrečné hodnocení**

V disertační práci doktorand Ing. Radek Procházka prokázal velmi dobrou orientaci v problematice zkoušení a zpracování experimentálních výsledků. Disertant získal řadu původních experimentálních výsledků a navrhl nové pokročilé metody zkoušení v oblasti statické, nízkocyklové a vysokocyklové únavy na miniaturizovaných tělesech. Autor v práci prokázal schopnosti samostatné vědecké práce a systematického výzkumu i kritického hodnocení získaných výsledků.

I přes položené dotazy a vznesené připomínky usuzuji, že cíle práce byly naplněny. Konstatuji, že předložená disertační práce splňuje kritéria, jak je vymezuje zákon č. 111/1998 Sb. paragraf 47 odst. 4, tj. že obsahuje původní výsledky, které byly uveřejněné nebo jsou přijaté k uveřejnění.

Doporučuji práci k obhajobě.

Milan Růžička

