

# **ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPONENT V PROVOZU POMOCÍ MINIATURIZOVANÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES**

## **ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES COMPONENT IN OPERATION USING SUB-SIZED SPECIMENS**

Eva Chvostová, Ján Džugan a Pavel Konopík

COMTES FHT a.s., Dobřany

### **Abstrakt**

Degradace mechanických vlastností kovových materiálů může vést ke ztrátě spolehlivosti a bezpečnosti strojů a kovových konstrukcí v elektrárnách při jejich provozu. Pro stanovení aktuálních materiálových vlastností je možné použít nedestruktivní techniky odběru vzorku a s pomocí miniaturizovaných standardních zkušebních těles (např. mikro-tahová zkouška, únava miniaturních těles, zkoušky mini-Charpy pro určení přechodové teploty FATT) predikovat zbytkovou životnost komponent. Použitá metoda miniaturizovaných standardních zkušebních těles respektuje stejný mód zatížení jako v případě standardních vzorků a není nutné předem stanovit korelace.

V článku je popsána použitelnost a spolehlivost těchto zkušebních metod pro stanovení aktuálních mechanických vlastností komponent v provozu na materiálech používaných v energetice.

The degradation of mechanical properties of metallic materials can lead to loss of reliability and safety of machines and metal structures in power plants during their operation. Nondestructive sampling techniques can be used to predict the residual life of the components and using miniaturized standard test specimens (e.g. micro tensile test, miniature fatigue test, determining the transition temperature FATT) to determine actual material properties. The method used for miniaturized standard test specimens respects the same load mode as for standard samples and no correlation is required.

This article describes the usability and reliability of these test methods for determining the actual mechanical properties of components in service on materials used in power engineering.

### **Úvod**

Tento příspěvek představuje potenciál aplikace miniaturizovaných vzorků pro určení mechanických vlastností materiálů. Cílem použití těchto metod je určení lokálních mechanických vlastností a vlastností materiálu v případech, kdy je k dispozici omezený objem experimentálního materiálu (např. při vývoji nano-materiálů metodami extrémní deformace, vývoj speciálních mechanicko-tepelných zpracování pomocí fyzikálního simulátoru, atd.). Tyto metody lze použít i při odběru vzorku semidestruktivním odběrem pro vyhodnocení zbytkové životnosti, Proto je vývoj metodiky zkoušení mechanických vlastností materiálů pomocí miniaturizovaných standardních zkušebních vzorků důležitý, protože tyto zkoušky mají velmi důležitou výhodu – používá se při nich stejný režim zatížení jako u standardních zkušebních těles [1]. V článku je prezentováno několik vybraných zkoušek pro vyhodnocení mechanických vlastností pomocí mini-vzorků.

### **Mikro-tahová zkouška (M-TT)**

Pro určení tahových vlastností kovových materiálů při současném zachování výhody spotřeby velmi malého množství experimentálního materiálu byla navržena geometrie pro mikro-tahové těleso, viz Obr. a. Srovnání výsledných křivek ze zkoušky tahem na standardních a mikro-tahových tělesech je graficky vyobrazeno na Obr. b. Pro takový typ

tělesa bylo nutné navrhnout čelisti pro uchycení do univerzálního zkušebního stroje, viz Obr. c. Měření deformace probíhá pomocí bezkontaktního měřicího systému ARAMIS, který využívá metody digitální obrazové korelace (Digital Image Correlation - DIC). DIC je moderní metodou měření pole deformací. Je založena na optickém sledování změn v obrazovém záznamu při mechanické zkoušce. Na zkoušený vzorek je nanesen náhodný kontrastní vzor (tzv. pattern), který je snímán jednou (2D) nebo více (3D) kamerami. DIC software pak sleduje změny vzoru v jednotlivých obrazech záznamu vůči referenčnímu obrazu. Touto metodou je možné velmi přesně měřit deformace a posuvy, a to jak na celém zkušebním tělese, tak lokálně v jednotlivých oblastech [1].

### **Určení lomové houževnatosti pomocí vzorků mini-Charpy**

Lomová mechanika má v současné době velký význam zejména při stanovení mezního zatížení při posuzování integrity komponent v provozu nebo pro stavební konstrukce rozmanitých typů. Ověření použitelnosti bylo provedeno na široce používané oceli 34CrNiMo6. Pro porovnání výsledků lomové houževnatosti byly použity jak standardní vzorky pro tříbodový ohyb, tak podrozměná tělesa (tj. mini-Charpy). Vyhodnocení bylo provedeno podle normy ASTM E 1820. Po obrobení vzorků byla na nich nakmitána trhlina. Poté byly na zkušebních tělesech vyrobeny boční vruby a testovány metodou více těles. Po zkoušce byla tělesa obarvena, křehce dolomena v tekutém dusíku a byly měřeny délky trhlin pomocí digitálního zpracování obrazu. Na základě známých délek trhlin a získaných záznamů byla sestrojena J-R křivka a vyhodnocena hodnota lomové houževnatosti pro obě geometrie těles [2]. Vzhledem k malé velikosti vzorků mini-Charpy nebyla splněna rozměrová kritéria daná normou a byla vyhodnocena lomová houževnatost platná pro danou tloušťku  $J_Q$ . J-R křivky pro obě geometrie jsou znázorněny na Obr. 1. Odchylna mezi oběma hodnotami lomové houževnatosti je pouze 1,7% navzdory tomu, že dle normy nebyla splněna rozměrová kritéria.

### **Určení přechodové teploty FATT pomocí vzorků mini-Charpy**

Zkoušky byly provedeny za účelem zjištění přechodu mezi houževnatým a křehkým lomem v závislosti na teplotě. Stanovení přechodové teploty FATT bylo provedeno na standardních zkušebních Charpy tělesech a mini-Charpy tělesech. Pro určení přechodové teploty pomocí mini a standardních vzorků se používá vztah (1) [3].

$$FATT_{\text{standard}} = FATT_{\text{mini}} + C \quad (1)$$

Kde C je materiálová konstanta (posun FATT vzhledem k velikosti vzorku). Pro stanovení teploty FATT pomocí mini-Charpy vzorků bylo nutné určit hodnotu konstanty C. Pro provedení zkoušek byl jako experimentální materiál vybrán svarový spoj sestávající ze dvou žáruvzdorných ocelí na bázi chrom-molybden a svarového kovu. Tento typ svaru je běžně používán v energetice. Byly provedeny zkoušky ve všech pěti zkoumaných zónách heterogenního svarového spoje. Příklad přechodové křivky u zóny BM2 je znázorněna na Obr.. Hodnota konstanty C byla stanovena  $C = 60 \pm 2$  °C.

### **Určení vysokocyklové únavy pomocí miniaturizovaných zkušebních těles**

Použitelnost miniaturních vzorků pro zkoušky únavy byla demonstrována na materiálu 11CrMo9-10 ocelové slitiny, která je široce používána v energetice. Zkoušky vysokocyklové únavy na miniaturizovaných vzorcích byly provedeny na servo-hydraulickém zkušební stroji MTS Bi-ONIX s kapacitou 25 kN v režimu tah - tlak. Testy byly prováděny řízenou silou s koeficientem nesouměrnosti cyklu  $R = -1$  při frekvenci přibližně 50 Hz. Výsledky testů jsou uvedeny jako počet cyklů do lomu, které jsou vyneseny v závislosti na amplitudě napětí v semilogaritmickém měřítku. Vzorky, které přežily  $10^7$  cyklů, jsou označeny šipkami.

Výsledky mají poměrně velký rozptyl, proto je mez únavy  $\sigma_C$  v obou případech vyhodnocena jako maximální amplituda napětí, při kterém vzorek nepraskl ani po  $10^7$  cyklů. Na této úrovni napětí byly provedeny dva platné testy. Porovnání velikosti se standardním vzorkem VCÚ a porovnání výsledků nestandardních a standardních únavových testů je uvedeno na Obr. .

### Ostatní zkoušky

Použití miniaturních vzorků je vhodné i pro další zkoušky mechanických vlastností. Byly provedeny a úspěšně porovnány výsledky zkoušek nízkocyklové únavy, hodnoty dynamického modulu, dynamické tahové zkoušky nebo creepové zkoušky pomocí miniaturizovaných a standardních těles.

### Závěr

Hlavním cílem této práce bylo porovnání výsledků zkoušek mechanických vlastností získaných pomocí standardizovaných zkušebních těles a miniaturizovaných těles u vybraných zkoušek a tím ukázat potenciál použití vzorků malých rozměrů pro určení mechanických vlastností.

Získané deformační křivky M-TT jsou plně srovnatelné s výsledky standardních testů. Výsledky tahové zkoušky ukazují vynikající shodu při použití standardních zkušebních vzorků a M-TT těles.

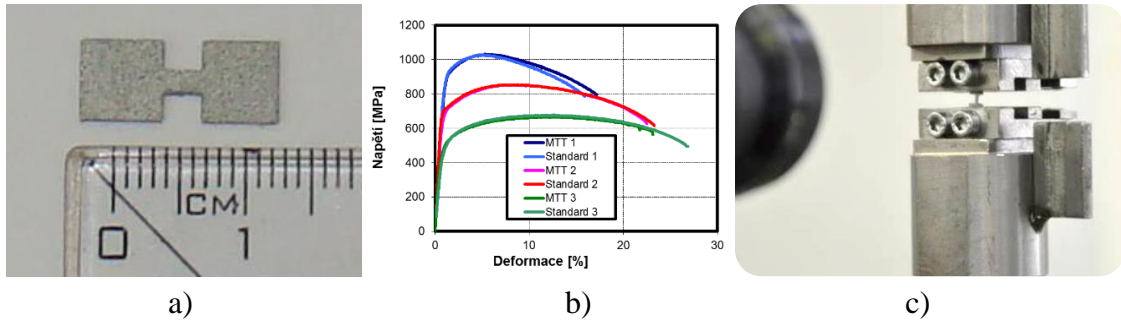
Pro stanovení lomové houževnatosti metodou více těles byly použity mini-Charpy vzorky (3x4x27 mm). Ačkoli prodloužení trhliny  $\Delta a$  u J-R křivky nepřesáhlo hodnotu cca 0,5 mm, výsledná hodnota lomové houževnatosti  $J_Q$  byla v dobré shodě s výsledkem lomové houževnatosti  $J_{IC}$  stanovené na standardních tělesech.

Pro stanovení přechodové teploty FATT při použití mini-Charpy vzorků je potřeba určit koeficient C, v našem případě byly přechodové teploty posunuty o  $60 \pm 2$  °C.

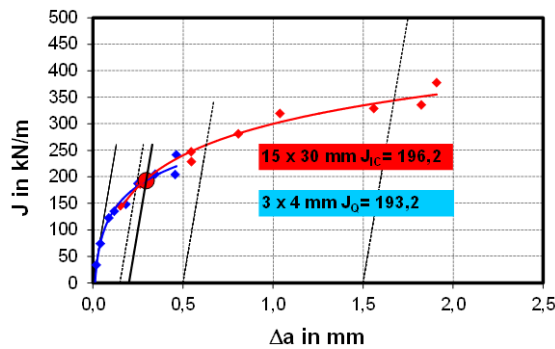
Provedení zkoušek vysokocyklové únavy potvrdily možnost získání spolehlivých výsledků na základě miniaturních vzorků bez nezbytnosti korelace výsledků. Všechny tyto aplikace ukazují možnost získat spolehlivé a opakovatelné výsledky zkoušek mechanických vlastností materiálů při použití miniaturizovaných standardních zkušebních těles.

### Literatura

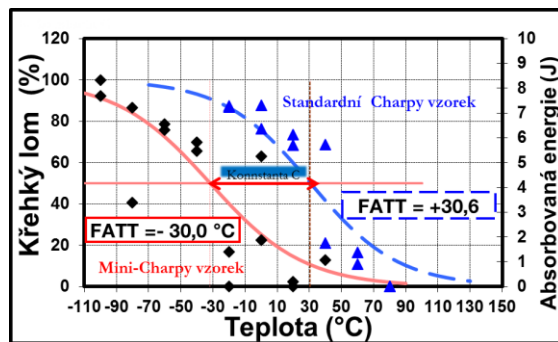
- [1] Konopík, K., Džugan, J, Procházka R (2013): *Evaluation of Local Mechanical Properties of Steel Weld by Miniature Testing Techniques*, Materials Science & Technology 2013, Montreal, Canada, ISBN 978-0-87339-762-9
- [2] M. Španiel, A. Prantl, J. Džugan, J. Růžička, M. Moravec, J. Kuželka: *Calibration of fracture locus in scope of uncoupled elastic-plastic-ductile fracture material models*, Advances in Engineering Software, Volume 72, June 2014, Pages 95-108
- [3] Corwin W. R. and Houghland A. M. (1986), "Effect of Specimen Size and Material Condition on the Charpy Impact Properties of 9Cr1MoVNb Steel", ASTM



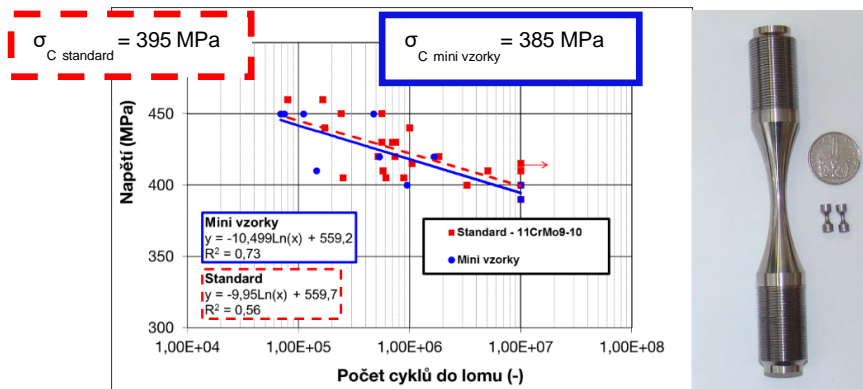
Obr. 1 a) M-TT těleso, b) Srovnání standardních a M-TT záznamů, c) čelisti pro uchycení mikro-tahového tělesa do zkušebního stroje



Obr. 1 J-R křivka 34CrNiMo6, dodaný stav materiálu



Obr. 3 Přechodová křivka základního materiálu 2



Obr. 4 Porovnání vzorků vysokocyklové únavy