

Vliv lokality odběru na hodnocení lomového chování velkých výkovků používaných v energetickém strojírenství

Influence of Place of Sampling on Evaluation of Fracture Behaviour of Large Forgings Used in Power Engineering

Ing. Ladislav Kander, Ph.D.; Ing. Petr Čížek, Ph.D.; Ing. Šárka Stejskalová

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM, s.r.o., Pohraniční 31/639, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

V článku je uvedeno porovnání základních mechanických a křehkolomových vlastností a struktury velkého výkovku pláště nádoby pro JE aplikaci se zohledněním závislosti těchto vlastností na lokalitě odběru zkušebních vzorků. Lokality odběru zkušebních vzorků vycházejí z použitých technologií výroby velkého výkovku. Článek se zaměřuje zejména na využití miniaturizovaných zkušebních těles pro hodnocení křehkolomových vlastností na základě koncepce „Master Curve“. Experimentální výsledky ukazují, že i když se neprokázal rozdíl ani v chemickém složení, ani v úrovni základních mechanických vlastností, lze pozorovat výrazné odlišnosti v úrovni křehkolomových vlastností charakterizované hodnotou referenční teploty T_0 , která byla stanovena pomocí $1/2$ CT těles pro každou hodnocenou lokalitu. Podobné rozdíly také ukazují přechodové teploty stanovené Vidalovou křivkou ze zkoušek rázem v ohybu.

Klíčová slova: velký výkovek; křehkolomové chování; křehkolomové vlastnosti, instrumentované zkoušky; Master křivka

The paper deals with comparison of chemical composition, mechanical properties, as well as fracture behaviour of steel 15Cr2NiMoVA of class 1, which is usually used for application in nuclear power engineering. Heavy forging most often became inhomogeneous due to segregation processes during solidification. These processes can affect significantly targeted properties, especially from the point of view of brittle fracture. Mechanical properties evaluated by standard tensile tests cannot show any significant changes in yield stress and tensile strength. A significant change in brittle to ductile behaviour can be on the other hand observed on the results obtained by standard Charpy test focused on FATT transition temperature evaluation, and fracture toughness tests based on Master curve concept covered at these days by ASTM 1971 standard. Obtained results show that in the case of chemical analysis, mechanical properties, as well as metallography examination, significant differences, have been found; in the case of fracture behaviour evaluated both by Charpy (even instrumented) tests and fracture toughness tests using miniaturized $1/2$ CT specimens, changes in fracture resistance have been found. Quantification can be done either as a difference of transition temperature (approx. 30°C) or reference temperature shift that was indicated in high of 63°C for upper parts of examined forging.

Key words: heavy forging; fracture behaviour; brittle fracture properties; instrumented tests, Master Curve

Hodnocení mechanických a zejména křehkolomových vlastností velkých výkovků je ve své podstatě vždy závislé na konkrétní lokalitě odběru a její poloze ve vztahu k předchozí technologii výroby. Hlavní vliv na výsledné užité vlastnosti mají zejména technologie kování a následného tepelného zpracování. V poslední době se v Evropě objevilo několik případů, zejména u aplikací pro JE v zemích západní Evropy, kdy byly shledány problémy na provozovaných celcích. V řadě případů totiž vznikaly v důsledku nepřítliš dokonale technické přípravy výroby v těchto velkých komponentech segregace prvků, které by při dlouhodobém provozu mohly mít za následek akcelerovanou degradaci užitečných vlastností. V průběhu výroby je nutné eliminovat kritická místa, v nichž by mohly v důsledku přirozených termodynamických podmínek spojených s chlazením velkých ingotů takové segregace nastat. Zmíněné segregace (zejména segregace C) mají nepříznivý vliv z pohledu

dlouhodobé životnosti. Díky inovativnímu přístupu technologie kování jak částí PG a KO ve společnosti Vítkovice, a.s., tak dalších JE komponent reaktorových nádob ve společnosti Škoda Plzeň v době výstavby našich jaderných elektráren byly v důsledku dodatečných tvářecích operací eliminovány škodlivé vlivy takových nebezpečných míst. Tomu napomohla technologie (tváření s převrácenou osou výkovku), kdy kritická místa byla soustředěna do oblastí, jež byly z těla výkovku následně vyděrovány, a tedy nemohly mít negativní vliv na provoz komponent a degradaci jejich vlastností.

Tyto znalosti a dovednosti však nejsou přijímány v praxi všeobecně. Tento článek proto prezentuje výsledky zkoušek křehkolomových vlastností v závislosti na lokalitě odběru zkušebního vzorku ve vztahu k orientaci ingotu tak, jak jej dnes vyrábí zahraniční výrobci.

Experimentální materiál a metody

Jako experimentální materiál byl zvolen velký výkovek určený pro JE aplikaci vyrobený na východě Evropy. Na základě velikosti dodaného polotovaru byla pro ověření vlivu lokality odběru zkušební vzorku na materiálové charakteristiky předmětného velkého výkovku použita horní (označení P) a spodní část (označení D) výkovku, jehož prostorová orientace odpovídala poloze ingotu z materiálu 15Cr2NiMoVA class 1 při jeho odlévání. Z obou vybraných lokalit (P a D) byly identicky odebrány vzorky pro kontrolní chemický rozbor, zkušební tělesa pro zkoušky základních mechanických vlastností včetně metalografického rozboru optickou metalografií a rovněž miniaturizovaná $\frac{1}{2}$ CT tělesa pro stanovení křehkolomových vlastností, jmenovitě polohy tranzitní teploty na základě určení referenční teploty T_0 . Na řešitelském pracovišti bylo rovněž provedeno hodnocení instrumentované tvrdosti.

Hodnocení pevnostních a plastických vlastností, jakož i křehkolomových vlastností zkouškami lomové houževnatosti bylo provedeno na servohydraulickém zkušebním zařízení MTS 100 kN, které bylo pro účely zkoušek lomové houževnatosti vybaveno klimatizovanou komorou umožňující provádění zkoušek při teplotách pod bodem mrazu.

Hodnocení odolnosti vůči náhlému nestabilnímu porušení bylo rovněž provedeno pomocí instrumentované zkoušky rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu s maximální hodnotou energie rázu 400 J.

Metalografické hodnocení bylo provedeno pouze optickou metodou na mikroskopu Olympus se zaměřením na nalezení rozdílů struktury mezi oběma lokalitami.

Hodnocení mechanických vlastností bylo doplněno využitím měření instrumentované tvrdosti na zařízení Zwick-Roel.

Výsledky experimentů a jejich diskuse

Výsledky jednotlivých kontrolních chemických rozborů v obou odběrových lokalitách jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Chemické složení jednotlivých lokalit výkovku z materiálu 15Cr2NiMoVA (hm. %)

Tab. 1 Chemical composition of the two parts of forging made of steel 15Cr2NiMoVA (wt. %)

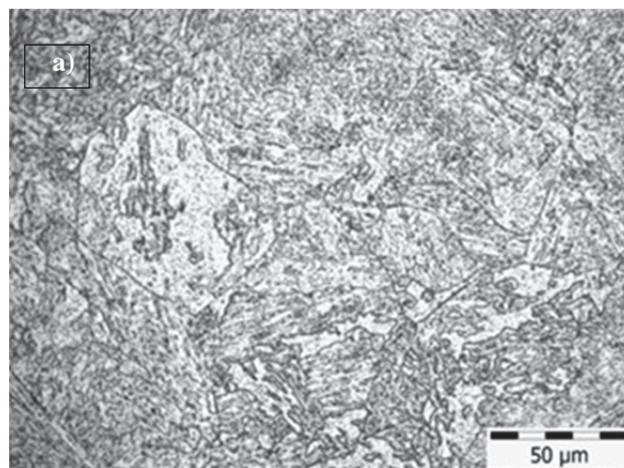
Lokalita	C	Mn	Si	Ni	Cr
Spodní část (D)	0,15	0,37	0,24	1,18	2,03
Horní část (P)	0,15	0,36	0,25	1,16	2,02
Lokalita	Mo	V	Cu	P	S
Spodní část (D)	0,60	0,11	0,019	0,008	0,002
Horní část (P)	0,59	0,10	0,020	0,008	0,002

Výsledky kontrolního rozboru chemického složení obou hodnocených lokalit ukázaly pouze marginální rozdíly

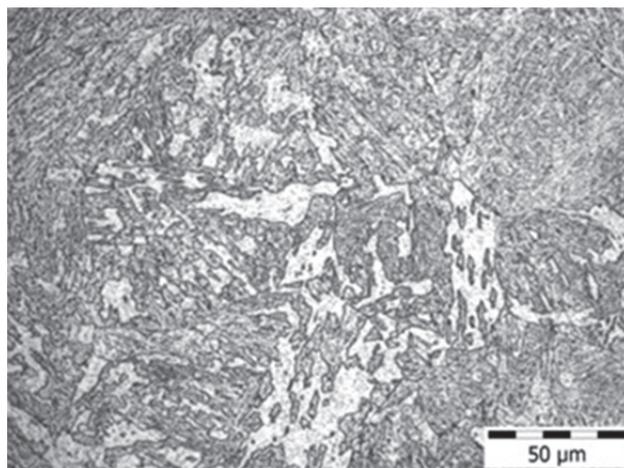
v obsazích jednotlivých prvků. Celý výkovek je tedy možno považovat za chemicky homogenní, a to i navzdory velkým rozměrům odlitého ingotu, kdy by se daly očekávat problémy s tuhnutím a s tím související segregací.

V dalším kroku bylo v obou částech provedeno hodnocení mikrostruktury, mechanických vlastností tahovými zkouškami, instrumentované měření tvrdosti, křehkolomových vlastností s využitím stanovení Vidalovy křivky zkouškou rázem v ohybu a tranzitních teplot. Ke komplexnímu hodnocení se rovněž vycházelo z lomové mechaniky a koncepce referenční teploty s využitím miniaturizovaných $\frac{1}{2}$ C(T) těles za účelem sestavení teplotní závislosti lomové houževnatosti založené na koncepci Master křivky

Metalografická analýza zjistila bainitickou strukturu na obou částech výkovku (obr. 1). Z obrázků mikrostruktur je však patrná jemnější struktura v horní části ingotu oproti dolní části.



a)



b)

Obr. 1 Mikrostrukturní rozbor ve spodní části (a) a horní části (b) ingotu

Fig. 1 Microstructure of lower (a) and upper part (b) of forging

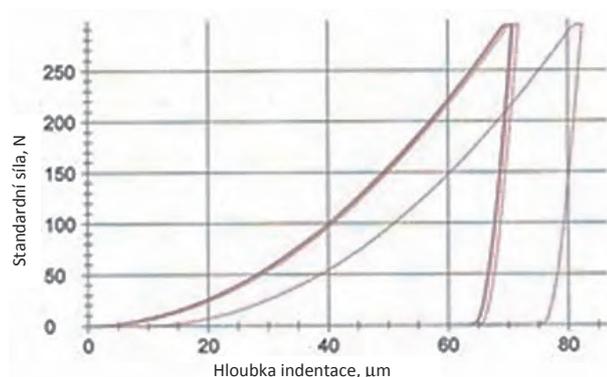
Pro dosažení informací o základních mechanických vlastnostech byly posuzovány také základní mechanické vlastnosti stanovené zkouškou tahem. Zkušební tělesa pro

zkoušku tahem byla odebrána z obou hodnocených lokalit a vlastní zkoušky tahem byly provedeny při pokojové teplotě na válcových zkušebních tělesech o průměru 6 mm. Výsledky zkušek jsou shrnuty v tab. 2. V ní lze pozorovat, že pevnostní i plastické vlastnosti v obou odběrových místech jsou prakticky shodné.

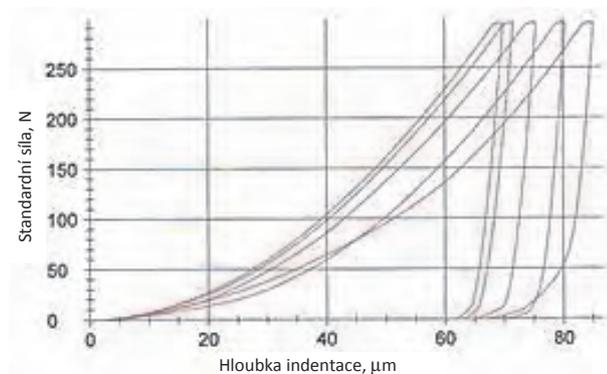
Pro instrumentované měření tvrdosti byl použit tvrdoměr Zwick/Roell a jako vnikající těleso – jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Ze závislosti síla vs. posunutí indentoru byla stanovena tvrdost podle Martense HM jako podíl zatěžovací síly a plochy vtisku vnikajícího tělesa pronikajícího za nulový bod dotyku [1]. K měření tvrdosti byla připravena sada 5 vzorků z každé lokality. Porovnání zatěžovacích křivek je uvedeno na obr. 2. Výsledky měření tvrdosti shrnuje tab. 3. Z ní je patrné, že maximální naměřené hodnoty tvrdosti výkovku dle Martense v obou lokalitách jsou obdobné. Rozptýl hodnot tvrdosti HM byl pozorován u obou lokalit v závislosti na místě vpichu.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti ve spodní a horní části výkovku
Tab. 2 Mechanical properties of upper and lower part of forging

Lokalita	$R_{p0,2}$	R_m	A	Z
	(MPa)		(%)	
Spodní část (D)	649	550	24	78
Horní část (P)	657	558	24	78



a)



b)

Obr. 2 Porovnání křivek instrumentované tvrdosti v lokalitě D (a) a P (b)

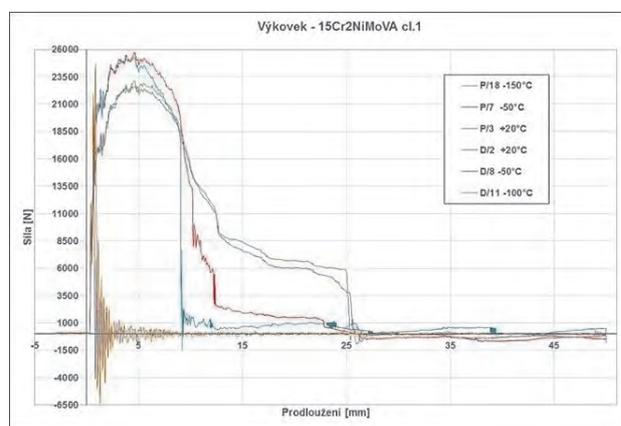
Fig. 2 Comparison of curves of instrumented hardness at locations D (a) and P (b)

Tab. 3 Mechanické vlastnosti ve spodní a horní části výkovku
Tab. 3 Mechanical properties of upper and lower part of forging

Lokalita	Střední hodnota HM	Směrodatná odchylka
	(MPa)	
Spodní část (D)	2208	29
Horní část (P)	1932	307

Zkouška rázem v ohybu byla provedena na instrumentovaném kyvadlovém Charpyho kladivu o nominální energii 450 J na dvou sadách zkušebních těles typu Charpy s V-vrubem odebraných z každé lokality [2]. Zkušební teploty byly voleny od -150 °C do 20 °C tak, aby bylo možné sestrotit celou Vidalovu křivku pokrývající oblasti horních a dolních prahových hodnot i přechodovou oblast. Na každém tělese byly stanoveny hodnoty absorbované energie, podílu houževnatého lomu i příčného rozšíření.

Na obr. 3 je dokumentován záznam síla vs. průhyb zkušebního tělesa z instrumentované zkoušky rázem v ohybu pro vybrané teploty a místa odběru vzorku. Plocha pod křivkou určuje práci spotřebovanou při lomu zkušebního tělesa. Z obrázku je patrné, že přibližně stejné průběhy grafu byly získány pro jednotlivé lokality při významně odlišných teplotách zkoušení. Naopak zcela odlišný průběh záznamu pro obě lokality lze pozorovat při stejné teplotě -50 °C. Křehkolomové vlastnosti, na rozdíl od vlastností mechanických a chemických, tak vykazují významně jiné chování v závislosti na konkrétní hodnocené lokalitě.



Obr. 3 Záznam instrumentované zkoušky tvrdosti a lokality odběru
Fig. 3 Record of instrumented hardness test and sample location

Výše uvedené závěry z hodnocení instrumentovanou zkouškou rázem v ohybu rovněž podporují Vidalovy křivky sestrotjené pro podíl houževnatého lomu (obr. 4). Z křivek je patrné, že existuje výrazný posun tranzitní teploty, v tomto konkrétním případě tranzitní teploty odpovídající polovičnímu podílu houževnatého lomu na ploše standardního zkušebního tělesa pro zkoušku rázem v ohybu. Jak je patrné z obr. 4, Vidalova křivka sestrotjená pro spodní část výkovku je posunuta významně doprava směrem k vyšším hodnotám teploty. Pro stejnou zkušební

teplotu tedy bylo dosahováno nižšího podílu houževnatého lomu na lomové ploše zkušební tělesa.



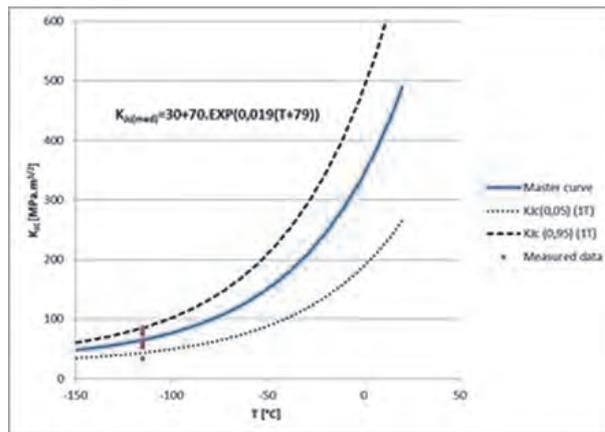
Obr. 4 Vidalovy křivky ze spodní (D) a horní (P) části výkovku [8]
Fig. 4 Vidal curves for lower (D) and upper (P) part of forging

Jednou z veličin kvantifikujících křehkolomové chování materiálu je tranzitní teplota T_t , která je stanovena z Vidalovy křivky pro 50 % houževnatého lomu. Zatímco tranzitní teplota v horní části výkovku je $-85\text{ }^\circ\text{C}$, v jeho dolní části je o $30\text{ }^\circ\text{C}$ vyšší (dosahuje hodnoty $-55\text{ }^\circ\text{C}$). Přestože jsou obě hodnoty tranzitních teplot dostatečně nízké, aby byl prakticky vyloučen výskyt náhlého křehkého lomu v intervalu provozních teplot, jejich rozdíl poukazuje na nehomogenity ve velkém výkovku, mající vliv na křehkolomové vlastnosti.

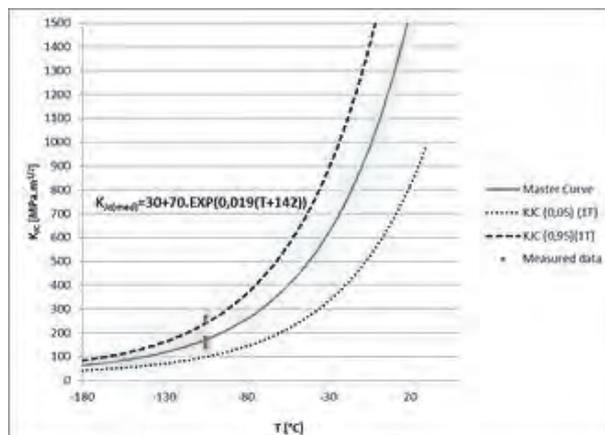
V poslední fázi experimentů bylo přistoupeno k provedení zkoušek lomové houževnatosti s cílem stanovit referenční teplotu T_0 , a popsat tak tranzitní chování předmětného výkovku v obou hodnocených lokalitách pomocí zkoušek založených na principech lomové mechaniky.

Pro měření lomové houževnatosti na daném výkovku ve dvou lokalitách byla použita sada těles typu $\frac{1}{2}\text{C(T)}$ s nacyklovanou počáteční únavovou trhlinou. Jednotlivá zkušební tělesa byla zatěžována při jedné teplotě, při níž je hodnota faktoru intenzity napětí K_{JC} blízká hodnotě $100\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, a to tak, aby bylo možné z výsledků sestavit tzv. Master křivku a vypočítat referenční teplotu [3]. Master křivka, navržená Wallinem [4], popisuje teplotní závislost elasto-plastického ekvivalentu lomové houževnatosti (K_{JC}) stanoveného na tělesech s tloušťkou o standardní velikosti $1T$ ($25,4\text{ mm}$). Vzorky byly opatřeny s počáteční únavovou trhlinou. Charakteristickým znakem lomového chování byl náhlý nestabilní lom za vzniku relativně malé plastické zóny před čelem trhliny v oblasti platnosti elasto-plastické lomové mechaniky. Její poloha na ose teplot je dána referenční teplotou T_0 , při níž je medián hodnot lomové houževnatosti $K_{JC} = 100\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Ze získaných záznamů síla vs. rozevření vrubu na čele zkušební tělesa byly vypočítány hodnoty K_{JC} a přepočteny na proporcionální zkušební těleso tloušťky $1T$. Ze vztahů dle ASTM E1921 [3] byl dále stanoven jejich medián a následně vypočítána referenční teplota pro obě oblasti odběru vzorků a sestrojeny Master křivky. Master křivky pro obě lokality jsou včetně tolerančních mezí pro pravděpodobnost porušení 5 a 95 % znázorněny na obr. 5 a jejich porovnání na obr. 6.

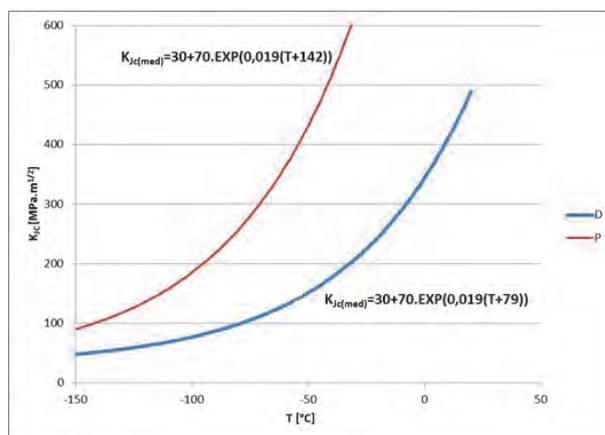


a)



b)

Obr. 5 Master křivka v lokalitě D (a) a P (b)
Fig. 5 Master curve in location D (a) and P (b)



Obr. 6 Porovnání Master křivek v lokalitě D a P
Fig. 6 Comparison of Master curve for sample P and D

Z obr. 6 lze pozorovat významný rozdíl v poloze křivek na teplotní ose, dokumentující značně horší křehkolomové vlastnosti, resp. odolnost vůči náhlému nestabilnímu lomu v lokalitě D (spodní část výkovku). Referenční teplota T_0 v oblasti P byla stanovena na $-142\text{ }^\circ\text{C}$, v oblasti D na $-79\text{ }^\circ\text{C}$. Tyto výsledky jsou v naprostém souladu s výsledky zkoušek rázem v ohybu a polohou Vidalových křivek pro jednotlivé hodnocené lokality.

Odolnost vůči náhlému nestabilnímu lomu je ve spodní oblasti ingotu významně horší než v oblasti horní, aniž by tato skutečnost byla detekována odchylkami v chemickém složení, základních mechanických vlastnostech či hodnotách tvrdosti. Křehkolomové vlastnosti, hodnocené jak zkouškou rázem v ohybu, tak zkouškami lomové houževnatosti prokázaly velmi významné odchylky pro jednotlivé hodnocené lokality a velkou citlivost na submikrostrukturu.

Závěr

Článek se zabývá vlivem lokality odběru zkušebních těles na hodnocení lomového chování velkých výkovek. Jako experimentální materiál byl zvolen velký výkovek z materiálu 15Cr2NiMoVA class 1. Z jeho dvou lokalit, a to horní a spodní části, byla vyrobena zkušební tělesa pro hodnocení mechanických vlastností a křehkolomového chování, a to stanovení tranzitní teploty zkouškou rázem v ohybu a teplotní závislosti lomové houževnatosti. Pro měření tvrdosti i zkoušku rázem v ohybu byla využita instrumentovaná zařízení.

Aniž by výkovek vykazoval odlišnosti z pohledu strukturního, chemického a z pohledu základních mechanických vlastností, velmi významný rozdíl v jednotlivých hodnocených lokalitách se projevil zejména při hodnocení

křehkolomových vlastností, a to jak standardní zkouškou rázem v ohybu, kdy byla vyhodnocena změna tranzitní teploty FATT o cca 30 °C, tak zejména zkouškami lomové houževnatosti s využitím koncepce referenční teploty T_0 , kdy byla indikována změna této teploty pro hodnocené lokality ve výši $\Delta T_0 = 63$ °C.

Poděkování

Autor příspěvku děkuje za institucionální podporu poskytnutou v rámci projektu č. LO 1203 „Regionální materiálově technologické výzkumné centrum - program udržitelnosti“ (RMTVC-PU) financovaného MŠMT České republiky.

Literatura

- [1] ČSN EN ISO 14577-1: *Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – Část 1: Zkušební metoda*. ÚNMZ, Praha, 2016.
- [2] ČSN EN ISO 148-1: *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda*. ÚNMZ, Praha, 2017.
- [3] ASTM E1921-18: *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range*. Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Vol. 03.01, 2018, p. 1231.
- [4] WALLIN, K. A Simple Theoretical Charpy-V-KIC Correlation for Irradiation Embrittlement. I: *ASME Pressure Vessel Pipes Conference*, Honolulu, 1989, pp. 99–100.

Nový vynález šetří peníze, snižuje spotřebu až o 20 %

Vědci z VŠB – Technické univerzity Ostrava otestovali zařízení, které je schopné regulovat elektrický příkon v okruhu. Jedná se o další konkrétní výsledek spolupráce univerzity s průmyslem.

„V podstatě se jedná o specializovaný regulátor napětí silových obvodů s proudy do 630 A, jehož zásadním přínosem je změna napětí v elektrickém okruhu bez výpadku protékajícího proudu,“ vysvětluje docent Robert Frischer z Fakulty materiálově-technologické a doktor Miroslav Mahdal z Fakulty strojní, kteří jsou zodpovědní za elektrické schéma a celkový koncept řešení. Jedná se o robustní zařízení, které udrží výstupní napětí v okruhu bez nutnosti instalovat složité a drahé měniče napětí. Doplní, že „je tedy možné např. zajistit stálé napětí elektrického okruhu obytného domu v případě připojení nedaleké solární elektrárny resp. zajištění také úrovně napětí, které je doporučeno z pohledu životnosti spotřebičů (230 V ± 10 V).“

Požadavek na zařízení tohoto typu vzešel z praxe, kdy bylo třeba regulovat napětí v elektrickém okruhu bez přerušení toku proudu. Jednalo se o místa s kolísajícím napětím sítě, místa v blízkosti fotovoltaických elektráren, blízko transformátorových stanic apod. Jedním z požadavků bylo také snížení spotřeby v elektrickém okruhu prostým snížením napětí. Jednalo se o například okruhy veřejného osvětlení, kdy bylo možné programově snížit spotřebu okruhu až o 20 %.

Na vývoji zařízení se podíleli odborníci z Fakulty materiálově-technologické a Fakulty strojní. Prvotní testy probíhaly v univerzitních laboratořích, poté se testovalo na okruzích veřejného osvětlení, kdy bylo možné ovlivňovat spotřebu osvětlení v závislosti na noční době. V testech se ověřovala spolehlivost zařízení, životnost a elektrické charakteristiky připojených spotřebičů.

- z tiskové zprávy -