

Stanovení tepelného odporu v kontaktu na základě nestacionárního teplotního měření

Determination of the Thermal Contact Resistance from Unsteady Temperature Measurements

Ing. Jiří Kvapil¹, prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.¹, Ing. Michal Pohanka, Ph.D.¹

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

V poslední době se v průmyslu stále častěji používají numerické simulace k optimalizaci výrobních procesů. Tyto numerické simulace ale potřebují velké množství vstupních parametrů a některé z těchto parametrů nejsou dosud dostatečně popsány. Jedním z nich parametrů je tepelný odpor, který je v literatuře nedostatečně popsán pro vyšší teploty a kontaktní tlaky.

Tento článek se zabývá postupem, jak tepelný odpor experimentálně měřit a stanovit součinitel přestupu tepla v kontaktu, který je převrácenou hodnotou k tepelnému odporu a může být v numerických simulacích použit jako okrajová podmínka popisující kontakt dvou těles.

Pro účely experimentálních měření tepelného odporu bylo v Laboratoři přenosu tepla a proudění (LPTP), VUT v Brně sestaveno experimentální zařízení, které umožňuje měřit tepelný odpor mezi dvěma tělesy za různých podmínek, které vzniknou nastavením parametrů, jakými je např. kontaktní tlak, počáteční teplota těles, typ materiálu, drsnost povrchu těles, přítomnost okujů na povrchu atd. Tělesa v kontaktu se označují jako senzor a vzorek a jsou v nich zabudována teplotní čidla, která při experimentu zaznamenávají teplotu. Poté jsou teplotní průběhy použity v numerickém výpočtu, který využívá inverzní metodu vedení tepla. Výsledkem výpočtu je stanovení průběhu součinitele přestupu tepla v kontaktu během experimentu. Na závěr jsou výsledky shrnuty a je popsáno chování tepelného odporu v závislosti na parametrech, které ho ovlivňují.

Klíčová slova: tepelný odpor; součinitel přestupu tepla v kontaktu; inverzní úloha vedení tepla

Nowadays numerical simulations are used to optimize manufacturing process. These numerical simulations need a large amount of input parameters and some of these parameters have not been sufficiently described. One of this parameter is thermal contact resistance, which is not sufficiently described for high temperatures and high contact pressure.

This article describes experimental measuring of thermal contact resistance and manner of determination of the thermal contact conductance, which can be used as a boundary condition for numerical simulations.

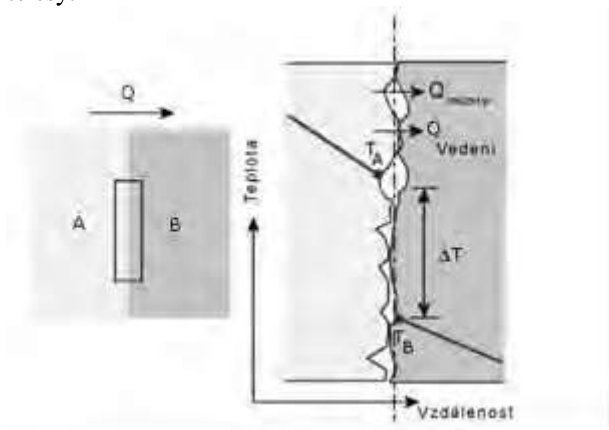
An experimental device was built in the Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory, part of the Brno University of Technology, and it can be used for measuring the thermal contact conductance in various conditions, such as contact pressure, initial temperatures of bodies in contact, type of material, surface roughness, presence of scales on the contact surface. Bodies in contact are marked as a sensor and a sample, both of them are embedded into thermocouples. The temperature history of bodies during an experiment is measured by thermocouples and it is then used to estimate time dependent values of the thermal contact conductance by an inverse heat conduction calculation. Results are summarized and dependence of the thermal contact resistance in various conditions is described.

Key words: thermal resistance; thermal contact conductance; inverse heat conduction problem

Jestliže jsou dvě tělesa v kontaktu, vznikne mezi nimi nedokonalý spoj (obr. 1). Vznik nedokonalého spoje je způsoben hlavně drsností obou povrchů těles a jejich tvarem. V případě, že jsou obě tělesa rovinného tvaru, jejich spoj se skládá z mnoha diskretních vlastností materiálu. Dalším parametrem, který ovlivní velikost a rozložení mikrokontaktů ve spoji, je velikost

mikrokontaktů, které jsou ve spoji rozloženy náhodně. Pokud těleso nemá rovinný tvar, jsou mikrokontakty rozloženy do určité oblasti spoje. Velikost mikrokontaktů a jejich hustota ve spoji závisí na parametrech určujících drsnost povrchu a fyzikálního tlaku v kontaktu a typ deformace nerovností na povrchu obou těles. V místě, kde ve spoji nedochází k přímému

dotyku obou materiálů, vzniká mezera. V mezeře se nejčastěji nachází tekutina (např. vzduch, voda, olej atd.). Kondukce přes místa dotyku je hlavní složkou přenosu tepla, i když tento přestup tepla probíhá na velmi malých plochách. Z důvodu nedokonalého spoje vznikne rozdíl povrchových teplot ΔT mezi oběma tělesy.



Obr. 1 Kontakt dvou těles
Fig. 1 Contact of two bodies

Tepelný odpor v kontaktu R_k je matematicky definován jako

$$R_k = \frac{\Delta T}{q} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right], \quad (1)$$

kde q je tepelný tok přes rozhraní.

Reciproční k tepelnému odporu v kontaktu je součinitel přestupu tepla v kontaktu α_k , který je definován jako

$$\alpha_k = \frac{1}{R_k} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]. \quad (2)$$

Tepelný odpor v kontaktu se dá odvodit buď teoreticky, nebo experimentálním měřením.

Bylo publikováno několik teoretických korelačních vztahů, kterými se dá teoreticky určit velikost tepelného odporu za určitých podmínek při vzniku 3 typů deformací povrchu těles v kontaktu: elastická (Mikić) [1], plastická (Cooper, Mikić, Yovanovich) [2] a elastoplastická (Sridhar, Yovanovich) [3]. Tyto korelační vztahy jsou běžně používány (např. v Comsol Multiphysics). Fiedberg [4] ale ukazuje, že korelační vztahy jsou velmi nepřesné při kontaktním tlaku nad 7 MPa a rozdílu teplot těles více jako 500 °C. Jelikož se v hutním průmyslu pracuje s kontaktními tlaky v řádu stovek MPa a teplotami až 1200 °C, je tato oblast tepelného odporu v kontaktu velmi málo popsána a hutní průmysl má velký zájem o data z experimentálních měření.

Experimentální měření tepelného odporu se zpravidla dělí na statický a dynamický způsob. Při statickém způsobu se do obou těles v kontaktu zabudují

termočlánky. Poté je jedna strana soustavy konstantně zahřívána a protější ochlazována. Po ustálení tepelného toku v soustavě se pomocí termočlánků určí tepelný tok přes kontakt obou těles, z termočlánků se extrapoluje rozdíl povrchových teplot v kontaktu a vypočte se výsledný tepelný odpor.

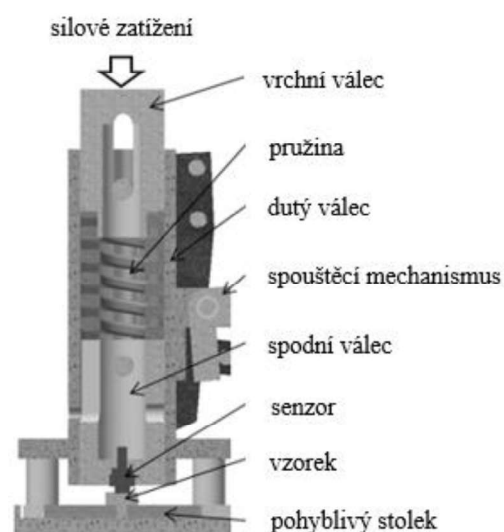
Dynamický způsob spočívá v ohřátí jednoho z těles na požadovanou teplotu a poté je vytvořen kontakt s druhým tělesem za předem stanovených podmínek. V obou tělesech jsou zabudovány termočlánky, které slouží jako vstup do inverzní úlohy vedení tepla. Výstupem je časová závislost koeficientu přestupu tepla v kontaktu.

1. Experimentální stanovení tepelného odporu

Hlavní myšlenkou stanovení tepelného odporu v kontaktu pomocí experimentálního měření spočívá ve vytvoření kontaktu mezi dvěma tělesy s rozdílnou teplotou při daném kontaktním tlaku. Pro tuto potřebu bylo vytvořeno speciální experimentální zařízení.

1.1 Experimentální zařízení

Zařízení (obr. 2) pro měření tepelných odporů bylo vyvinuto a sestaveno v Laboratoři přenosu tepla a proudění VUT v Brně. Zařízení umožňuje vytvořit v krátkém časovém okamžiku kontakt mezi dvěma tělesy. Tlak v kontaktu lze nastavovat pomocí silového zatížení pružiny. Dataloger umožňuje zaznamenávat průběh teploty v obou tělesech (dále označovaných jako senzor a vzorek) jak před, tak i po jejich kontaktu s maximální vzorkovací frekvencí 320 Hz, která umožní zaznamenat i velmi rychlé změny teplot.



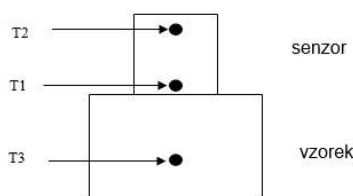
Obr. 2 Experimentální zařízení
Fig. 2 Experimental apparatus

Základem zařízení je ocelové těleso válcovitého tvaru, ve kterém je umístěna pružina. Z obou stran pružiny jsou umístěny dva válce, z nichž horní je použit ke

stlačení pružiny. Dvěma hlavními součástmi zařízení je senzor a vzorek, které jsou vyrobeny z požadovaného materiálu a jejich kontaktní plochy jsou upraveny na požadovanou drsnost.

Ke spodnímu válci je připevněn senzor, který má tvar válce s průměrem 12 mm. Pod něj je možné vložit testovací vzorek, který je rovněž ve tvaru válce a má průměr 25 mm. V senzoru jsou zabudovány dva termočlánky. První termočlánek (T1) s průměrem 0,5 mm, typu K je zabudován 1 mm od povrchu senzoru. Druhý termočlánek (T2) s průměrem 1 mm, typu K je zabudován 10 mm od povrchu senzoru.

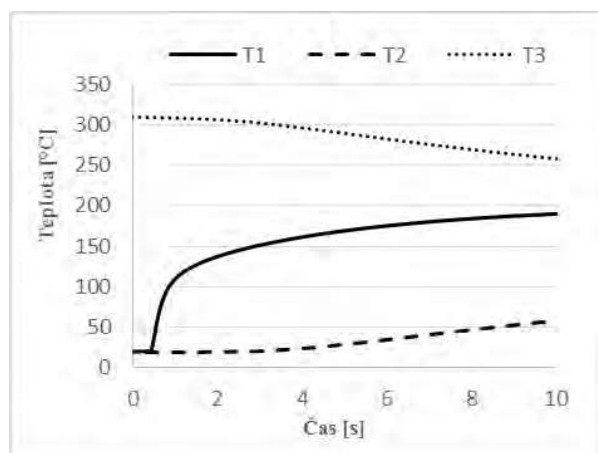
Vzorek je také vybaven termočlánkem (T3) o průměru 1 mm, typu K a je zabudován ve vzdálenosti 10 mm od povrchu vzorku.



Obr. 3 Detail zabudování termočlánků
Fig. 3 Detail of the sensor and the sample

1.2 Průběh experimentu

Nejdříve je vzorek vložen do elektrické pece k ohřevu na požadovanou teplotu. Dále je spodní válec zajištěn proti pohybu a pomocí vrchního válce je pružina stlačena silou k vytvoření požadovaného tlaku v kontaktu. Po ustálení teploty ve vzorku je vzorek vyjmut z pece a vložen na pohyblivý stolek a zasunut pod senzor. Spouštěcím mechanismem je uvolnění spodní válce a dojde k nárazu senzoru do vzorku. Vlivem rozdílné teploty nastane přestup tepla přes kontakt. Velikost silového zatížení pružiny je měřena pomocí silového senzoru. Během experimentu jsou data z termočlánku ukládána v datalogeru.



Obr. 4 Záznam teplot během experimentu
Fig. 4 Temperature history during experiment

Na obr. 4 jsou zobrazeny průběhy teplot z testovacího měření, pro něž byl senzor i vzorek vyroben z nerezové oceli AISI 304, povrchová drsnost senzoru Ra 0,8 a vzorku Ra 7,2, počáteční teplota senzoru 22 °C a vzorku 305 °C. Kontaktní tlak byl nastaven na 100 MPa.

1.2 Výpočet okrajové podmínky

Ze záznamu teplot jsou pomocí inverzní úlohy vedení tepla vypočítány povrchové teploty a součinitel přestupu tepla v kontaktu, který je převrácenou hodnotou tepelného odporu v kontaktu.

Pro výpočet je vytvořen numerický model (obr. 5), který je zleva a zprava zaizolován (tepelný tok je roven nule, shora je nastavena okrajová podmínka na teplotu termočlánku T2 a zdola na teplotu T3).

Součástí modelu je imaginární vrstva, která je umístěna mezi senzorem a vzorkem. Nastavováním její tepelné vodivosti je řízen přenos tepla mezi senzorem a vzorkem. Tloušťka imaginární vrstvy byla v modelu nastavena na 0,01 mm.

Při sekvenčním výpočtu, který je podobný Beckově algoritmu [5, 6], se optimalizuje tepelná vodivost imaginární vrstvy v každém výpočtovém kroku tak, aby se nasimulovaná teplota v místě teplotního čidla T1 co nejvíce blížila naměřené teplotě v senzoru během experimentu.



Obr. 5 Numerický model
Fig. 5 Numerical model

Pro stabilitu výpočtu se používají dopředné kroky a hledá se nejmenší součet chyb pro f dopředných kroků pomocí následujícího vzorce:

$$SSE = \sum_{i=m+1}^{m+f} (T_i^* - T_i)^2, \quad (3)$$

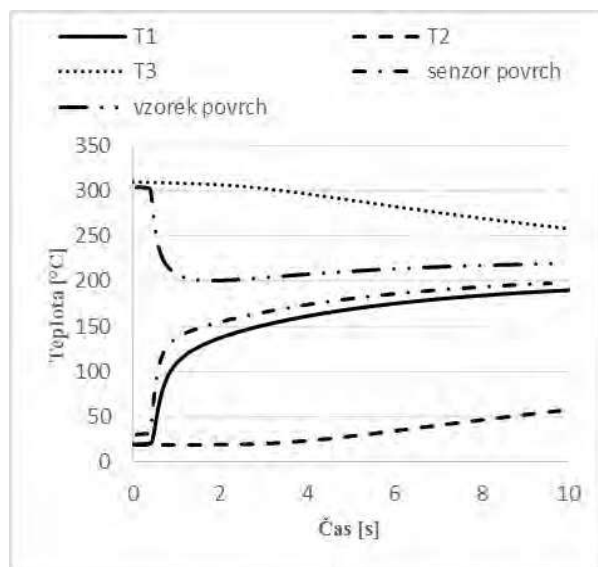
kde m značí aktuální časový krok, teploty T_i^* jsou změřené teploty v termočláncu T1, teploty T_i jsou vypočteny přímým výpočtem, např. metodou konečných diferencí, metodou konečných prvků anebo metodou konečných objemů.

Pro nalezení minima SSE při f dopředných krocích je využit Brentův algoritmus [7], který je založen na inverzní parabolické interpolaci. Při nalezení minima SSE získáme velikost tepelné vodivosti imaginární vrstvy k a vypočítáme součinitel přestupu tepla v kontaktu α_m pro časový krok m

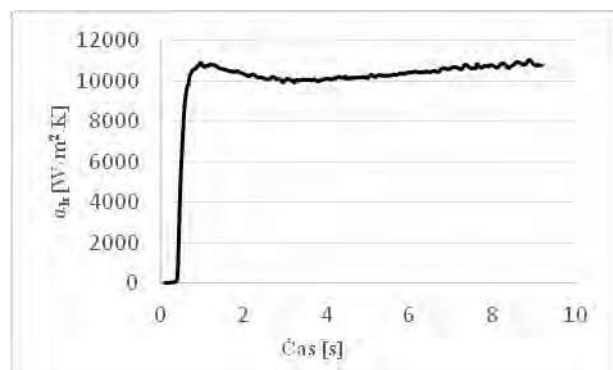
$$\alpha_m = \frac{k^m}{\Delta x} \quad (4)$$

kde Δx je šířka imaginární vrstvy (v našem případě 0,01 mm).

Vypočtené povrchové teploty jsou zobrazeny v obr. 6 a průběh součinitele přestupu tepla v kontaktu v obr. 7, z něhož vyplývá, že pro výše zmíněnou konfiguraci experimentu se hodnota součinitele přestupu tepla v kontaktu pohybuje kolem 11 000 W/m².K.



Obr. 6 Vypočtené povrchové teploty
Fig. 6 Calculated surface temperatures



Obr. 7 Vypočtený součinitel přestupu tepla v kontaktu
Fig. 7 Calculated thermal contact conductance

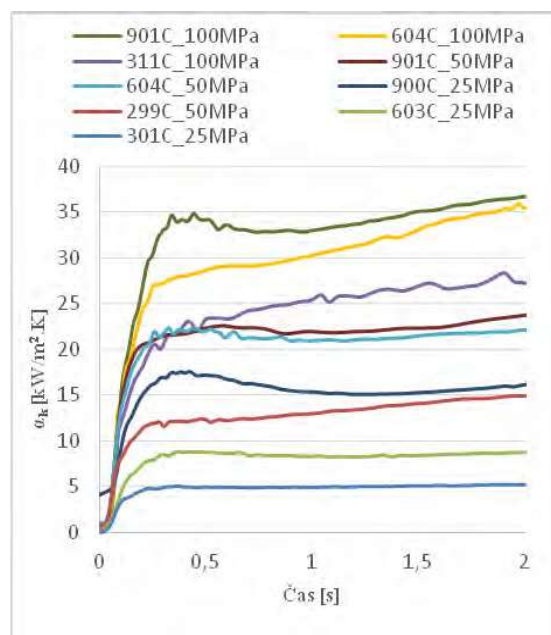
2. Vyhodnocení experimentálních výsledků

Pro další experimenty byly zvoleny dva parametry (počáteční teplota vzorku a kontaktní tlak) a byl vytvořen experimentální plán (tab. 1), který měl ukázat, do jaké míry tyto dva parametry ovlivňují tepelný odpor v kontaktu. Senzor i vzorek byly vyrobeny z nerezové oceli AISI 304 a měly stejnou drsnost povrchu Ra 0,8.

Tab. 1 Fyzikální podmínky experimentu
Tab. 1 Physical conditions of the experiment

Název	Teplota vzorku [°C]	Tlak [MPa]
301C_25MPa	301	25
299C_50MPa	299	50
311C_100MPa	311	100
603C_25MPa	603	25
604C_50MPa	604	50
604C_100MPa	604	100
900C_25MPa	900	25
901C_50MPa	901	50
901C_100MPa	901	100

Na obr. 8 jsou zobrazeny vypočtené závislosti součinitele přestupu tepla v kontaktu na čase pro různé nastavení kontaktních tlaků a počátečních teplot vzorku. Je vidět, že dominantním parametrem ovlivňujícím velikost součinitele přestupu tepla v kontaktu je kontaktní tlak, který způsobí deformaci kontaktních ploch, a dojde tak k lepšímu přenosu tepla. Nepatrný vliv má i počáteční teplota vzorku.



Obr. 8 Závislost součinitel přestupu tepla v kontaktu na tlaku a teplotě
Fig. 8 Dependence of the thermal contact conductance on the contact pressure and initial temperature

Závěr

V Laboratoři přenosu tepla a proudění VUT v Brně bylo vyvinuto zařízení a metodika pro výpočet tepelného odporu v kontaktu. Metodika je založena na měření teploty během kontaktu dvou těles a dokáže stanovit velikost tepelného odporu v kontaktu pro různé nastavení kontaktních tlaků, typu materiálu, počáteční teploty, drsnosti povrchu, přítomnosti okují atd. Numerický výpočet využívá imaginární vrstvy, která je vložena mezi tělesa, a změnou její tepelné vodivosti je nastaveno množství tepla, které přestupuje z jednoho tělesa do druhého.

Bylo provedeno několik experimentů s kontaktem těles vyrobených z nerezové oceli a drsností povrchu Ra 0,8 pro různé tlaky a počáteční teploty. Výsledky ukazují, že tepelný odpor je velmi závislý na kontaktním tlaku, méně už na počáteční teplotě vzorku.

Experimentálně vypočtené hodnoty tepelného odporu v kontaktu mají nezastupitelnou roli jako okrajové podmínky pro numerické simulace v ocelářském průmyslu, zejména simulace kontaktu opěrných válečků a bramy při plynulém odlévání oceli nebo při válcování za tepla či za studena.

Poděkování

Výsledky tohoto projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) byly získány za finančního přispění MŠMT v rámci účelové podpory programu "Národní program udržitelnosti I".

Literatura

- [1] MIKIĆ, B. B. Thermal contact conductance; theoretical considerations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 17, 1974, No. 2, pp. 205-214
- [2] COOPER, M. G., MIKIĆ, B. B., YOVANOVICH M. M. Thermal contact conductance, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 12, 1969, No. 3, pp. 279-300
- [3] SRIDHAR, M. R., YOVANOVICH M. M. Elastoplastic Contact Conductance Model for Isotropic Conforming Rough Surfaces and Comparison With Experiments, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, 1996, No. 1, pp. 3-9
- [4] FIEBERG C., KNEER R. Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, 2008, No. 5-6, pp. 1017-1023
- [5] RAUDENSKÝ, M. Heat Transfer Coefficient Estimation by Inverse Conduction Algorithm. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, Vol. 3, 1993, No. 3, pp. 257-266
- [6] POHANKA, M., HORSKÝ, J. Inverse Algorithms for Time Dependent Boundary Reconstruction of Multidimensional Heat Conduction Model. In: *Seminar of Thermophysics 2007*, Bratislava: October, 2007, Slovakia, pp. 14-23
- [7] WILLIAM H. P., SAUL A. T., WILLIAM T. V., BRIAN P. F. Numerical Recipes in C. 2nd ed. 1997

ArcelorMittal dodá ocelová vlákna na stavbu metra v Kataru

Tisková zpráva AMO, Č.M.D.

15. 6. 2015

ArcelorMittal vytvořil novou mobilní aplikaci pro investory. Nová ambasáda Spojených států v Londýně bude mít základy z oceli, které dodá ArcelorMittal. Tato společnost získala od firmy Samsung ocenění „Nejlepší partner“. Společnost ArcelorMittal WireSolutions dodá okolo 21 500 t ocelových vláken, která budou použita ve třech trasách nového metra ve městě Dauhá. Pro firmu je to první dodávka ocelových vláken na Blízký Východ a zároveň největší dodávka ocelových vláken v její historii. Ocel do Dauhá doputuje z tří evropských výrobních center – z Lucemburska, Polska a Velké Británie. Metro bude otevřeno v druhé polovině roku 2019 a bude stát 35 mld. USD. Čtyři trasy s 98 stanicemi budou měřit přibližně 300 km. Ocelová vlákna budou tvořit ostění tunelů ve třech trasách metra.

Prodej CNG z VÍTKOVIC

Moravskoslezský deník, s. 10, kom.

16. 7. 2015

Skupina Vítkovice Machinery Group (VMG) prodala do poloviny letošního roku na svých plnicích stanicích pod značkou CN-Gvital už více než 1 mil. m³ CNG. Vloni byl stejný objem prodán za celý rok. Společnost VMG očekává, že do konce letošního roku překoná v prodeji hranici 3 mil. m³ CNG. V tržbách tato hodnota představuje téměř 60 mil. Kč. Ve srovnání se stejným obdobím roku 2014 je dosavadní letošní prodej o 60 % vyšší, a překonává tak plán.

Garantem prodeje CNG je dceřiná společnost Vítkovice Doprava. Společnost VMG dnes provozuje 18 plnicích stanic, z nichž 10 uvedla do provozu od loňského roku v prodejní síti společnosti Benzina. Během několika dalších měsíců se plánuje zřízení dalších 9 stanic po celé ČR.