

KOMPLEXNÍ PŘÍSTUP K ZABEZPEČENÍ INTEGRITY VYSOKOTLAKÉHO PLYNOVODU DN 400

Ing. Aleš Brynych
CEPS a.s.

V polských potrubních systémech se v posledních letech postupně mění tok plynu ze směru východ-západ na směr opačný. Na základě této skutečnosti vyvstal v některých částech Polska požadavek na navýšení kapacity plynovodů pro přepravu plynu na tlakové hladině 7,4 MPa. Toho se dosahuje nejenom výstavbou nových vysokotlakých plynovodů, ale i začleněním starších „zrehabilitovaných“ plynovodů provozovaných v minulosti na nižší tlakové hladině do systému tlakové hladiny 7,4 MPa.

Konkrétním příkladem tohoto komplexního přístupu k zabezpečení integrity byla rehabilitace plynovodu DN 400 o délce 55 km v jihozápadním Polsku. Rehabilitace zahrnovala tyto základní kroky:

- zprůchodnění potrubí pro čisticí a inteligentní ježky,
- vyčištění potrubí,
- provedení vnitřní inspekce potrubí pomocí inteligentního ježka MFL,
- zkoušky trubního materiálu a tlakové zkoušky trubního tělesa na části potrubí vyříznutého z plynovodu,
- tlakovou reparaci a vysušení potrubí.

Základní údaje o plynovodu

Plynovod DN 400, PN 6,3 MPa, který sloužil především pro zásobování oblastí kolem Jelení Gory zemním plynem, byl vybudován v letech 1991–92 a 1997 ze šroubovicově svařovaných trub 406 x 6,3 mm z oceli 18G2A. Na oblouky, do chrániček a na shybky byly použity trubky 406 x 8,8 mm z oceli R45. Ze skutečného provedení stavby se však dochovala pouze část dokumentů kontroly trubního materiálu k potrubí vyrobeného z oceli 18G2A, k potrubí z oceli R45 se dokumentace nedochovala.

Plynovod byl projektován i postaven jako čistitelný se vstupní a výstupní komorou pro vkládání a vyjímání čisticích pístů. Z trasy plynovodu jsou vyvedeny tři odbočky DN 250, 150 a 100.

Čištění potrubí a provedení vnitřní inspekce potrubí

Tuto první etapu realizovala společnost T. D. Williamson Polska. Podle informací od provozovatele nebylo potrubí plynovodu nikdy čištěno, a to ani za provozu a pravděpodobně ani při výstavbě. I když zde existovalo poměrně značné riziko, že při průjezdu potrubím dojde k zastavení čisticího ježka ve sloupci nečistot nebo v místě zdeformovaného potrubí, požadoval provozovatel provést čištění za provozu. Při prvním čištění došlo po cca 40 km k uvíznutí čisticího ježka v místě křížení s železniční tratí. Po odkopání plynovodu byl na potrubí nalezen ostrý vertikální segmentový ohyb, který bránil průchodu čisticího ježka. Po jeho vyříznutí s využitím technologie TDW Stopple byla trasa plynovodu pro čisticí písty ježka zprůchodněna a při druhém čištění byl čisticí ježek zachycen na konci plynovodu v přijímací komoře. Následně bylo provedeno ještě několikanásobné čištění. Při prvních bězích čisticího ježka byla čisticí komora na konci plynovodu z poloviny zaplněna prachem.

Po vyčištění potrubí byla na plynovodu provedena vnitřní inspekce pomocí kalibračního a následně inteligentního ježka MFL. Průchodem inteligentního ježka potrubím plynovodu byla detekována řada vad se zeslabením stěny trubky až ze 79 %. Největší z těchto vad byly následně po odstavení plynovodu z provozu (před zahájením tlakové reparace) odkopány a podle závažnosti byly nalezené vady vyříznuty anebo překryty objímkou.

Materiálové zkoušky trubního materiálu a zkoušky trubního tělesa

Při výřezu výše uvedeného nevyhovujícího segmentového ohybu nalezeného v průběhu čištění byl z plynovodu ve stejném místě odebrán i vzorek potrubí

o rozměrech 406 x 6,3 mm pro zkoušky. Z této vyřízlé části potrubí byly následně odebrány vzorky pro materiálové zkoušky a ze zhruba 3 m bylo vyrobeno zkušební těleso pro tlakové zkoušky.

Podle dochovaných dokumentů kontroly byly šroubovicově svařované trubky 406 x 6,3 mm vyrobeny z oceli 18G2A. U této oceli je garantovaná minimální mez kluzu $R_{e\min} = 350$ MPa.

Výsledky materiálových zkoušek

Chemický rozbor

Podle dosažených výsledků se jedná o ekvivalent ocelí typu ČSN 41 1523, případně St 53 dle DIN 17172 nebo X52 dle API Spec 5 L. Výsledky chemického rozboru jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1. Výsledky chemického rozboru

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Cu [%]	Ni [%]	Cr [%]
0,173	0,3	1,33	0,024	0,0212	0,082	0,024	0,027	0,034

Tahové zkoušky

Zkoušky byly provedeny na plochých tyčích, které byly odebrány po dvou kusech z podélného a obvodového směru trubky. Výsledky tahových zkoušek jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2. Výsledky tahových zkoušek

Směr odběru vzorku	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
Obvodový	349	542	30,15	52,62
	365	555	34,46	54,29
	357	548	32,31	53,46
Podélný	371	543	28,15	50,24
	380	553	29,23	50,72
	375	548	28,69	50,48

V porovnání s mechanickými vlastnostmi požadovanými u oceli L 360 NB (MB) dle ČSN EN 10208-2 jsou dosažené hodnoty vyhovující.

Zkoušky rázem v ohybu

Vzorky pro tyto zkoušky byly opět odebrány z obvodového a z podélného směru trubky. Výsledky zkoušek rázem v ohybu jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3. Výsledky zkoušky rázem v ohybu

Směr odběru vzorku	Zkušební teplota [°C]	KV [J]	KV* [J]	KCV [J/cm ²]
Obvodový	20	66,7	150,9	188
	0	62,3	141,5	176
Podélný	20	23,7	40,1	50
	0	23,6	40,0	50

KV – hodnoty nárazové práce na skutečném vzorku

KV* – hodnoty nárazové práce přepočítané na plnou tloušťku standardizovaného vzorku $b_0 = 10$ mm

KCV – hodnoty nárazové práce přepočítané na vzorek o $\varnothing 10 \times 10$ mm, resp. 1 cm²

Hodnoty nárazové práce KV^* v obvodovém směru jsou při teplotách 20 °C a 0 °C velice příznivé, nad 140 J. Hodnoty získané na vzorcích odebraných v podélném směru jsou při obou teplotách méně příznivé – 40 J. Výsledky na vzorcích z podélného směru nesplňují požadavek standardu ČSN EN 10208-2. Ve standardu je požadována min. střední hodnota KV^* 60 J.

Metalografický rozbor

Tento rozbor byl proveden na výbrusech z podélného i z obvodového směru trubky.

Mikročistota je co do obsahu sulfidů příznivá, co do obsahu oxidů je jen místy při povrchu vzorku zhoršená. Ocel má co do obsahu vměstků dobrou až průměrnou kvalitu.

Jedná se o ocel s feriticko-perlitickou strukturou, jemnozrnnou (velikost feritického zrna odpovídá vzoru č. 8,5 až 7 dle příslušné normy). Struktura není řádkovitá, řádky perlitu se vyskytují jen ojediněle. Jinak je struktura polyedrická. Perlit je vyloučen v lamelární formě. Podél hranic feritických zrn jsou místy vyloučeny řetízký terciálního cementitu. Povrchy trubky nevykazují oduhličení.

Kvalita šroubovicového svaru

Šroubovicový svar má podle informativního šetření na výbrusu dobrou kvalitu. Kresba a převýšení na vnějším povrchu vyhovují. Na vnitřním povrchu převýšení vyhovuje požadavkům, i když kresba není ideální. Struktura svarového kovu vykazuje kolumnární charakter, je feriticko-perlitická. Kvalita svaru je vyhovující.

Na základě provedených zkoušek lze kvalitu oceli hodnotit co do mechanických vlastností a struktury jako standardní, bez významnějších závad.

Zkoušky trubního tělesa

Na základě výsledků materiálových zkoušek – chemického rozboru, tahových zkoušek, zkoušek rázem v ohybu a metalografického rozboru – byly stanoveny hodnoty tlaků pro tlakovou reparaci zkušební tělesa.

Pro ocel R45, ze které byly vyrobeny trubky 406 x 8,8 mm, je garantovaná minimální mez kluzu pouze $R_{e\ min} = 255$ MPa. Nižší hodnotu meze kluzu však kompenzuje větší tloušťka stěny, a proto je hodnota tlaku na mezi kluzu u trubek 406 x 6,3 mm a 406 x 8,8 mm shodná. Materiálové zkoušky potrubí z oceli R45 nebyly prováděny, neboť provozovatel neposkytl možnost odběru vzorku.

Zkušební těleso (obr. 1) o délce 2,9 m a objemu 360 l bylo oboustranně zadýnkováno a osazeno návarky. Tyto návarky byly ostrojeny armaturami pro naplnění potrubí vodou, snímání tlaku, napojení vysokotlaké hadice pro přívod a odpuštění tlakové vody. Uvedené zkušební těleso bylo za účasti provozovatele a generálního dodavatele postupně tlakováno k mezi kluzu na hodnotu trvalé integrální obvodové deformace $\epsilon = 0,05$ % a poté k mezi pevnosti až do destrukce materiálu. Přehled dosažených hodnot při tlakování zkušební tělesa je uveden v tabulce 4.

Tabulka 4. Přehled dosažených hodnot při tlakování zkušební tělesa

P [MPa]	V_p [l]	V_c [l]	ϵ [%]	Rychlost tlakování [l/min.]
9,602	0,15	3,19	0,02	0,66
10,450	0,38	3,64	0,05	0,66
11,910	1,43	5,21	0,20	0,66
16,632	47,00	47,45	6,61 – destrukce	0,66

V_p – přičerpaný objem vody na vyvození plastické deformace

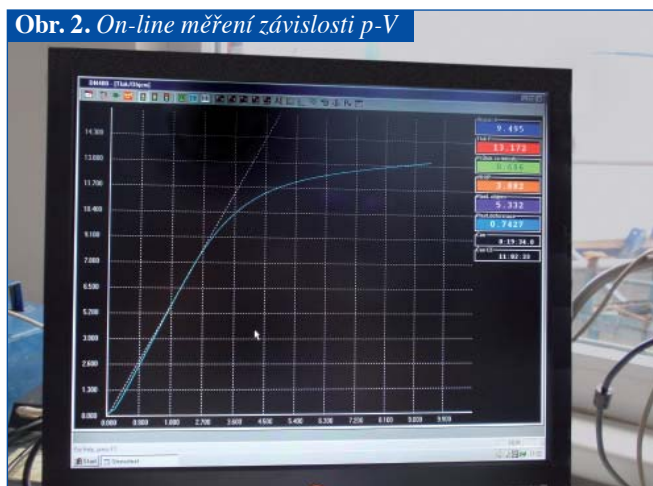
V_c – celkový přičerpaný objem vody

ϵ – trvalá integrální obvodová deformace

V průběhu tlakových zkoušek při zvyšování tlaku nebo tlakových výdrží byly on-line sledovány a měřeny závislosti p-V a p-t (obr. 2), průtok přičerpané vody, celkový přičerpaný objem, velikost přičerpaného plastického objemu a hodnota trvalé integrální deformace ϵ .



Obr. 1. Zkušební těleso



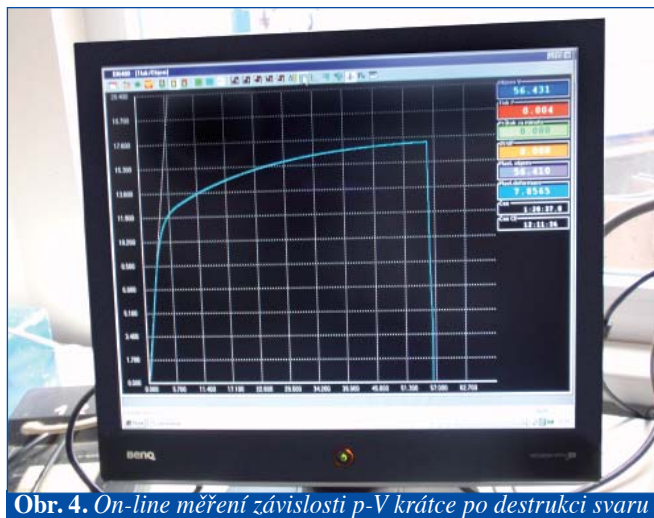
Obr. 2. On-line měření závislosti p-V

Při tlaku blízkém se výpočtovému tlaku meze pevnosti zkušební tělesa došlo k destrukci obvodového svaru (obr. 3 a 4) při tlaku 16,632 MPa.

Na základě průběhu a výsledků provedených zkoušek byl stanoven maximální tlak tlakové reparace $P_{\max} = 10,450$ MPa. Zároveň maximální hodnota trvalé obvodové deformace ϵ nesmí překročit 0,05 %.



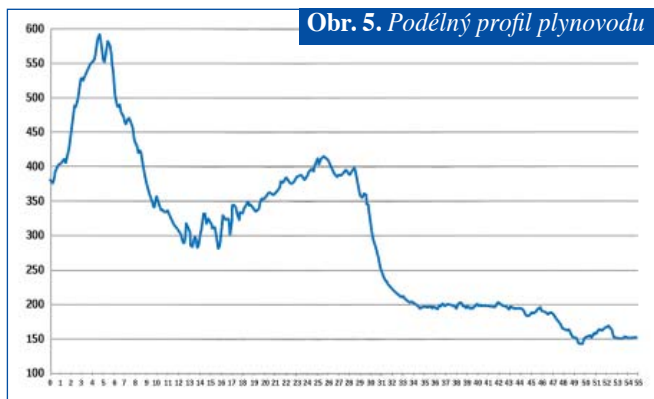
Obr. 3. Destrukce obvodového svaru



Obr. 4. On-line měření závislosti p-V krátce po destrukci svaru

Tlaková reparační

Plynovod DN 400 byl rozdělen na čtyři pracovní celky, které byly postupně po jednom odstavovány z provozu a následně po provedení oprav, výřezů defektů, tlakové reparační a vysušení opět zprovoznovány. Každý pracovní celek byl dále dělen na pracovní úseky, na kterých byly prováděny tlakové reparační. Rozdělení plynovodu na pracovní úseky bylo značně obtížné, neboť území, kterým plynovod procházel, připomínalo spíše Českomoravskou vrchovinu nebo podhůří Krkonoš než polskou rovinu. To vyplývá i z podélného profilu, kde vertikální osa grafu znázorňuje převýšení, resp. nadmořskou výšku v intervalu 100 až 600 metrů a horizontální osa délku plynovodu v intervalu 0 až 55 km (obr. 5).



Obr. 5. Podélný profil plynovodu

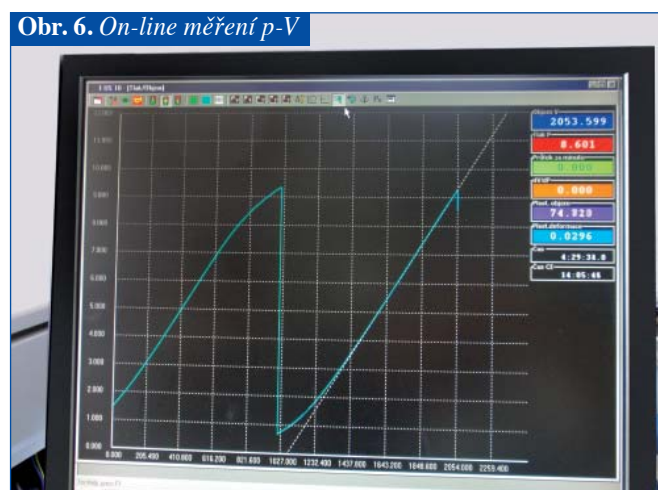
Časový prostor pro provedení tlakové reparační byl provozovatelem stanoven maximálně na 4 měsíce, což byl velmi krátký termín, přihlédne-li se k:

- rozdělení plynovodu na 4 pracovní celky a z toho vyplývající velké množství rozpojů, přepojů a propojů na provozovaném potrubí,
- uskutečnění výřezů nebo oprav vad detekovaných vnitřní inspekcí,
- použitelným zdrojům vody pro plnění potrubí vodou, přepouštění vody a následnému vypouštění použité vody,
- provedení tlakové reparační,
- vysušení potrubí.

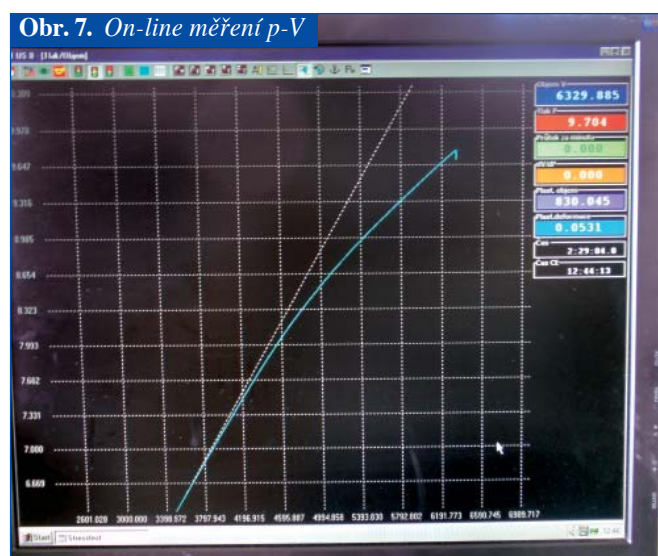
Celý projekt tedy vyžadoval dokonalé naplánování, organizaci a nepřetržitý průběh prací včetně svátků, sobot i nedělí.

Počet pracovních úseků byl po důkladné rekognoscaci terénu a provedených zkouškách stanoven na 16. Uvedené množství úseků však bylo těžce vydobyto kompromisem mezi žádostí investora a provozovatele v jedné osobě o minimalizaci nákladů a požadavky zhotovitele na převýšení a délky pracovních úseků.

V současnosti neexistuje v Polsku žádný předpis nebo norma pro provádění tlakové reparační. Z uvedeného důvodu byl v rámci projektu vypracován realizační pracovní postup (RPP), využívající pro provedení tlakové reparační dvou předpisů a jejich kombinace. Pro provedení tlakové reparační zahrnující i zkoušky pevnosti byl použit Typový technologický postup S05 CEPS „Provedení tlakové reparační a tlakové zkoušky podle Inspekční zprávy ITI č. j. 706/02.05/06/15.07/1 ze dne 3. 3. 2006“. Pro následné vyhodnocování těsnosti byl použit polský předpis pro provádění stresstestů a následných tlakových zkoušek nových potrubí, norma ZN-G-3900 „Proby specialne“. Uvedený RPP byl následně schválen provozovatelem a organizací polského státního odborného dozoru UDT, která plní v Polsku funkci podobnou jako TiČR v ČR. V průběhu provádění tlakových reparační byly on-line sledovány a měřeny závislosti p-V a p-t (obr. 6 a 7), průtok přičerpané vody, celkový přičerpaný objem, velikost přičerpaného plastického objemu a hodnota trvalé integrální deformace ϵ , což norma „Proby specialne“ nevyžaduje. Nicméně polská plynárenská odborná veřejnost, která se na realizaci této akce v různých stupních schvalování nebo kontroly podílela, tento progresivní způsob měření uvítala a zároveň i doporučila při provádění dalších obdobných prací.



Obr. 6. On-line měření p-V



Obr. 7. On-line měření p-V

V průběhu tlakové reparační došlo dvakrát k destrukci potrubí. Poprvé na části plynovodu, která byla vybudována v roce 1997. Při časové prodávě po dosažení maximálního tlaku v prvním cyklu tlakové reparační došlo k výraznému poklesu tlaku. Na základě provedeného prvního cyklu tlakové reparační a teoretických výpočtů byla stanovena změna objemu vody v úseku, resp.

velikost úniku vody v množství cca 411 l/hod. Tento poměrně velký únik vody lze při „příznivých podmínkách“ (vada situovaná na vrchní části potrubí a relativně suchý terén v lokalitě vady) najít i pochůzkou po trase. Po důkladném provlhlčení terénu v okolí vady po několikanásobném natlakování a následném samovolném odtlakování potrubí plynovodu byla po několika dnech vada nalezena. Po odkopání potrubí v prostoru objeveného prameniště na kraji řepko-



Obr. 8. Fontána v řepkovém poli

vého pole již nebylo nutné místo perforace na potrubí dlouho hledat (obr. 8).

Po odpuštění tlaku byl v poloze 12 nalezen imponující montážní obvodový svar (obr. 9 a 10), na jehož krycí vrstvě svářeč rozhodně nešetřil materiálem. Kořen svaru v místě perforace však nalezen nebyl. Je s podivem, že tento svar trpící na první pohled výraznými nedostatky mohl projít všemi kontrolami prováděnými při výstavbě tohoto plynovodu (B2 dle TPG 702 04) v roce 1997. Pro srovnání – v ČR se tou dobou stavěl plynovod B2 DN 1 000 z Lanžhotu směrem na Horu Svaté Kateřiny, kde se zkoušky prozářením, kromě jiných zkoušek a kontrol, prováděly na všech montážních obvodových svarech.

Následně byla provedena zpětná kontrola výsledků vnitřní inspekce místa, ale ani při důkladné kontrole nebyly zjištěny žádné anomálie v záznamu inteligentního ježka. Toto zjištění znovu potvrdilo dlouhodobé zkušenosti CEPS a.s., že inteligentní ježek typu MFL není schopen na potrubí detekovat vady tohoto typu a rozsahu. Uvedené zkušenosti vycházejí z tlakových reparací po vnitřních inspekcích pomocí ježků MFL na více než 200 km plynovodů a produktovodů. Podruhé byla detekována netěsnost na úseku postaveném v letech 1991–92.

V průběhu prováděné tlakové zkoušky došlo k poklesu tlaku o 2,7 bar v průběhu 24 hod. Tento pokles tlaku představoval únik vody z natlakovaného úseku v množství necelých 6 l/hod. Trasa tohoto zkoušeného úseku v délce 4,6 km vedla z poloviny podmáčeným lesem a z druhé poloviny polem. Na



Obr. 9, 10. Montážní svar s průchozí vadou



žádost provozovatele byl tento úsek rozdělen na 3 podúseky a ty byly opět natlakovány na tlak tlakové zkoušky. Dva úseky byly vyhodnoceny jako těsné, na třetím byla zjištěna netěsnost o velikosti 2,5 l/hod. Zmenšení velikosti úniku vody z potrubí je jev, ke kterému dochází po dělení zkoušeného úseku na podúseky téměř pravidelně. Průchozí místo nebo místa ve stěně potrubí jsou při vysokých tlacích a při takovýchto velikostech úniku velice malá a lidským okem téměř nerozpoznatelná. Při vytlačení vody z potrubí a zpětném napouštění často dochází při průchodu ježka přes inkriminované místo k „přicpání“ nebo někdy i k ucpání průchozího místa částicemi rzi nebo kalu. Na žádost provozovatele byl netěsný úsek rozdělen na další tři podúseky. Při tlakových zkouškách těchto tři podúseků se již žádná netěsnost neprojevila. Průchozí vada byla pravděpodobně zanesena nečistotami, nebo mohla být i vyříznuta při výřezu potrubí v místech dělení na jednotlivé podúseky.

Potrubí po řádně provedené tlakové reparaci lze garantovat jako pevné. Po zprovoznění však bude nutné, aby provozovatel vykonával na uvedeném úseku zvýšený dohled. Tím se v tomto případě rozumí provádění častějších pochůzek po trase plynovodu s detektorem na zjišťování úniku plynu a detekce vad izolace Pearsonovou metodou.

Sušení potrubí

Po provedené tlakové reparaci a po propojení pracovních úseků každého pracovního celku bylo potrubí plynovodu vysušeno na teplotu rosného bodu (TRB) vody ve vzduchu vystupujícím z potrubí $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sušení bylo provedeno pomocí vysoce suchého vzduchu o TRB $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, který byl v množství 1 200 m³ za hodinu vhnán do sušeného potrubí. Zdrojem tohoto vysušeného vzduchu byla mobilní sušící jednotka PSA (obr. 11). V průběhu sušení byla zbylá voda z po-

trubí nejprve vytlačována pomocí lamelových čistících pístů. Následně bylo potrubí vytřeno dosucha molitanovými písty. V obou případech byly písty vždy protlačovány potrubím pomocí vysoce suchého vzduchu o TRB –80 °C. Poslední molitanový píst byl vložen do potrubí při teplotě –20 °C TRB vody ve vzduchu vystupujícím z potrubí. Po projetí tohoto pístu potrubím byl sušený úsek propláchnut ještě minimálně jedním geometrickým množstvím vzduchu o TRB –80 °C a následně předán provozovateli.

Souhrn

Provedením tlakové reparační bylo završeno několikaleté úsilí provozovatele o prokázání integrity potrubí, zajištění dlouhodobého bezpečného provozu a o zvýšení maximálního provozního tlaku v plynovodu. K tomu využil po zpřístupnění plynovodu vnitřní inspekci potrubí inteligentním ježkem, která odhalila velké množství defektů různých stupňů závažnosti. Závažné defekty byly před provedením tlakové reparační vyříznu ty nebo opraveny objímkou.

Tím bylo zajištěno, že defekty na potrubí, které by se zcela jistě v průběhu tlakové reparační projevíly destrukcí, již byly odstraněny nebo byly sanovány pomocí objímek. Vyloučením těchto kritických míst bylo následně možné provést tlakovou reparační ve velice krátkém období 4 měsíců a bez dalších nákladů na její opakování v případě destrukce potrubí. Následná tlaková reparační prověřila vnitřní integritu potrubí s prokázáním maximální míry bezpečnosti provozovaného plynovodu vůči potrubí.

V průběhu tlakové reparační i při tlakování zkušební tělesa došlo přesto k otevření kritické vady (destrukci potrubí) obvodového svaru v místě, kde vnitřní inspekce žádnou vadu nedetekovala.

Kombinace vnitřní inspekce, odstranění zásadních nalezených vad a následné tlakové reparační je nejefektivnější metodou prokázání spolehlivosti vysokotlakých potrubí a zajištění jejich dlouhodobého bezpečného provozu.

Lektorovali:
Ing. Libor Čagala
Ing. Petr Štefl



Ing. Aleš Brynych vystudoval obor chemické a energetické zpracování paliv na VŠCHT Praha. V letech 1993–95 pracoval jako hlavní technolog v tehdejší Plynoprojektu Praha. Následně byl do roku 1999 zaměstnán jako hlavní technolog ve společnosti Český plynárenský servis, spol. s r.o. Od roku 1999 působí ve společnosti CEPS a.s., nejprve jako hlavní technolog a od roku 2003 jako výrobní ředitel.

Literatura:

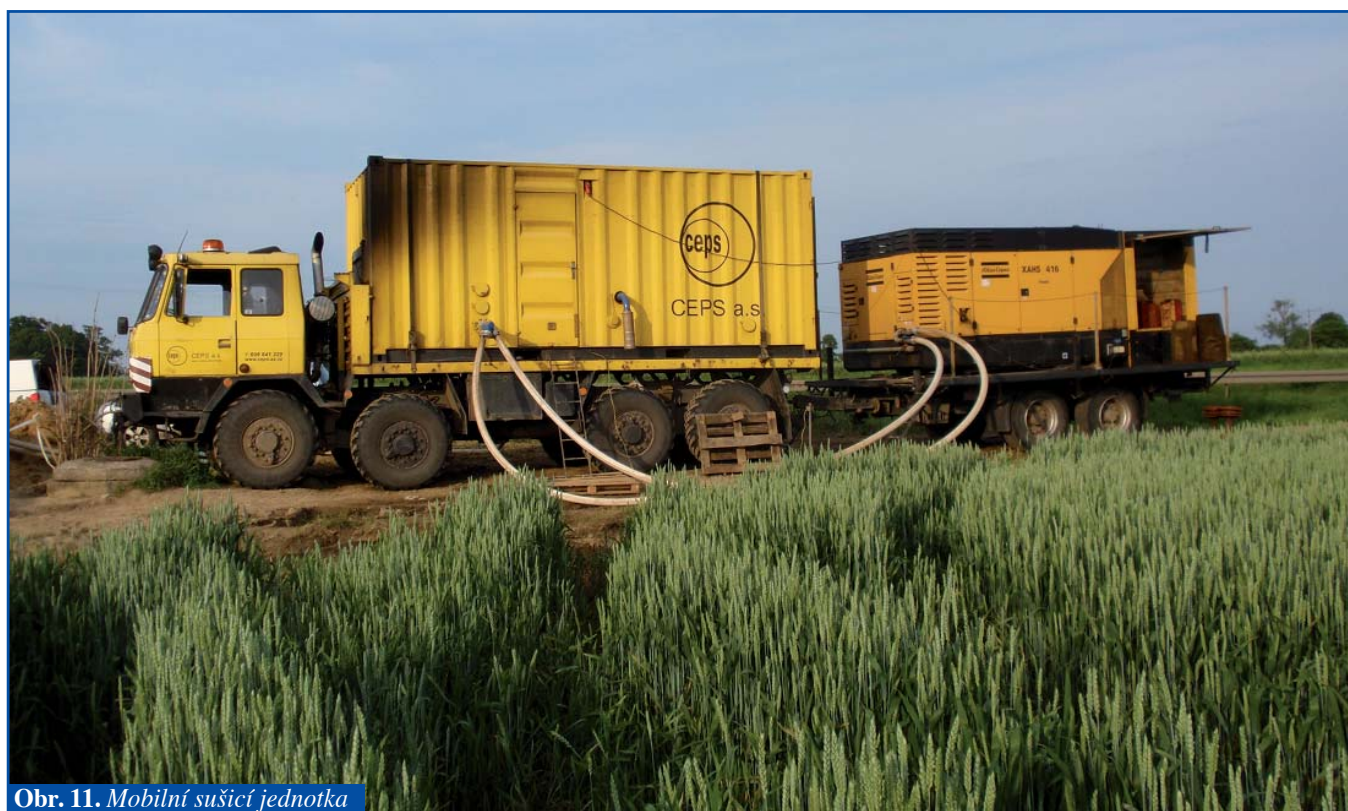
Brynych, A.; Kolář, O.: Hydrotesting of Gas pipeline DN 400, technická zpráva k dokumentaci skutečného provedení, CEPS a.s., 2010

Linhart, V. a kol.: Materiálové zkoušky na dodaném vzorku trubky DN 400, technická zpráva, SVÚM a.s., 2010

SUMMARY

Aleš Brynych:
A Comprehensive Approach to Integrity of a DN 400 High Pressure Pipeline

The gas flow through Polish pipeline systems has been gradually changing from the east-to-west direction to the opposite direction in the last few years. As a consequence, a requirement for the reinforcement of the capacity of transmission gas pipelines has emerged in some Polish regions. The author describes the rehabilitation of a 55 km DN 400 gas pipeline, which ranged from the debottlenecking and cleaning of the pipeline to in-line inspection and tests to pressure-induced repair and drying.



Obr. 11. Mobilní sušič jednotka