

Objímky a jejich „tvrdá realita“ – kompozit vs. ocel na ocelovém potrubí

Sleeves and Their 'Hard Reality': Composite v Steel on Steel Pipes

Ing. Lukáš Pařízek

CEPS a. s.

Email: parizek.lukas@ceps-as.cz

SOUHRN:

Tento článek porovnává dva typy oprav vysokotlakých plynovodů a ropovodů. Prvním typem opravy je ocelová objímka s kompozitní výplní a druhým je kompozitní vinutá objímka složená z tkaniny, která je vyrobená z uhlíkových vláken a sycená epoxidovou pryskyřicí. Obě opravy byly porovnány během tlakování potrubního vzorku DN 500, na kterém byly umělé vady opraveny pomocí těchto objímek. Článek by měl poukázat na to, kdy je kombinování oceli s kompozitními materiály vhodné a kdy naopak může být problematické u prvků, které jsou vystaveny specifickému zatížení, jako například u vysokotlakých potrubí. Experiment byl doplněn softwarovým výpočetním modelem ocelové objímky s kompozitní výplní založeným na metodě konečných prvků.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Potrubí, oprava, ocel vs. kompozit, napětí, deformace

SUMMARY:

The contribution compares two types of repairs of high-pressure gas pipelines and oil pipelines. One is a sleeve made of steel combined with composite filling and the other is a composite sleeve made of carbon fibre and epoxy resin. The two repairs were compared during an experiment in which a DN 500 pipe sample with artificial defects was repaired by those sleeves. Graphs in the article show the circumferential deformation on the defect's surface under each sleeve after pressurisation. The contribution is intended to offer an idea of where combinations of steel and composite materials are or are not appropriate for elements exposed to high loads, such as high-pressure pipelines. An addition to the experiment was a software model of a steel sleeve with composite filling, based on the Finite Element Method.

KEY WORDS:

Pipeline, repair, steel v composite sleeve, stress, deformation

Úvod

Kombinace spolupůsobení oceli robustních průřezů a kompozitu se u vysoce namáhaných prvků používá jen zřídka. Letecký a kosmický průmysl si dovolí kombinovat vysoce namáhané ocelové prvky s kompozitními materiály pouze do určité tloušťky oceli. Při malé tloušťce (1 až 4 mm) kovového konstrukčního prvku z různých slitin se dá kombinovat jeho přetváření v pružné oblasti s kompozitem namáhaným v konkrétním směru, pokud je zajištěno dokonalé kontaktní spojení mezi těmito rozdílnými materiály. Dalším příkladem může být použití kompozitního vyztužení, kde dochází k dostatečné deformaci vyztuženého prvku tak, aby „pocítil“ podporu od kompozitního materiálu. U letadel je jako další příklad vyvedení silových reakcí z ocelového příhradového lože pro motor do celo-kompozitního skeletu letounu. Naproti tomu se dnes v potrubářské praxi dostáváme k použití kompozitního materiálu na ocelovém vysokotlakém potrubí o tloušťkách 6 až 12 mm, kdy jde o skořepinu-membránu, která je relativně velmi robustní. Byla provedena řada experimentů, které se snažily potvrdit přínos kompozitních objímek při opravách vysokotlakých potrubí, nicméně je tomu opravdu tak? Jak účinné je použití kompozitních materiálů na vysoce namáhaném ocelovém potrubí? Bylo načase provést důkladný experiment, kde se prověří skutečná

účinnost kompozitní objímky na vysokotlakém potrubí a porovná se s účinností objímky ocelové.

Předmětem tohoto článku je předání velmi užitečných informací ohledně problematiky účinnosti objímky ocelové, objímky kompozitní a jejich porovnání při použití jejich srovnatelných parametrů. Bezpečnost je vždy na prvním místě a tyto informace by měly být dle mého názoru volně dostupné všem, a to v zájmu nejen provozovatelů, ale i ostatní odborné veřejnosti.

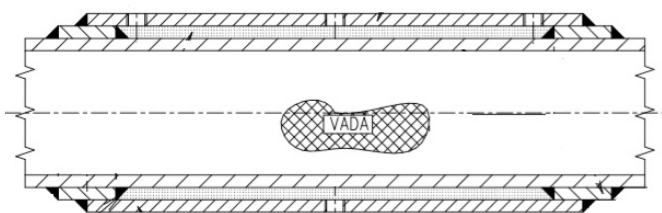
Experimentální práce

V rámci uvedené problematiky jsem se podílel na projektu společnosti SVÚM a.s., kde byl podroben tlakovým zkouškám vzorek potrubí DN 500 o délce 6000 mm, tloušťky 8,0 mm s kompozitní vinutou objímkou a ocelovou objímkou s kompozitní výplní. Potrubní vzorek byl svařen ze dvou třímetrových částí a uzavřen pomocí dvou klenutých den. Každá část o délce 3000 mm měla ve své polovině uměle vytvořené vady, které byly opraveny na jedné části pomocí ocelo-kompozitní objímky a na druhé části kompozitní objímkou. V prostřední části potrubního tělesa mezi objímkami byla vytvořená umělá vada bez objímky.



Obr. 1 Potrubní zkušební těleso $L = 6000 \text{ mm}$, DN 500 s ocelo-kompozitní objímkou a kompozitní vinutou objímkou [1]

Ocelo-kompozitní objímka se skládá z těchto prvků: ocelové podkladní polopásky, ocelového polopláště a kompozitní výplně, která je vtlačena mezi stěnu potrubí a stěnu polopláště přivařených na distančních polopáscích (obr. 2a, 2 b). Zde je nutné uvést, že kompozitní výplň v malé tloušťce přenáší pouze tlakem namáhání na ocelový plášť objímky.



Obr. 2a Schéma ocelo-kompozitní objímky na potrubí [1]
(typ B - přivařeno k potrubí)

Vinutá kompozitní objímka se skládá z tkaniny z uhlíkových vláken, která se při navíjení na potrubí sytí epoxidovou pryskyřicí. Výrobci uvádějí doporučené množství vrstev potřebných k navíutí pro dosažení dostatečné tuhosti objímky. Cílem experimentu bylo, aby se kompozitní objímka co nejlépe přiblížila k teoretické tuhosti objímky ocelové. Z tohoto důvodu musely být uskutečněny tyto kroky:

- Na základě předchozích experimentů spočítat modul pružnosti v tahu určitého počtu vrstev uhlíkové tkaniny sycené epoxidem (předchozí práce SVÚM a.s.).
- Pomocí Hookova zákona spočítat přibližný počet vrstev tak, aby se rovnal, nebo alespoň přiblížil modul pružnosti kompozitu k modulu pružnosti oceli (jako celek/vrstva, ne pouze samostatné uhlíkové vlákno).

Na základě těchto výpočtů bylo rozhodnuto o aplikaci pětinasobku vrstev tkaniny, než uvádí v návodu výrobce. Objímka byla aplikována třemi pracovníky (vyškolení technici) v čistém laboratorním prostředí a rovnoměrnosti navíutí bylo dosaženo otáčením potrubního tělesa kolem jeho podélné osy. Takovýchto dokonalých podmínek není možné v terénu dosáhnout.

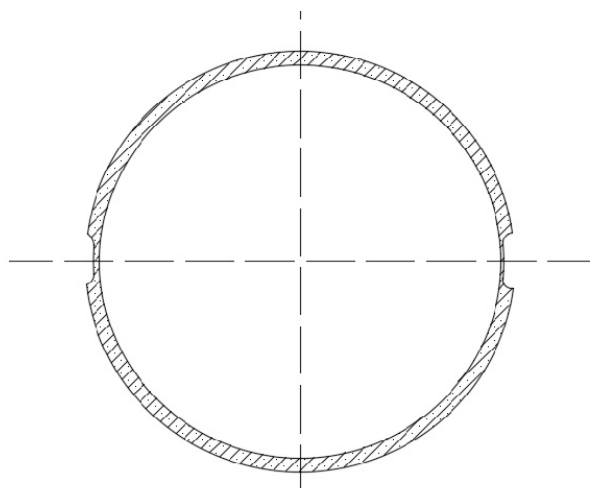


Obr. 2b Ocelová objímka typu A s kompozitní výplní – polopláště s polopáskem na tělese [1]

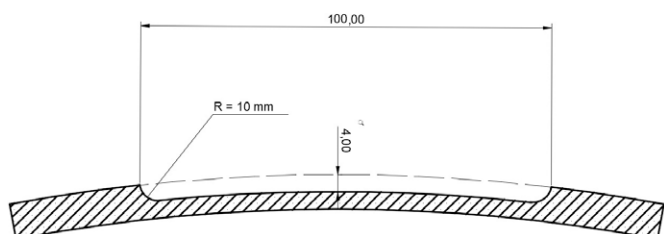


Obr. 3 Vinutá kompozitní objímka s 5x více vrstvami, než uvádí výrobce [1]

Nešlo o žádný nový experiment, ale pouze o velmi důkladnou zkoušku a kontrolu deformačního chování těchto objímek na umělých vadách i na povrchu potrubí pod objímkami a o porovnání dvou odlišných typů oprav potrubí. Na potrubním vzorku byly provedeny shodné vady o průměru 100 mm s hloubkou 50 % a 80 % tloušťky stěny potrubí, které byly opraveny již dříve zmíněnými dvěma typy objímek. Vady byly umístěny v polohách 3.00 hod. a 9.00 hod., viz obr. 4. Pro porovnání deformací byly instalovány tenzometry pod objímkami na povrchu potrubí a přímo ve vadách, dále pak na povrchu tělesa těsně vedle objímek.



Obr. 4 Schématický řez tělesem v místě 50% a 80% vady [1]



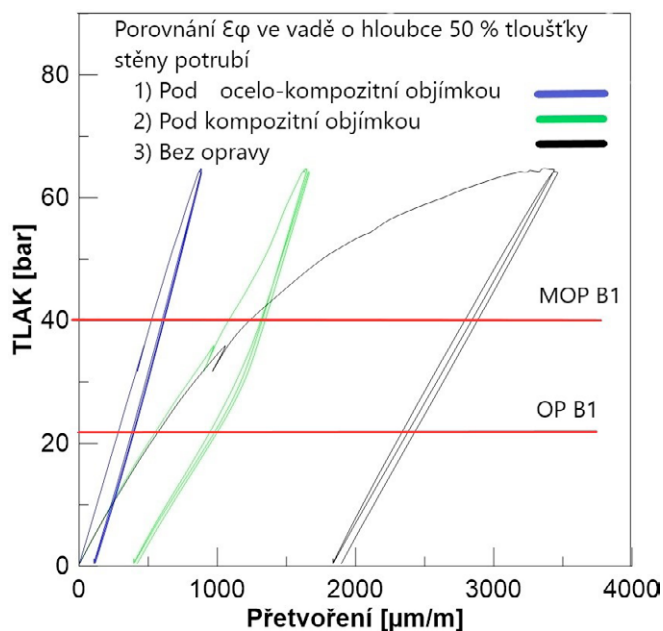
Obr. 5a Schématický řez 50% vadou. Kruhový tvar o průměru 100 mm [1]



Obr. 5b Vybroušená vada na tělese [1]

Potrubní zkušební těleso bylo nejprve tlakováno na vnitřní přetlak 6,4 MPa, dále pak bylo ve stanoveném tlakovém režimu cyklováno a následně tlakováno až do samotné destrukce. Pro srovnání účinnosti obou typů objímků nám postačí pouze první tlakový cyklus a hned bude zřejmé proč.

Pro zjednodušení budeme uvažovat pouze obvodové přetváření ϵ_ϕ vyvolané změnou průměru trubky vlivem vnitřního přetlaku. Můžeme si to představit jako nafukování trubky v radiálním směru.



Obr. 6 Porovnání obvodového přetvoření na vadách o hloubce 50 % tloušťky stěny potrubního tělesa s různými typy oprav a bez opravy

Pozn: Pod kompozitní objímkou zůstává výrazná trvalá plastická deformace po odtlakování. [1]

50% vada – vnitřní přetlak 6,4 MPa (obr. 6) [1]

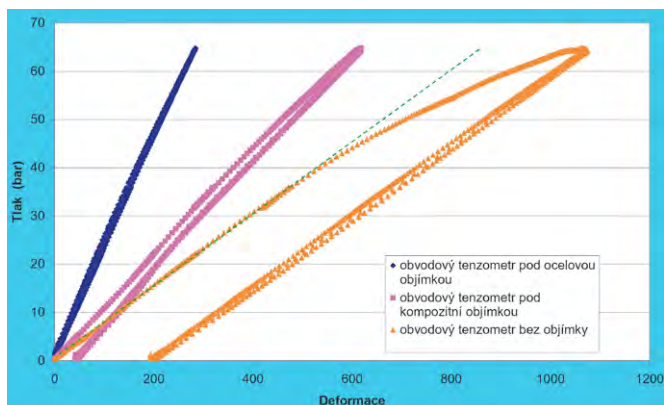
Typ opravy	Poměrná obvodová deformace
Ocelová objímka	0,000879
Kompozitní objímka	0,001624
Vada bez opravy	0,003256

Volný povrch potrubí – vnitřní přetlak 6,4 MPa

Volný povrch	0,001211
--------------	----------

Maximální provozní tlaky VTL potrubí se nejčastěji pohybují v rozmezích tlaku 2,5–6,4 MPa. Na obr. 6 si můžeme všimnout, že ocelové potrubí s kompozitní objímkou až do tlaku cca 3,8 MPa o objímce vlastně skoro vůbec „neví“! Připomínám, že pro experiment jsme na základě předchozích zkoušek společnosti SVÚM použili ověřené moduly pružnosti daného materiálu pro vinutou kompozitní objímku (celé vrstvy kompozitní objímky, nikoliv pouze vláken) a na základě těchto zkoušek jsme použili kompozitní objímku s pětinasobnou tloušťkou vrstev, než uvádějí výrobci resp. dodavatelé těchto objímků. Tímto způsobem jsme se pouze přiblížili k obdobnému součinu tloušťky a modulu pružnosti oceli. Ocel je prostě ocel a velmi dobře se odhaduje její mechanické chování v praxi díky jejím relativně homogenním vlastnostem.

Na obrázku 7 je zobrazena obvodová deformace na povrchu potrubního tělesa mimo vady a je zde vidět velký rozdíl v tuhosti obou objímků.

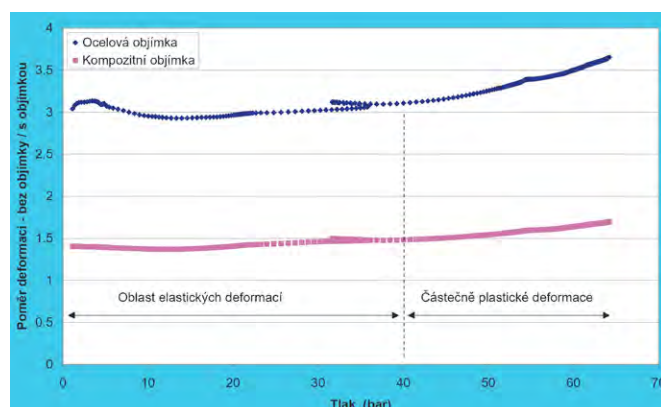


Obr. 7 Porovnání deformací na volném povrchu trubky, pod ocelo-kompozitní objímkou mimo vadu a pod kompozitní objímkou mimo vadu [3]

Pozn. Potrubí bez vady vyztužené kompozitní objímkou zanechává také výraznou trvalou plastickou deformaci po odtlakování.

U kompozitní objímky si můžeme na obrázku 6 dále všimnout „zpevnění“. Jednoduše řečeno, teprve až se vysoko-pevnostní vlákna „dotáhnou“ a postupně natáhnou, srovnají a dotvarují s kompozitní složkou, tak začne kompozitní objímka ve vadě mírně zpomalovat obvodové přetváření potrubí, ale prakticky až v elasto-plastické oblasti. U ocelového potrubí s robustní kompozitní objímkou o podstatně více vrstvách, než v návodu doporučují výrobci, došlo k tomuto zpevnění až po dosažení vnitřního přetlaku cca 3,8 MPa – oblast elasto-plastických deformací v defektu potrubního vzorku. U kompozitní objímky tedy prakticky vůbec nedocházelo k zabránění deformací vady při cyklickém tlakování potrubního vzorku v pružné oblasti namáhání. Důležitá je také informace, že tenzometr ve vadě pod kompozitní objímkou pracuje v obvodovém přetváření téměř identicky s volným povrchem potrubí ve vadě, takže vada pod kompozitní objímkou se chová téměř jako neopravená. Znovu

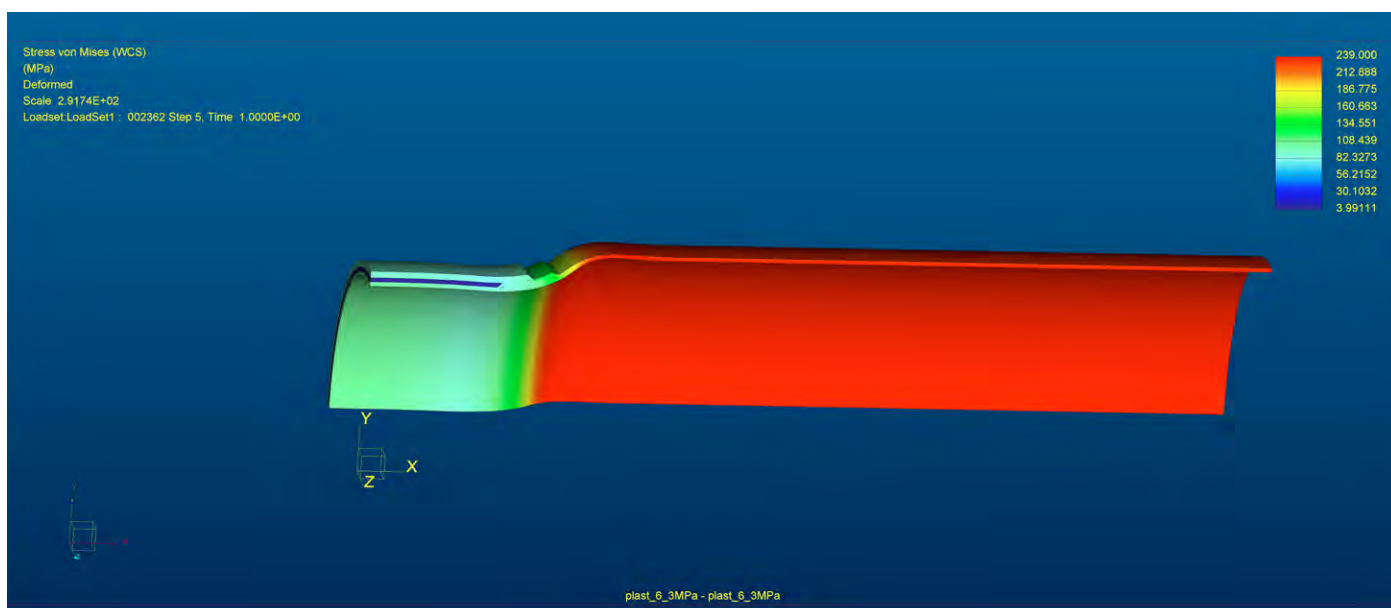
zdůrazňuji, že kompozitní objímku tvořil pětinasobný počet vrstev oproti návodu výrobce. Toto je dokumentováno na obr. 6 zelenou a černou křivkou, které mají téměř shodný úhel k ose x [1].



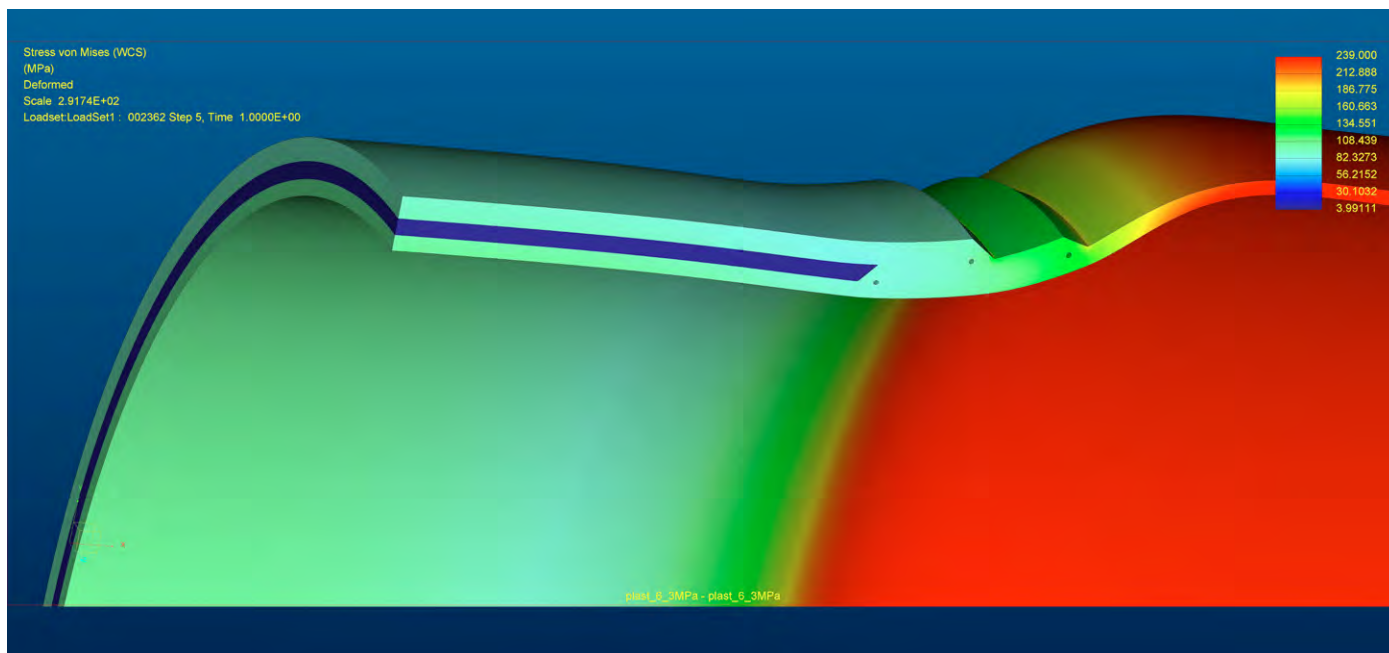
Obr. 8 Poměr tuhostí objímek – vztaženo k trubce bez objímky [3]

Na obr. 8 je celkový poměr deformací pod objímkami, ve vztahu k trubce bez objímky, a to během pružného a pružno-plastického stavu potrubí (obracená hodnota poměru – 1/3). V obou oblastech obvodového přetváření potrubí je ocelová objímka dvojnásobně tužší než kompozitní objímka. Z obrázku 8 vyplývá, že ocelová objímka zvýší únosnost ocelového potrubí třikrát a kompozitní objímka pouze jedenapůlkrát. Stále však platí, že pod kompozitní objímkou se vady chovají za běžných provozních tlaků skoro jako neopravené. Důvodem je nízká tuhost (nižší hodnota modulu pružnosti kompozitního systému) objímky kompozitní.

V pružné oblasti namáhání, tedy i při malých tlacích, mohou růst anebo dokonce vznikat trhliny. Cílem opravy je zastavit šíření trhliny nebo možnost vzniku trhlin, což kompozitní objímka ani s použitými velmi nadstandardními parametry není schopná podchytit včas. Kompozitní objímkou problém



Obr. 9a MKP model potrubního vzorku s ocelo-kompozitní objímkou v programu CREO [1]



Obr. 9b MKP analýza potrubního vzorku s ocelo-kompozitní objímkou

Pozn. Obvodová deformace na obrázku je pro ilustraci výrazně zvětšená. [1]

„skryjeme“, ale pouze dočasně. Pokud existuje v potrubí potenciální zdroj trhliny (vrub), a tím může být vryp, odseknutí převalok, nebo jiné mechanické poškození, které má vždy u ostrých přechodů v materiálu velký potenciál pro vznik a šíření trhliny, tak potřebujeme opravu dostatečně tuhou, aby se potrubí „nafukovalo“ pružně co nejméně. Tím, že se zabrání i malému obvodovému „nafukování“ potrubí, tak dostatečně zabráníme vzniku a růstu nebezpečných vad, které mohou mít katastrofální dopady.

Softwarový model ocelo-kompozitní objímký

Experiment jsem doplnil modelem na principu Metody konečných prvků (MKP) v programu CREO, který potvrdil deformační a napjatostní chování ocelové objímký s kompozitní výplní během experimentu. Pro vytvoření modelu založeného na MKP u vícevrstvého vinutého kompozitního materiálu se mi však prozatím nepodařilo najít vhodné softwarové řešení, které by se alespoň z části přiblížilo výsledkům skutečného experimentu.

Závěr

U technických zařízení bychom se měli často vracet zpět na cestu technicky správnou a nenechávat se svést marketingem 21. století. Patřím k mladší generaci inženýrů, a proto věřím v lidský pokrok a budu mu i nadále fandit, nicméně existují i odvětví, kde je prozatím bezpečnější zůstat u poznatků, které máme již řadu let ověřeny. Ne každá inovace totiž nabízí lepší technické, respektive bezpečné řešení. Kdyby Vám aerolinky nabízely let novým částečně vyzkoušeným letadlem za nižší cenu a letadlem dávno vyzkoušeným za cenu vyšší, věřím, že si také vyberete dražší bezpečnější variantu. V letectví je naopak využití

kompozitních materiálů z hlediska váhy vítáno a spolupůsobení kompozitních materiálů s tenkostěnnými ocelovými prvky funguje velmi spolehlivě již řadu let, nicméně před uvedením do provozu proběhlo mnoho experimentálních studií a výpočtů. Použití kompozitních materiálů je vítáno také v řadě dalších oborů, jako jsou například stavební průmysl, strojírenský, chemický apd. Vždy před uvedením takového materiálu do provozu byly uskutečněny odborné studie a experimentální práce na daný příklad použité.

Popsaný experiment prokázal, že současné vinuté kompozitní objímký jsou podstatně méně účinné než objímký ocelové, a to i při značném předimenzování oproti návodu výrobců a při aplikaci v ideálních podmínkách. Kompozitní objímký jsou vhodné na oblouky, připojky, nebo jiné tvarové kusy ve chvíli, kdy dočasně chceme zabránit havárii, nikoliv jako trvalé řešení problému, a kdy vady jsou podobného charakteru jako u experimentu – plynulý přechod úbytku materiálu bez vrubů. Pro vady typu trhliny a vady s ostrými přechody v materiálu jsou kompozitní objímký nevhodné.

Literatura

- [1] Diplomová práce „Analýza oprav vysokotlakých potrubí pomocí objímek“, Bc. Lukáš Pařízek, 2018
- [2] Technická zpráva „SBC sleeve, System description“, Ing. Martin Stukbauer, Ing. Petr Pařízek, 2017, CEPS a.s.
- [3] „Opravy vysokotlakých plynovodů dvěma různými typy objímek a hodnocení jejich účinnosti“, Ing. Ivo Černý, Ph.D., Ing. Jan Kec, SVÚM a.s. Konference: Bezpečnost, spolehlivost a provozování plynárenské soustavy 2020
- [4] „Porovnání ochranného účinku polymerních a ocelových objímek u vysokotlakého potrubí s vadami“. Ing. Václav

- Linhart, CSc., SVÚM Praha, Ing. Romana Pavelková, NET4GAS, s.r.o.
- [5] „Steel sleeves vs composite materials for pipeline repair“ a comparison, William A Bruce and William E Amend, Fixing pipeline problems Conference, October 2010, Berlin
- [6] „Effective repair of defects in pipelines“, Markus Rieder, Robert Müller, Hans-Joachim de la Camp, 3R – Special 1, 2017
- [7] „Polymer Composites in Aviation Sector A Brief Review Article“, Shivi Kesarwani, June 2017, published online
- [8] Linhart, V.; Pavelková, R.: „K ochrannému účinku objímk na únosnost vysokotlakých potrubí.“ Plyn, XCIV, r. 2014, č. 4, str. 81–89



Ing. Lukáš Pařízek (*1990)

V roce 2019 absolvoval na ČVUT Fakultě stavební katedru dopravní stavby a konstrukce, diplomová práce na téma „Analýza oprav vysokotlakých potrubí pomocí objímk“. Od roku 2018 působí jako projektový manažer a inženýr ve firmě CEPS a.s. Je technologem vysokopevnostních objímk. Mimo jiné je reprezentantem ČR v letecké akrobacii.