

Detekce vad v super-duplexních nerezových trubkách používaných pro průzkum ropy a zemního plynu metodou vířivých proudů

Marie BOHACOVA

INDETEC ndt, Chomutov, Czech Republic
Phone: +420 474 651820, Fax: +420 474 651820; e-mail: info@indetec.cz

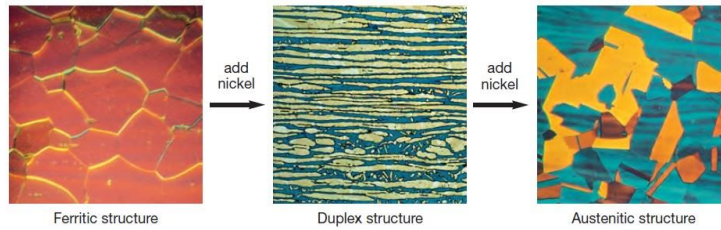
Abstrakt

Široké použití ocelových slitin pro trubky vyžaduje důslednou kontrolu během výroby a provozu. Trubky pro různé aplikace mohou být vyrobeny z různých slitin ocelí. Trubky Sandvik SAF 2507 jsou vyrobeny ze super duplexní (austeniticko-feritické) nerezové ocele. Sandvik Chomutov trubky se používají pro podmořskou těžbu ropy a zemního plynu jako vysokotlaké potrubí pro přepravu hydraulických kapalin. Pro zajištění vysoké kvality a snížení nákladů při výrobě je důležité odhalit necelistvosti na vnitřním povrchu vstupního materiálu (trubek lisovaných za tepla) před uvolněním ke konečnému zpracování za studena. Mezi vady, které mají být odhaleny, patří zejména promáčknutí, dutiny, trhliny, praskliny a nekovové inkluze (zbytky skla). Metoda vířivých proudů je neodmyslitelnou součástí nedestruktivního zkoušení a patří mezi hlavní metody používané ke kontrole trubek. K zajištění detekce těchto vad bylo třeba vyvinout speciální sondu vířivých proudů, která je schopna odhalit mělké necelistvosti v magnetickém materiálu.

Klíčová slova: Nedestruktivní zkoušení, vířivé proudy, trubka, nerezová ocel, vada

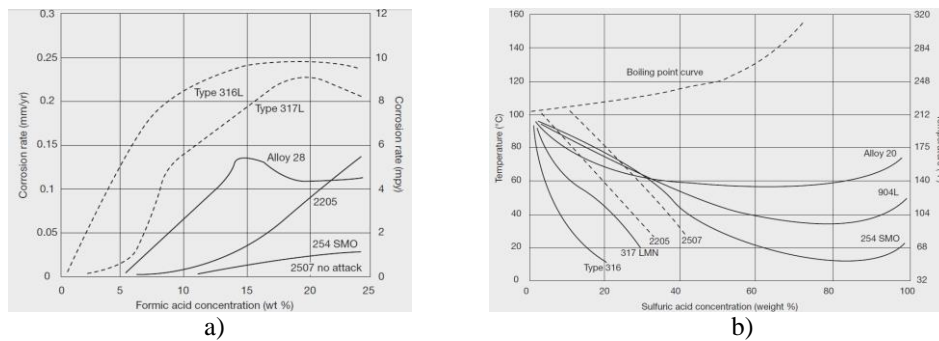
1. Úvod

Duplexní nerezová ocel je dvoufázová ocel, jejíž fáze jsou tvořeny austenitem a feritem (viz Obr. 1). Obecně je známo, že příznivých vlastností ocele lze dosáhnout při rovnováze obou fází v rozsahu 30 až 70% feritu a austenitu. Častěji se však vyskytují duplexní ocele s přibližně stejným množstvím obou fází, přičemž v komerčním využití se více zvýhodňuje austenit. Mezi hlavní legující prvky patří chrom, molybden, dusík a nikl. K dosažení optimální a stabilní struktury je nutné dodržovat správné množství těchto prvků, jelikož ovlivňují výsledné mechanické, fyzikální i korozní vlastnosti duplexní ocele. Obsah chromu v duplexní oceli zajišťuje odolnost vůči korozi. Čím je jeho podíl vyšší, tím se korozivzdornost zvyšuje. Jedná se o feritotvorný prvek a jeho množství se pohybuje okolo 20%. Ovšem vyšší podíl chromu znamená vyšší podíl niklu, který je nutný pro vytvoření austenitické nebo duplexní struktury. Vyšší množství chromu také zajišťuje lepší formování intermetalických fází a odolnost vůči oxidům při zvýšené teplotě. Přidáním molybdenu do duplexní ocele se zvyšuje odolnost vůči důlkové a štěrbinové korozi. Jedná se též o feritotvorný prvek a jeho množství obvykle nepřevyšuje 4%. Dusík stejně jako molybden zvyšuje odolnost vůči důlkové a štěrbinové korozi. Přidává se do duplexních ocelí, které obsahují vysoké množství chromu a molybdenu, aby se zabránilo vylučování tzv. sigma fáze. Dusík je silně austenitotvorný prvek a do duplexní ocele se přidává pro dosažení požadované rovnováhy fází. Legující prvek nikl je austenitotvorný prvek, tzv. stabilizátor, který umožňuje změnu krystalové mřížky z prostorově středěné krychlové (feritová) na plošně středěnou krychlovou (austenitová). Jeho množství v duplexní oceli se pohybuje v rozmezí 1,5 až 7% a zvyšuje její houževnatost.



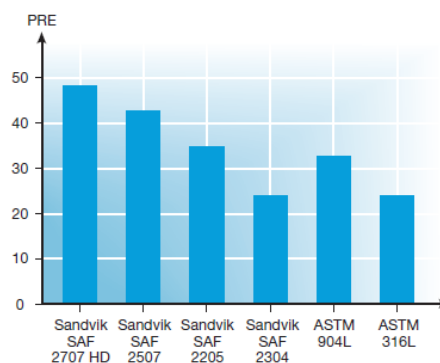
Obr. 1 Změna mikrostruktury zvyšováním podílu niklu v nerezové oceli [1]

Největší předností duplexních nerezových ocelí je tedy jejich odolnost vůči různým typům koroze v různých prostředích. Odolnost proti organickým a anorganickým kyselinám (viz Obr. 2) může být srovnatelná nebo dokonce lepší než u vysoce legované austenitické nerezové oceli v určitých rozmezích koncentrace. Obrázek 2a) ukazuje, že u duplexní nerezové ocele 2507 nedochází k žádnému narušení struktury ocele. Z obrázku 2b) je patrné, že duplexní nerezová ocel 2507 jednoznačně překonává odolnost austenitických ocelí s vysokým obsahem niklu vůči roztokům obsahujících až 15% kyseliny a též vykazuje lepší odolnost než typy 316 a 317 [1].



Obr. 2 Zobrazení korozních křivek duplexních a austenitických nerezových ocelí a) ve vroucí směsi 50% kyseliny octové b) v neprovzdušněné kyselině sírové, korozní diagram 0,1 mm/rok [1]

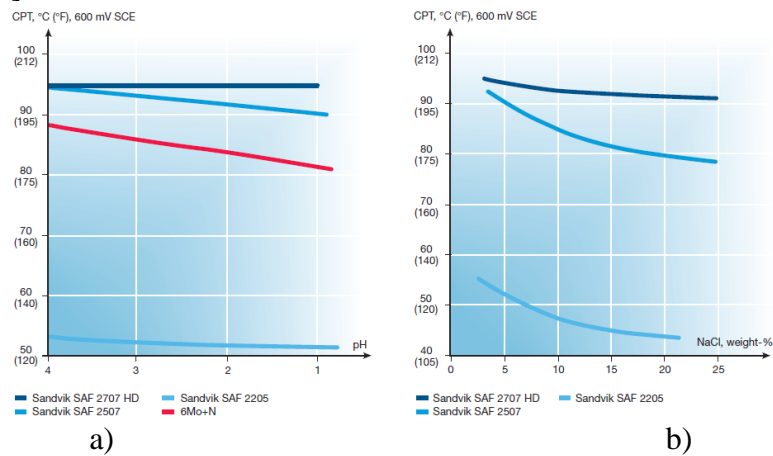
Odolnost proti žíravinám zajišťuje vysoký obsah chromu a přítomnost feritu. Odolnost vůči důlkové a štěrbinové korozi je určena především obsahem chromu, molybdenu a dusíku. Ukazatel této odolnosti se značí PRE (ekvivalentem odolnosti proti důlkové korozi). U duplexních nerezových ocelí je hodnota PRE závislá na obou fázích, tedy feritové i austenitické. Na Obr. 3 jsou zobrazeny minimální hodnoty PRE pro duplexní nerezové ocele.



Obr. 3 Minimální hodnoty PRE duplexních nerezových ocelí a dalších jiných slitin [2]

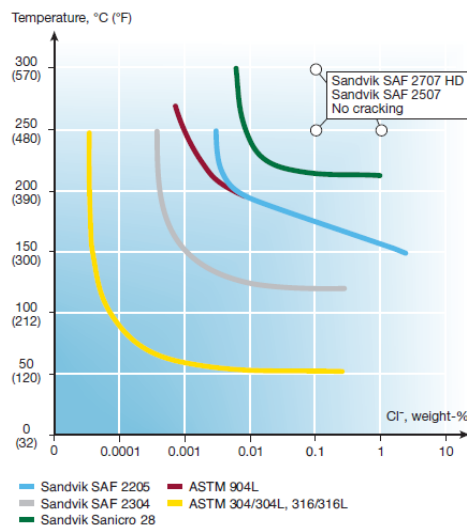
Hodnoty PRE lze tedy použít k predikci chování slitiny v chloridovém prostředí. Dalším ukazatel je kritická teplota důlkové koroze CPT. Kritickou teplotu lze stanovit elektromagnetickými metodami. Tyto teploty byly stanoveny v roztocích chloridu sodného s potenciálem 600 mV vztaženého ke kalomelové elektrodě (SCE). Jedná se o velmi vysokou

hodnotu srovnatelnou s hodnotou vyskytující se v chlorované mořské vodě. Na Obr. 4 jsou vyobrazeny kritické teploty důlkové koroze CPT pro jednotlivé duplexní a super duplexní nerezové ocele [2].



Obr. 4 a) Kritické teploty důlkové koroze CPT a) pro Sandvik SAF 2707 HD, SAF 2507 a SAF 2205 v 3% roztoku NaCl s různým pH na 600 mV SCE, b) pro Sandvik SAF 2707 HD, SAF 2507 a SAF 2205 v různých koncentracích NaCl na 600 mV SCE při neutrálním pH [2]

Mezi další korozní odolnost patří odolnost vůči koroznímu praskání (SCC). Duplexní oceli jsou v roztocích chloridu odolnější než například austenitické oceli ASTM 304L a 316 při teplotách nad 60°C. Toto lze pozorovat na Obr. 5.



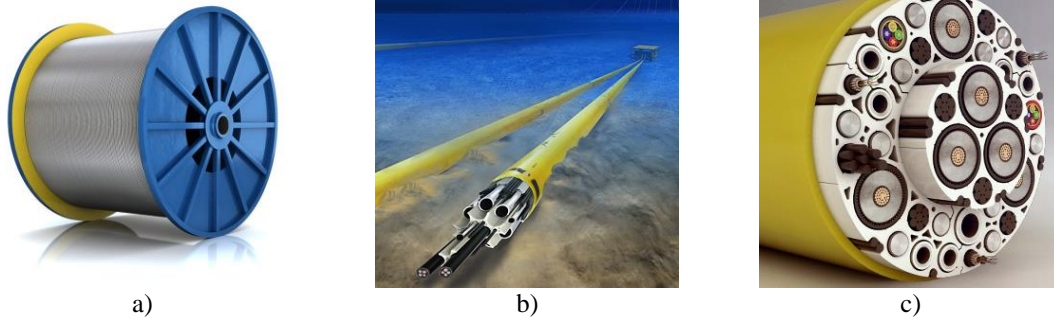
Obr. 5 Napětí-ová koroznímu praskání (SCC) pro materiály Sandvik SAF 2707 HD, SAF 2507, SAF 2205 a SAF 2304 v neutrálním roztoku chloridu [2]

Trubky ze super duplexní nerezové ocele pod označením 2507 a komerčním označením Sandvik SAF 2507 jsou charakterizovány výbornou odolností vůči koroznímu praskání (SCC) v agresivním prostředí obsahující chlorid a proti důlkové, štěrbinové a únavové korozi. Vyznačují se vysokou mechanickou pevností, fyzikálními vlastnostmi, které nabízejí designové výhody a dobrou svařitelností. Chemické složení SAF 2507 je popsáno v následující tabulce.

Tab. 1 Chemické složení (nominální) v % [3]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
≤ 0.030	≤ 0.8	≤ 1.2	≤ 0.035	≤ 0.015	25	7	4	0.3

Z této super duplexní nerezové oceli lze vyrábět nejen bežešvé a svařované trubky a potrubí, ale i výkovky, příruby, elektrody, svařovací dráty a tyče, desky, plechy, tyčové ocele, výkovky a odlitky. Mezi typické aplikace těchto trubek patří průzkum ropy a zemního plynu v prostředí obsahující chlorid. Jedná se zejména o mořskou vodu, kde se trubky používají pro podmořskou těžbu ropy a zemního plynu jako vysokotlaké potrubí pro přepravu hydraulických kapalin (viz Obr. 6). Další využití této super duplexní nerezové oceli se nachází u systémů využívající chlazení mořskou vodou a odpařování soli, u různých odsolovacích zařízení, u geotermálních studen, při rafinaci ropy, v petrochemii, při zpracování buničiny a výroby papíru, při chemickém zpracování a pro mechanické komponenty, které vyžadují vysokou pevnost.



Obr. 6 a) Cívka navinutého potrubí [4], b) potrubí na mořském dně [5], c) řez potrubím [6]

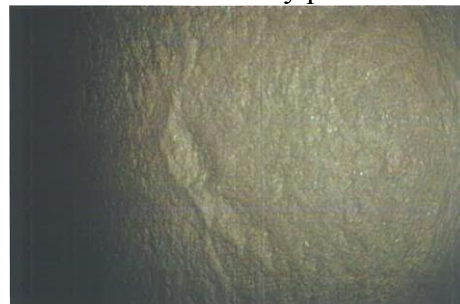
2. Cíl práce

Hlavním úkolem, který byl zadán firmou Sandvik Chomutov, je odhalení nedokonalosti na vnitřním povrchu trubek válcovaných za tepla pro uvolnění ke konečnému zpracování za studena. Mezi vady, které mají být odhaleny, patří zejména promáčknutí, dutiny, trhliny, praskliny a nekovové inkluze (zbytky skla). Třináct trubek o rozměrech $\text{Ø}73 \times 8 \text{ mm}$ a $\text{Ø}73 \times 9 \text{ mm}$ byly podrobeny vizuální a ultrazvukové kontrole. Vizuální kontrola indikovala několik nedokonalostí. Jednalo se zejména o prohlubně a lineární vady (viz Obr. 7 a Obr. 8). Pomocí ultrazvuku byly registrovány indikace pouze u 4 vzorků. Tyto 4 vzorky byly předány ke kontrole pomocí metody vířivých proudů. Pro zajištění detekce těchto vad bylo třeba vyvinout speciální sondu vířivých proudů, která je schopna odhalit velmi mělké necelistvosti.

Vzorek 1 – prohlubeň



Vzorek 2 – zvrásněný povrch



Obr. 7 Indikace zjištěné vizuální kontrolou pomocí videoskopu – vzorek 1 a 2 [7]

Vzorek 3 – prohlubeň



Vzorek 4 – přítomnost skla



Obr. 8 Indikace zjištěné vizuální kontrolou pomocí videoskopu – vzorek 3 a 4 [7]

3. Návrh sondy vířivých proudů

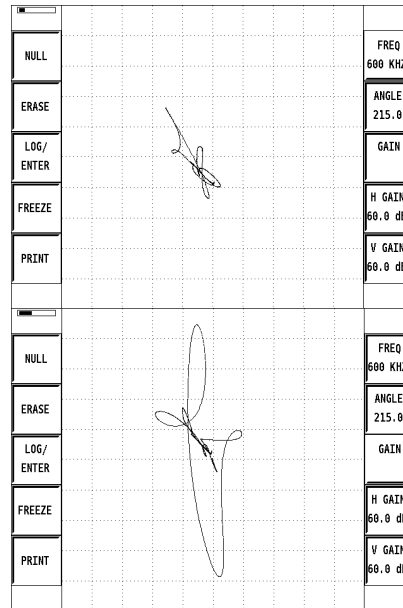
Kontrolu feromagnetických trubek lze vykonávat pomocí různých technik zkoušení. V praxi se nejvíce využívá těchto tří technik. Pomocí vnější průchozí cívky s přidavnou magnetizací, vnitřní průchozí cívky s předmagnetizací, tzv. BIAS sondy nebo rotační sondy. Vzhledem k chemickému složení a struktuře super duplexních ocelí je tato kontrola nesnadná, jelikož při pohybu sondou v trubce vzniká šum ze struktury. Příčinou tohoto šumu je feromagnetická složka, která zásadním způsobem ovlivňuje výsledek kontroly. Tento šum lze částečně eliminovat magnetizací trubky, nicméně pro praktické účely je tento způsob finančně i časově náročnější než v případě použití sondy bez předmagnetizace.

Jelikož základním požadavkem bylo vyvinout sondu za rozumné finanční náklady na vývoj a kontrolu, která bude schopna detekovat mělké povrchové vady na vnitřním povrchu, byla zvolena rotační technika kontroly. Speciální rotační sonda se skládá z multidiferenční cívky o velikosti $\varnothing 1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$. Sonda pracuje v rozsahu frekvencí od 250 kHz do 1 MHz. Jedná se o snímač s potlačeným lift-offem. Zkušební přípravek pro ruční zkoušení nesoucí snímač je vyobrazen na Obr. 9.

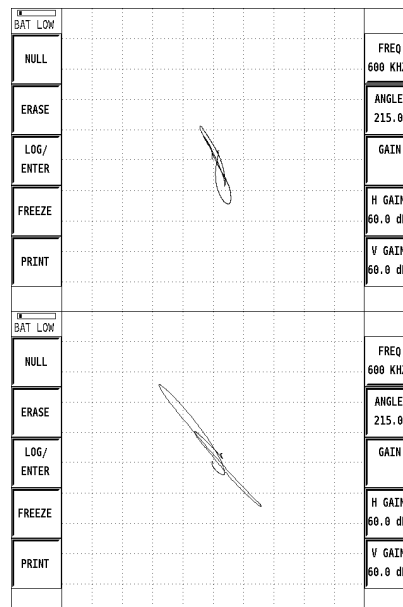
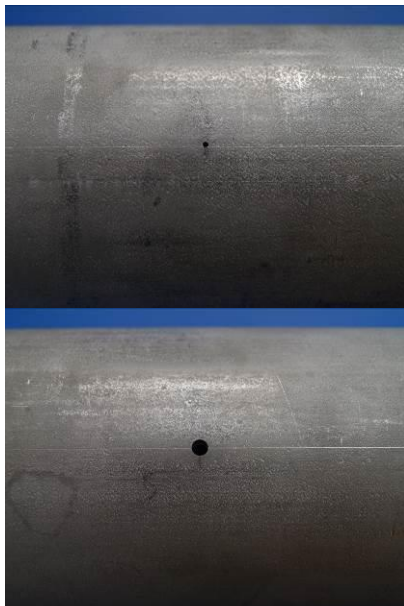


Obr. 9 Ruční zkušební přípravek se snímačem

Nastavení parametrů pro kontrolu dodaných zkušebních vzorků bylo provedeno na referenčním vzorku (viz Obr. 10), který je vyroben ze stejné super duplexní nerezové oceli SAF 2507. Rozměry trubky jsou 63,5 x 5,5 mm. Vzorek obsahuje dvě drážky podélnou a příčnou o rozměrech 0,275 x 1 x 12,5 mm (D x W x L). Jednotlivé odezvy vířivých proudů na drážky jsou vyobrazeny na Obr. 10 vpravo. Druhý referenční vzorek obsahoval otvory se 100 % úbytkem materiálu. Tloušťka trubky je 5,5 mm. Nastavení parametrů bylo provedeno na dvou otvorech průměru 1 mm a 3 mm. Jednotlivé odezvy vířivých proudů na otvory jsou vyobrazeny na Obr. 11 vpravo.



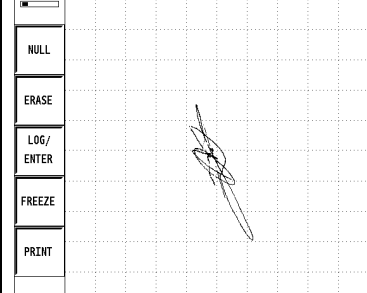
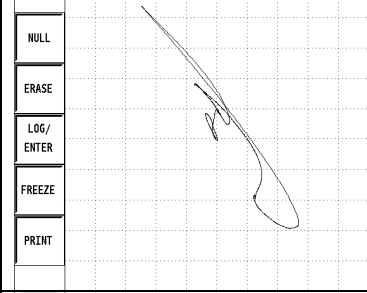
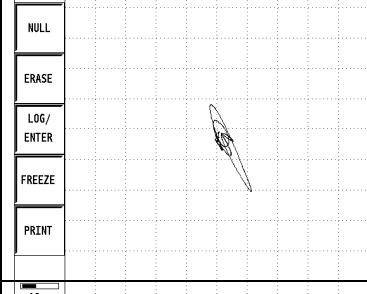
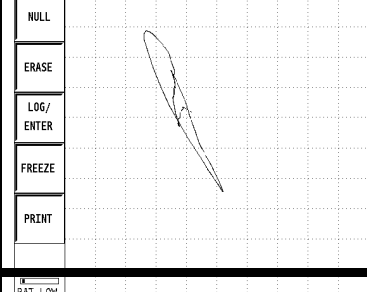
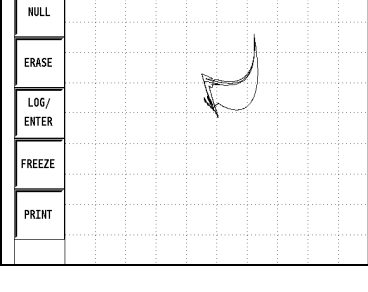
Obr. 10 Referenční vzorek s drážkami – příčná (nahore), podélná (dole)

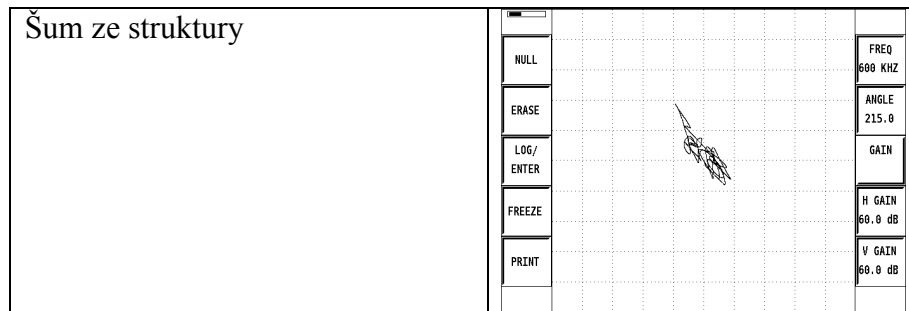


Obr. 11 Referenční vzorek s otvory skrz

Jednotlivé odezvy vířivých proudů na necelistvosti vyskytující se ve vzorcích 1 až 4 jsou vyobrazeny v Tab. 2. Téměř u všech necelistvostí je odstup signálu od šumu minimálně 2:1 nebo i lepší. Pouze u vzorku 3 není odezva příliš výrazná a při automatickém zkoušení by byla z největší pravděpodobností rotačním systémem přehlédnuta.

Tab. 2 Odezvy vířivých proudů na necelistvosti v trubkách ze super duplexní ocele SAF 2507

Název vzorku	Typ necelistvosti	Odezva vířivých proudů	
Vzorek 1	Prohlubeň		FREQ 600 KHZ ANGLE 215.0 GAIN H GAIN 60.0 dB V GAIN 60.0 dB
Vzorek 2	Zvrásnění povrchu		FREQ 600 KHZ ANGLE 215.0 GAIN H GAIN 60.0 dB V GAIN 60.0 dB
Vzorek 3	Prohlubeň		FREQ 600 KHZ ANGLE 215.0 GAIN H GAIN 60.0 dB V GAIN 60.0 dB
Vzorek 4	Přítomnost skla		FREQ 600 KHZ ANGLE 215.0 GAIN H GAIN 60.0 dB V GAIN 60.0 dB
Lift -off			FREQ 600 KHZ ANGLE 215.0 GAIN H GAIN 60.0 dB V GAIN 60.0 dB



4. Shrnutí

Super duplexní trubky SAF 2507 z nerezové oceli vykazují výbornou odolnost proti různým typům koroze (důlková, štěrbinová, únavová, korozní praskání) ve vysoce agresivním prostředí s vysokým obsahem chloridů jako je např. mořská voda. Tyto trubky se využívají ve vysokotlakém potrubí pro přepravu hydraulických kapalin při podmořské těžbě ropy a zemního plynu. Cílem bylo navrhnout spolehlivý systém kontroly, který by byl schopen odhalit necelistvosti při lisování trubek za tepla již ve výrobě. Mezi obávané necelistvosti patří zejména nekovové inkluze v podobě skla, které se využívá jako mazivo při lisování. Při nedostatečném odstranění skla dochází k vytváření prohlubní, které při konečném zpracování za studena mohou vytvořit dlouhé podélné defekty. Cíle bylo dosaženo. Byla navržena ruční rotační sonda, která je schopna spolehlivě detekovat necelistvosti na vnitřním povrchu trubky. Téměř ve všech případech bylo dosaženo dobrého odstupu signálu od šumu. Lze předpokládat, že tento odstup signál/šum se zlepší použitím filtrů při automatizovaném vysokootáčkovém rotačním pohybu sondy po vnitřním povrchu trubky, což se stává dalším úkolem do budoucna.

Použitá literatura

- [1] STAINLESS], [prepared by TMR. *Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels*. 2nd ed. London: International Molybdenum Association, 2009. ISBN 978-190-7470-004.
- [2] SANDVIK. *Sandvik duplex stainless steels*. 2009, 20 s. Dostupné z: http://www.smt.sandvik.com/Global/Downloads/Products_downloads/tubular-products/S-120-ENG_10.pdf
- [3] SANDVIK. *Datasheet: Sandvik SAF 2507*. 2013, 14 s. Dostupné z: <http://www.smt.sandvik.com/cz/centrum-material/materialove-listy/tube-and-pipe-seamless/sandvik-saf-2507/>
- [4] Umbilical tubes. SANDVIK. *Sandvik Materials Technology* [online]. 2014 [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: <http://www.smt.sandvik.com/en/products/tube-pipe-fittings-and-flanges/tubular-products/umbilical-tubes/>
- [5] Umbilical contract awarded to Aker Solutions. *Aker Solutions* [online]. 2011 [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: <http://www.akersolutions.com/en/Global-menu/Media/Press-Releases/All/2011/Umbilical-contract-awarded-to-Aker-Solutions/>
- [6] Power umbilical and HV subsea cables. *Aker Solutions* [online]. 2014 [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: <http://www.akersolutions.com/en/Global-menu/Products-and-Services/Subsea-technologies-and-services/Subsea-production-systems-and-technologies/Umbilicals-and-power-cables/Power-umbilicals-and-HV-subsea-cables/>
- [7] ŠTEMBERK, Jiří a Tomáš JUHAS. NDT SERVIS. *Protokol o defektoskopické kontrole*. Chomutov, 2014, 4 s.