



MAGISTRALINIO DUJOTIEKIO MECHANINIŲ PAŽEIDIMŲ ĮTAKA SAUGIAM EKSPLOATAVIMUI

Tadas VILKYS¹, Vitalijus RUDZINSKAS²

Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas: ¹tadas.vilkys@gmail.com; ²vitalijus.rudzinskas@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjama magistralinių dujotiekių mechaninių pažeidimų įtaka saugiam jų eksploatavimui. Darbe pateikti pagrindiniai vamzdynų pažeidimo tipai su jiems būdingais bruožais ir įtaka eksploataciniams parametrams. Ištirta magistralinio dujotiekio Kaunas – Kaliningradas dalis, kuri buvo pašalinta, kaip nebetinkama naudojimui. Tyrimams pasitelktas kietumo ir mikrokietumo matavimas, cheminės analizės tyrimas, smūginio tašumo bandymas. Mikrostruktūros tyrimams naudotas optinis mikroskopas. Tiriamasis objektas buvo atkurtas kompiuterinės programos, veikiančios baigtinių elementų metodu, ANSYS erdvėje.

Reikšminiai žodžiai: defektas, dujotiekis, įlenkimas, išskaptavimas, liekamasis resursas, mechaniniai pažeidimai, vamzdynas.

Įvadas

Magistralinių dujotiekių tinklas Lietuvoje gerai išvystytas ir nuolat tobulinamas. Dalis magistralinių dujotiekių sistemos įrengta dar Lietuvai priklausant Sovietų Sąjungai. Taigi kai kurie vamzdynai skaičiuoja ne vieną ir ne dvi dešimtis metų. Dėl šios priežasties ir kyla daugybė problemų. Prieš tiek laiko sumontuoti vamzdynai gali būti įvairios būklės: nuo idealios iki kritinės. Darbų kokybė ir kontrolė tais laikais buvo žemo lygio. Dėl šių priežasčių darbe nagrinėjama problema yra aktuali. Nesant pakankamos darbų kokybės kontrolės, mechanškai pažeisti vamzdynai buvo klojami po žeme ir leista juos eksploatuoti. Prabėgus tam tikram laikui, vamzdynus iš vidaus tikrinant tam tikra diagnostine įranga, pavyzdžiui, atliekant išmaniąją vamzdyno vidaus defektoskopiją (*angl.* intelligent pigging), kai vamzdyno viduje keliaujantis robotas valo ir tiria esamą jo būklę, aptinkamas mechaninis pažeidimas, kuris kartais net trukdo toliau robotui praeiti vamzdynu.

Radus pažeidimą, kuriam būdinga plastinė deformacija su (be) sienelės suplonėjimu, būtina priimti sprendimus dėl tolimesnės vamzdyno eksploatacijos. Esant dideliems kaštams, norint sustabdyti ir pakeisti pažeistą magistralinio dujotiekio liniją, geriau tiksliai įvertinti pažeidimo lygį ir tada priimti sprendimą. Būtent tokios metodikos Lietuvos dujų ūkį eksploatuojančiose įmonėse ir nėra.

Mechaniniai pažeidimai yra vienareikšmiškai dažniausia vamzdynų avarijų priežastis (Cosham, Hopkins 2004).

1 lentelė. Europos dujotiekių avarijų priežastys procentais (Allouti *et al.* 2013)

Table 1. Gas pipelines accidents causes in Europe (Allouti *et al.* 2013)

Išoriniai pažeidimai	Gamykliniai defektai	Korozija	Grunto poslinkiai	Seisminiai pokyčiai	Kitos priežastys
49,6 %	16,5 %	15,3 %	7,3 %	4,6 %	6,7 %

Pirmoje lentelėje pateikiamos Europos dujotiekių avarijų priežastys. Esant tokiam avarijų dėl mechaninių pažeidimų masiškumui, dujotiekius prižiūrinčios kompanijos dažnai nelinkusios taikyti visuotinai nepriimtinių metodikų ir remontuoja juos visus be išsamesnių tyrimų, neatsižvelgdamos į ekonominius aspektus.

Darbe ištirta vamzdžio dalis, kuri buvo pašalinta kaip neatitinkanti eksploatacinių parametru, dėl mechaninių pažeidimų, esančių paviršiuje. Tikslas buvo išsiaiškinti realią tokio defekto įtaką normaliam vamzdyno darbui.

Plieno markė 17G2SF (pagal GOST). Jo takumo riba R_T lygi 360 MPa, o stiprumo R_e – 500 MPa.

Defektų tipai ir parametrai

2003 metais buvo išleista „Vamzdynų pažeidimų įvertinimo instrukcija“ (*angl.* Pipelines defects assesment manual), kurią užsakė 16 dujų ir naftos tarptautinių kompanijų („BP“,

„Gazdefrance“, „MOL“, „Petrobras“, „Statoil“, „Total“ ir kitos). Šioje instrukcijoje surinkta ir išanalizuota visa įmanoma literatūra, susijusi su mechaniniais vamzdynų pažeidimais (Cosham, Hopkins 2004).

Pagrindiniai vamzdynų defektai:

- korozija;
- išskaptavimai, įkirtimai;
- neaštrios formos lenkimai;
- aštrios formos įlenkimai;
- aiškų įlenkimas ant suvirinimo siūlės;
- aiškų įlenkimas, sukeliantis sienelės išskaptavimą ar įkirtimą;
- aiškūs įlenkimai, sukeliantys kitų tipų defektus;
- gamybiniai defektai vamzdyno sienelėje;
- apskritiminės suvirinimo siūlės defektai;
- išilginės suvirinimo siūlės defektai;
- įtrūkiai;
- išorinių veiksnių nulemti įtrūkiai.

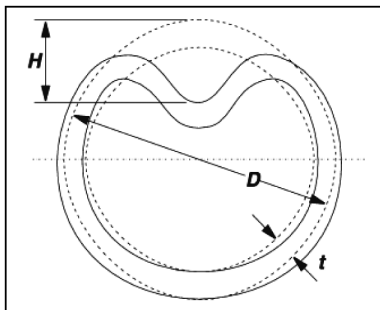
Pagrindinė dalis visų šių defektų yra įlenkimai be arba su sienelės suplonėjimu (išskaptavimai). Detalesnė informacija apie šiuos defektus pateikta žemiau (1 pav.).

Pagrindiniai įlenkimo parametrai yra (Alexander, Kiefner 1997):

- įlenkimo gylis H – tai atstumas nuo žemiausios deformuotos vietos iki menamos nedeformuotos vietos viršutinės dalies;
- vamzdžio geometrija, diametras D , sienelės storis t ;
- įlenkimo profilis (tolygus, staigiai kintantis, laiptuotas ir pan.);
- darbinis slėgis p ;
- ciklinės apkrovos ribos.

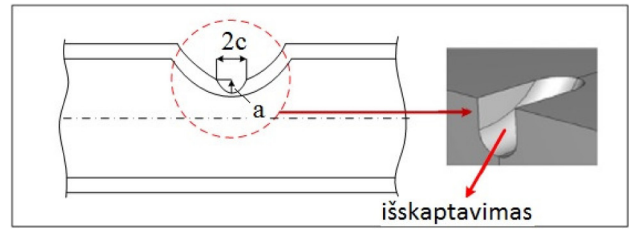
Pažeidimai su sienelės suplonėjimu (išskaptavimai), priskiriami pusiau elipsiniam defektui, kurį charakterizuoja parametrai (2 pav.) (Allouti *et al.* 2011):

- defekto ilgis $2c$;
- gylis a ;
- plotis W ;
- kreivumo spindulys δ .



1 pav. Pažeidimo geometriniai parametrai (Cosham, Hopkins 2004)

Fig. 1. Geometric parameters of damage (Cosham, Hopkins 2004)



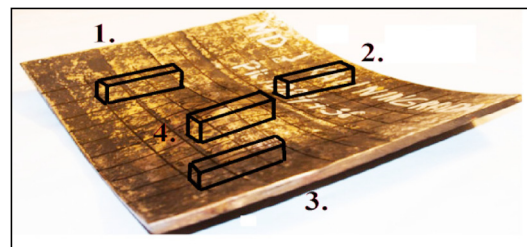
2 pav. Išskaptavimo parametrai (Allouti 2014)

Fig. 2. Gouge parameters (Allouti 2014)

Tyrimų metodika

1. Cheminė analizė atlikta optiniu spektrometru BELEC-Compact-lab-N, Nr. 0281, 1996 m.
2. Smūginio tašumo bandymas atliktas pagal standartą LST EN ISO 148-1:2011. Kadangi vamzdžio sienelės storis 8 mm, standartinių matmenų bandinio negalima naudoti. Dėl to pasirinktas 7,5 mm storio bandinys.

Bandiniai eksperimentui imami iš skirtingų gaminio vietų (3 pav.). Trys iš jų paimti iš nedeformuotos vamzdyno vietos. Ketvirtas paimtas iš pažeistos vietos. Kadangi vieta, iš kurios paimtas 4 bandinys, yra deformuota, bandinys buvo sulinkęs. Dėl to jis buvo ištiesintas mechaniniu būdu, tada atliktas bandymas.



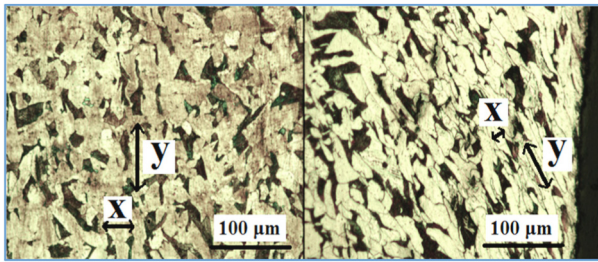
3 pav. Bandinių ėmimo vietos tašumo bandymui

Fig. 3. Specimens cutting zones

3. Defekto įtakai įvertinti baigtinių elementų metodu buvo panaudotas programinis paketas „ANSYS“.
4. Kietumo matavimas atliktas, norint nustatyti pakitimus pažeistoje zonoje, lyginant su sveikąja zona. Šiam tikslui buvo panaudotas dinaminis kietumo matavimo prietaisas „TIME HIGH TECH TH160“.
5. Plieno grūdelių matmenų pokyčio įtaka mechaninėms plieno savybėms nustatyta matuojant deformuotų grūdelių matmenis ir lyginant juos su nedeformuotų grūdelių matmenimis (4 pav.).
6. Grūdelių mikrokietumo matavimai atlikti nedeformuotoje vietoje ir deformuotoje vietoje, tiek ferito, tiek perlito struktūrai.

Mikrokietumas matuotas automatinio matuokliu.

Apkrova – 25 g, laikas – 10 s.



a) b)
4 pav. Grūdelių ilgio ir pločio matavimas
Fig. 4. Measuring of grains dimensions

Matavimai buvo atlikti įvairiose vietose. Į rezultatus įtrauktos reikšmės, kur išspaudas buvo tik ferito ar perlito grūdelių ribose. Jei išspaudas išeidavo už grūdelių ribų – rezultatai nefiksuoti.

Cheminės sudėties nustatymo rezultatai

Antroje lentelėje pateikiama cheminė lydinio sudėtis.

2 lentelė. Cheminė lydinio sudėtis procentais
Table 2. Chemical composition

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo
0,18	0,27	1,09	0,029	0,028	0,10	0,015	0,11	0,02

Likusi dalis – Fe.

Pagal gautą cheminę sudėtį galima daryti išvadą, kad lydinyje nėra didelio kiekio legiravimo elementų. Tačiau jame yra mikrolegiravimo elementų, pavyzdžiui, aliuminis 0,015 %, chromas 0,11 %, nikelis 0,07 %, niobis 0,004 %, kobaltas 0,02 %, volframas 0,04 % ir varis 0,1 %. Taip pat lydinyje yra virš vieno procento mangano. Tokia cheminė sudėtis būdinga HSLA plieno grupei (*high strength low alloy steels*). Būtent tokio plieno grupę pasižymi specifinėmis savybėmis, pavyzdžiui, didele stiprumo riba esant mažam anglies kiekiui, geru suvirinamumu ir geromis plastinėmis savybėmis esant normaliai ir žemai temperatūrai (Valiulis 1995).

Smūginio tūsumo bandymo rezultatai

Iš gautų reikšmių trečioje lentelėje matome, kad sugerta energija J visų bandinių yra apylygė ir viršija 60 J ribą. Ši reikšmė garantuoja, kad plienas yra plastiškas.

3 lentelė. Smūginio tūsumo bandymų rezultatai
Table 3. Results of toughness tests

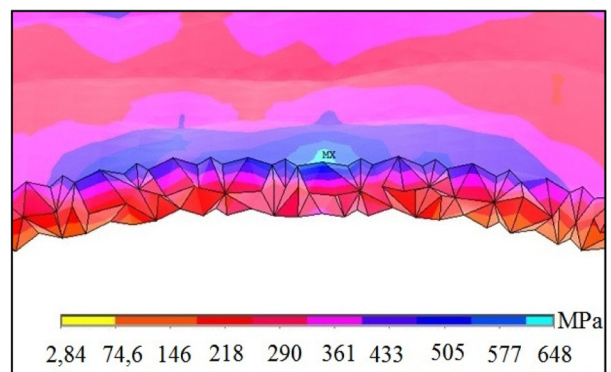
	h , mm	b , mm	S_0 , cm ²	KV , J	KCV , J/cm ²
1.	8,0	7,5	0,60	64,8	108
2.	8,0	7,5	0,60	68,7	114
3.	8,0	7,5	0,60	66,7	111
4.	8,0	7,5	0,60	60,9	101

h – bandinio aukštis iki įpjovos, b – bandinio plotis, S_0 – bandinio skerspjūvio plotis, KV – sugertos energijos kiekis, KCV – sugertos energijos kiekis tenkantis kvadratiniam centimetrui

Defekto įvertinimo baigtinių elementų metodu rezultatai

Atlikus skaičiavimus gauti rezultatai. Aktualiausi iš jų yra įtempiai ir jų skirtumas pažeistoje zonoje, lyginant su sveikąja.

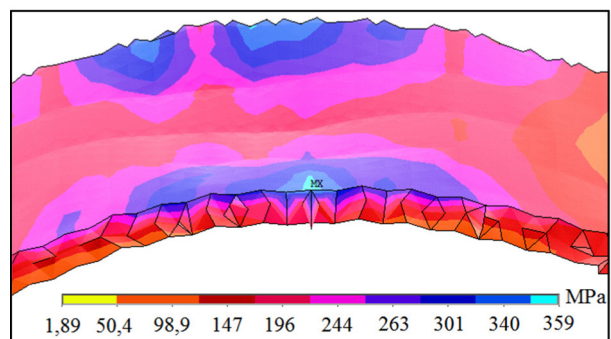
Nagrinėdami bandinio pjūvį ties maksimaliais įtempiais (5 pav.), matome, kad jie yra ne per visą sienelės storį, o tik pačiame paviršiuje ir tolygiai mažėja link vidinės vamzdžio sienelės. Galima padaryti išvadą, kad dėl metalo gniuždymo išoriniai sluoksniai yra labiau įtempti už vidinius, dėl to ir vyksta toks pasiskirstymas. Tačiau esant tokiai apkrovai vis viena būtų pavojinga eksploatuoti įrenginį, nes viršutinis sluoksnis gali pradėti pleišėti, ir vidiniuose sluokniuose tada kiltų didesni įtempiai negu yra dabar.



5 pav. Vamzdžio įtempiai esant 4,6 MPa slėgiui
Fig 5. Pipeline strength at 4,6 MPa pressure

Dėl šios priežasties buvo atlikti tolimesni eksperimentai „ANSYS“ programa.

Darbinis slėgis mažinamas iki 3,6 MPa ribos. Įtempių pasiskirstymas pateiktas 6 pav. Esant tokiam darbiniam slėgiui maksimalūs įtempiai neviršija leistinų ribų, ir vamzdžio eksploataciją galima būtų pratęsti.



6 pav. Vamzdžio įtempiai esant 3,6 MPa slėgiui
Fig. 6. Pipeline strength at 3,6 MPa pressure

Vickerso kietumo matavimo rezultatai

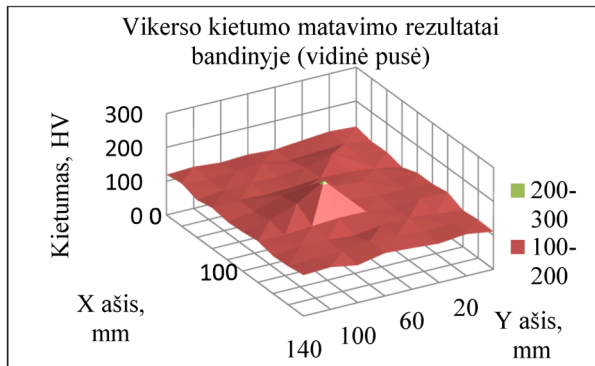
Atlikus kietumo matavimą bandinyje, nustatyta priklausomybė, kad vidinio paviršiaus kietumo pasiskirstymas vizualiai atitinka bandinio geometriją (7–8 pav.).

Įlenkimo gylis H lygus 17,4 mm.

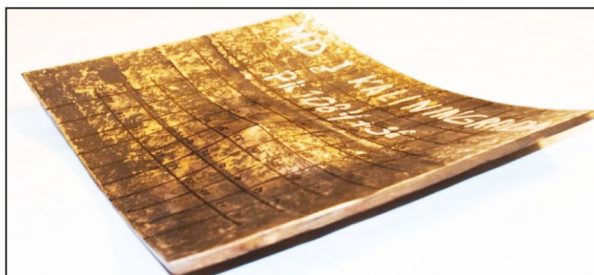
Išorinis skersmuo D lygus 529 mm.

Įlenkimo gylio procentinė reikšmė lygi 3,25.

Šis bandinys turi maksimalią įlenkimo procentinę išraišką, virš 3 procentų. Bet tai vis vien pagal visuotinai priimtą metodiką neviršija leistinos normos.



7 pav. Vickerso kietumo matavimo rezultatų grafinis pateikimas
Fig. 7. Graphical view of Vickers hardness measure



8. pav. Bandinio vidinio paviršiaus geometrija
Fig. 8. The inner surface geometry of the specimen

Gautuose matavimo rezultatuose aiškiai matosi proporcingas pasiskirstymas tarp kietumo reikšmės ir deformacijos laipsnio. Šie rezultatai rodo, kad reikia toliau tirti ir detaliau parodyti tokio pasiskirstymo priežastis.

Teoriškai pagal kietumo reikšmę galima surasti stiprumo ribos reikšmę (Ashby 2005):

$$Rm = HV \cdot \frac{10}{3};$$

Rm – Stiprumo riba, MPa;

HV – kietumas pagal Vickersą.

Pirma paskaičiuojame nedeformuotos vietos stiprumo ribą. Matavimų vidutinė kietumo reikšmė $HV = 148$.

$$Rm(\text{nedeform.}) = 148 \cdot \frac{10}{3} = 493 \text{ MPa.}$$

Kaip matome, reikšmė atitinka plieno markės stiprumo ribos reikšmę, t. y., apie 500 MPa.

Taip pat teorinė stiprumo ribą nustatome įlenkimo viršūnėje. Kietumo reikšmė $HV = 200$:

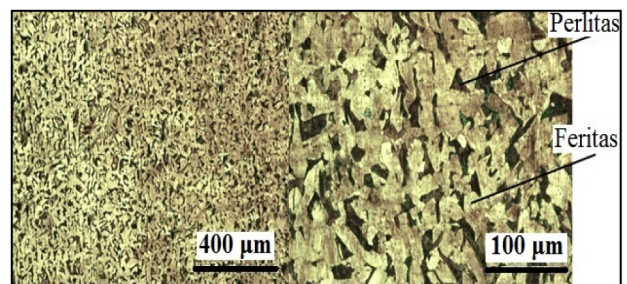
$$Rm(\text{deform.}) = 200 \cdot \frac{10}{3} = 666 \text{ MPa.}$$

Pagal empirines formules paskaičiavus stiprumo ribą giliausioje įlenkimo vietoje, ji padidėja beveik 200 MPa. Ši išaugusi stiprumo riba gali turėti neigiamų pasekmių, pavyzdžiui, sumažėja plastiškumas.

Mikrostruktūros tyrimo rezultatai

Nedeformuotoje vamzdyno vietoje atlikus mikrostruktūros tyrimus, puikiai matosi struktūra, kuri yra išlikusi po gamybos proceso, šiuo atveju, karšto valcavimo (9 pav.) (ASM 2006).

Taip pat puikiai galima identifikuoti ferito ir perlito grūdelius, kurie sudaro šio lydinio pagrindinius mikrostruktūros elementus.



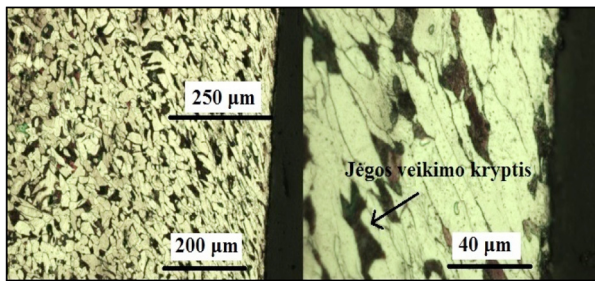
a) b)
9 pav. Nedeformuotos vietos struktūros nuotraukos padidinus 50x (a) ir 200x (b)
Fig. 9. Undistorted zone at 50x (a) and 200x (b) magnification

Didžiausius struktūros pokyčius įvykus deformacijai patyrė įlenkimo viršūnė, iš kurios paimtas mėginys. Čia ne tik nebėra gamybinio valcavimo grūdelių išsidėstymo, bet ir patys grūdeliai prarado savo formą ir buvo deformuoti.

Kaip matyti 10 pav., grūdelių deformacija vidiniuose sluoksniuose tęsiasi apie 250 μm. Kitomis dviem kryptimis deformacija tęsiasi apie kelis centimetrus. Galima spėti, kad būtent grūdelių deformacijos zonoje ir veikė išorinė jėga.

Tiek ferito, tiek perlito grūdeliai buvo deformuoti ir įgavo tam tikrą orientaciją. Pagal grūdelių išsidėstymą aiški ir išorinės jėgos kryptis. Ji yra statmena ilgajai grūdelio kraštinei (10 pav., b).

Po deformacijos susidaro nauja struktūra. Ši struktūra didina metalo anizotropiškumą, nes deformuotų grūdelių savybės įvairiomis kryptimis yra nevienodos.



10 pav. Pažeistos zonos grūdelių išsidėstymas ir forma didinant 100x (a) ir 500x (b)

Fig. 10. Dented zone grains orientation at 100x (a) and 500x (b) magnifications

Grūdelių matmenų pokyčio nustatymo rezultatai

Pagal rezultatus, pateiktus ketvirtoje lentelėje, matosi, kad ferito matmenys pakito virš dviejų kartų x kryptimi, o y kryptimi beveik nepakito.

Perlito x ir y kryptimis matmenys pakito visai nežymiai. Šiuo atveju pasikeitė akivaizdžiau tik grūdelių orientacija.

4 lentelė. Grūdelių matmenys ir jų matmenų pokytis
Table 4. Grains dimensions and their changes

Grūdelių matmenys	Feritas		Perlitas	
	Nedeformuotas	Deformuotas	Nedeformuotas	Deformuotas
x kryptis (μm)	30,7	13,4	12,3	11,5
y kryptis (μm)	40,3	45,9	33,7	36
Pokytis kartais x kryptimi	-2,29		-1,07	
Pokytis kartais y kryptimi	1,14		1,07	

Toks elgesys yra logiškas, nes perlito grūduliai yra daug kietesni už ferito, dėl to yra sunkiau deformuojami.

Grūdelių mikrokietumo matavimų rezultatai

Gauti ferito ir perlito mikrokietumo rezultatai yra aukštesni negu standartinio mažanglio plieno. Kaip minėta cheminės analizės tyrimo skyriuje, šis plienas priskiriamas prie HSLA (aukšto stiprumo mažai legiruotas plienas) plieno grupės. Plieno stiprumo riba yra apie 500 MPa. Tokio laipsnio reikšmė pasiekama legiruojant manganu ir kitais mikro legiravimo elementais. Būtent dėl šių elementų plieno grūdelių mikrokietumas yra didesnis negu standartinio plieno ir atitinka HSLA plieno tipo charakteristikas (Tisza 2002).

5 lentelė. Mikrokietumo matavimo rezultatai

Table 5. Microhardness measure results

	Nedeformuotas	Deformuotas	Skirtumas
	Vidutinis mikrokietumas HV		
Feritas	231	302	71
Perlitas	277	356	79

Aiškliai matyti, kad deformuotų grūdelių mikrokietumas didesnis (5 lentelė).

Nors ferito deformacijos laipsnis žymiai didesnis už perlito, bet mikrokietumo skirtumas vienodas tiek vienai struktūrai, tiek kitai.

Taip nutinka dėl to, kad perlitas susideda iš ferito ir cementito. Cementitas yra labai kieta fazė, kurios HV apie 800–1000 vienetų. Dėl to vykstant deformacijai deformuojasi pirmiausia feritas, taip sukietindamas grūdėlį. Tuo tarpu cementitas išlieka beveik nepakitęs.

Išvados

Vienas iš tiriamųjų objektų atkurtas BEM veikiančios programos „ANSYS“ erdvėje. Išanalizuota defekto įtaka įtempių pasiskirstymui esant maksimaliam leistinam vamzdyne darbiniam slėgiui – 5,4 MPa, esamam darbiniam slėgiui – 4,6 MPa ir sumažintam – 3,6 MPa slėgio. Pagal gautus rezultatus rekomenduojama pakoreguoti darbinį slėgį iki 3,6 MPa.

Smūginio tūsumo bandymas patvirtino, kad HSLA tipo plienas yra netrupedamas, todėl dujotiekiams, kurie eksploatuojami pagal panašius parametrus, galima naudoti skaičiavimo metodus pagal plastinio suirimo modelį.

Vikerso kietumo matavimų rezultatai proporcingi deformacijos laipsniui. Kuo didesnė deformacija, tuo kietumo reikšmė aukštesnė. Dėl šios priežasties išauga deformuotos vietos stiprumas ir sumažėja jos plastiškumas.

Pakitusi grūdelių orientacija didina plieno anizotropiškumą, tai sukelia mechaninių savybių pokytį skirtingomis kryptimis. Grūdelių deformacija vienareikšmiškai mažina plieno plastiškumą.

Literatūra

- Alexander, C. R.; Kiefner, J. F. 1997. *Effects of smooth and rock dents on liquid petroleum pipelines*, Final report to the American Petroleum Institute, Stress Engineering Services, Inc., and Kiefner and Associates. Washington: API publication. 13 p.
- Allouti, M.; Schmitt, C.; Pluinage, G.; Gilgert, J.; Hariri, S. 2011. Study of the influence of dent depth on the critical pressure of pipeline, *Engineering Failure Analysis* 21: 40–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.11.011>

- Allouti, M.; Schmitt, C; Pluvinage, G. 2013. Assessment of a gouge and dent defect in a pipeline by a combined criterion, *Engineering Failure Analysis*, 36: 1–13.
- Ashby, M. F. 2005. *Materials selection in mechanical design*. Burlington: Elsevier. 603 p.
- ASM. 2006. *Metals handbook. Metallography and phase diagrams*. ASM Handbook, Vol. 8. 8th ed. Printed in United States of America. American Society for Metal. 369 p.
- Cosham, A.; Hopkins, P. 2004. The effect of dents in pipelines – guidance in the pipeline defect assessment manual, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 81(2): 127–139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2003.11.004>
- Tisza, M. 2002. *Physical metallurgy for engineers*. London–Tel Aviv: ASM International. 403 p.
- Valiulis, A. V. 1995. *Specialiuju plienų ir lydinių struktūros ir suvirinamumo tyrimai*. Vilnius: Technika. 226 p.
- LST EN ISO 148-1:2011. *Suvirinimas ir medžiagotyra. Metalai. Šarpio smūginio tašumo bandymas*. 1 dalis. Bandymo metodas. Vilnius, 2011. 29 p.

THE MAIN GAS PIPELINES MECHANICAL DAMAGE INFLUENCE ON SAFE OPERATION

T.Vilkys, V. Rudzinskas

Abstract

The influence of mechanical damage of the gas transmission pipelines on safe pipelines operation was discussed in the article. The paper presents the main pipelines' damage types with actual parameters and the influence on the operational parameters. The main pipeline Kaunas – Kaliningrad part, which was removed as no longer usable, was analysed. This damaged part was removed and changed to a new part by a responsible company. The hardness measurement and micro hardness measurement, chemical analysis, impact strength test, metallography analysis with an optical microscope were used in experiments. The analysed pipeline part was also regenerated by the computer software ANSYS, which works by the finite elements method.

Keywords: defect, gas pipeline, dent, gouge, residual resource, mechanical damage, pipeline.