

## BADANIA WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA RUROCIĄGU I GRUNTU NA TERENACH GÓRNICZYCH W OBECNOŚCI WSTRZĄSÓW

### INVESTIGATION OF FRICTION COEFFICIENT OF PIPELINE AND AMBIENT SOIL GROUND ON MINING AREA WITH TREMBLOR ATTENDANCE

*W pracy przedstawiono badania współczynnika tarcia gazociągu i niestabilnego gruntu. Pod wpływem eksploatacji górniczej złóż, dochodzi do obniżenia terenów, w których zagłębione są sieci gazowe. Dodatkowym elementem mającym wpływ na środowisko jest obecność drgań podłoża, pochodzących od wstrząsów para-sejsmicznych. Brak dokładnych obliczeń gazociągów, stawia konieczność badań parametrów wymaganych do projektowania sieci w przedstawionych w pracy warunkach.*

**Słowa kluczowe:** gazociąg, grunt, obniżenie terenu, wstrząsy para-sejsmiczne, współczynnik tarcia

*In the paper has been presented the results of investigations to determine the coefficient of static friction pipeline and ambient unstable ground. As a result of a underground stratum exploitation and other mining activity it is occurred ground depression, with gas pipeline in the pan. Additional environment element is ground vibration presence as a result of para seismic shocks. Lack of an accurate calculations construction gas pipelines, arise some necessity to research a pipelines parameters, required to construction design in specified in the paper conditions.*

**Keywords:** gas pipeline, ground, depression pan, para seismic shocks, friction coefficient

#### 1. Wprowadzenie

Podstawą rozwoju energetyki jest budowa nowych sieci przesyłowych, które mogą przebiegać przez tereny charakteryzujące się niestabilnością. Do takich zalicza się tereny objęte podziemną eksploatacją różnych złóż. W wyniku prowadzonej eksploatacji górniczej, deformujące się warstwy przypowierzchniowe gruntu ulegają pionowym przemieszczeniom oraz poddawane są wstrząsom pochodzenia parasejsmicznego.

Przemieszczający się grunt na skutek wzajemnego tarcia ziaren, powoduje na pobocznicy gazociągu powstanie znaczących sił wzdłużnych, które stanowią źródło dodatkowych naprężeń w elementach sieci przesyłowej. Określenie dodatkowych obciążeń gazociągów zagłębionych w niestabilnym podłożu jest bardzo skomplikowane. Stosowane obliczenia do ich wyznaczania mają charakter przybliżony, dlatego podjęto próbę uściślenia badań współczynnika tarcia gazociągu i przemieszczającego się gruntu, który jest podstawowym parametrem w obliczeniach dodatkowych sił i momentów obciążających rurociągi.

#### 2. Cel badań

Głównym celem badań było wyznaczenie współczynnika tarcia statycznego na powierzchni kontaktu

#### 1. Introduction

The base of an industrial development is building industrial networks, passing unstable area sometimes. Mining areas with subsurface layers exploitation belong to this category unstable areas. Arising from mining exploitation, near surface ground layers are vertically shifted and they are object of some para seismic bumps.

As a result of passing ground grain friction, on alongside pipeline walls arises essential forces creating additional inside strains in industrial pipeline units. Determination of an additional pipeline strain burden in unstable areas is difficult and very complicated. Calculations used to determination of the additional pipeline strain burden are approximated. It is taken out effort to state more precisely examination of a friction coefficient of pipeline and ambient ground as base parameter of the calculations additional forces, torques and bending moments burden pipelines.

#### 2. Goal of investigations

Main goal of the investigations was to determining the coefficient of static friction on the contact surface

rurociąg – okalający grunt. Badany proces tarcia zachodził w podłożu gazociągu, które podlegało depresyjnym obniżeniom powstającym niecek obniżeniowych oraz sztucznie wymuszonym impulsom parasejsmicznym.

### 3. Lokalizacja miejsca badań poligonowych oraz charakterystyka obiektu

Do zaplanowanego eksperymentu wybrano stalowy gazociąg, posadowiony w miejscowości Gogołowa, na terenach objętych eksploatacją górnictwem w Rybnickim Okręgu Węglowym. Obszar w którym umiejscowiony jest gazociąg, zaliczany był do 2 kategorii górnictwa, charakteryzującej się następującymi wartościami spodziewanych deformacji powierzchni: odkształcenie poziome  $1.5 < \varepsilon \leq 3$  mm/m, promień krzywizny  $12 \leq R < 20$  km, nachylenie  $2.5 < T \leq 5$  mm/m. Poprzedzającą wybór miejsca do badań poligonowych analiza, uwzględniała również podwyższony poziom awaryjności sieci gazowej w tym rejonie.

Pod wybranym do badań odcinkiem gazociągu w dalszym ciągu kontynuowana jest eksploatacja węgla kamiennego przez KWK Jastrzębie – Moszczenica, a maksymalne obniżenie terenu powstającej niecki górnictwa wynosiło 1106 mm. W ciągu ostatnich dwóch lat obszar poligonu poddany był dodatkowo oddziaływaniom wstrząsów pochodzenia górnictwa, których energia osiągała wartości  $E = 5.7 \times 10^5$  J. Eksploatacja węgla prowadzona jest na głębokości 793 m, systemem na zawal, a miąższość wybieranych pokładów waha się w granicach od 1,6 do 3,5 m.

Gazociąg zbudowany był z rur stalowych R350, o średnicy 50 mm i grubości ścianki około 3,8 mm. Zagłębienie gazociągu wynosiło około 0,8 m. Głębokość wykopu pod budowany gazociąg wynosiła 1,0 m, a szerokość około 0,25 m. Gazociąg nie posiadał systemu kompensacji ruchów podłoża i zgodnie z obowiązującymi normami znajdował się w obsypce piaskowej, o średniej grubości 0,1m. Podłoże gazociągu stanowił piasek gliniasty, którego ciężar właściwy wynosił  $\gamma = 1.82 \times 10^{-2}$  MN/m<sup>3</sup>.

### 4. Metoda i aparatura pomiarowa zastosowana w badaniach

Badany gazociąg poddano statycznemu napinaniu z równoczesnym zadawaniem udarów, generujących drgania w podłożu gruntowym i badanym gazociągu.

Cykl badawczy podzielono na cztery badania, w których zmienną sterowaną była wartość wstępnego napięcia gazociągu, o wartości siły wzdłużnej równej 0, 20, 100, 130 kN. Napinanie osiowe gazociągu realizowano za pomocą specjalnie zaprojektowanego siłownika śrubowego, który pozwalał na wytworze-

pipeline and ambient ground. The investigated friction process was set in a pipeline ambient ground, which was object of a depression pan and an artificial forced para seismic propulsions.

### 3. Localization of the investigations range and the investigations object characteristic

There was chosen to the investigation steel gas pipeline, placed in Głogowa, on mining exploitation area of Rybnik Pit Coal District (Rybnicki Okręg Węglowy). The area with the investigated pipeline is classified as 2 mining class, with expected surfaces deformation characteristic as below: horizontal deformation  $1.5 < \varepsilon \leq 3$  mm/m, radius of curvature  $12 \leq R < 20$  km, ground inclination  $2.5 < T \leq 5$  mm/m. Analysis, antecedent investigation range choice, take account of a heightened level of gas pipeline failure in that region.

Under chosen to the investigation gas pipeline still exist a pit coal exploitation of KWK Jastrzębie – Moszczenica, and max depression of a nascent mining pan was 1106 mm. Area of the investigation range was treat by a mining exploitation bumps, with energy reaching up to  $E = 5.7 \times 10^5$  J, in last two years. The pit coal exploitation is on the depth 793 m, with landslide method, and the thickness of strata fluctuates from 1.6 to 3.5 m.

The gas pipeline was built as a steel pipes R350, with radius 50 mm and wall thickness about 3.8 mm. The gas pipeline under ground immersion was about 0.8 m. The depth pipeline trench was 1,0 m, and the width about 0.25 m. The gas pipeline was without any ground movement compensation and according to the obligatory standards was in a sand coat with average thickness 0.1m. The pipeline bedding was some clayed sand with unit weight  $\gamma = 1.82 \times 10^{-2}$  MN/m<sup>3</sup>.

### 4. The investigation method and the measurement instruments used in the experiment.

The scrutinized pipeline was statically strained with simultaneous force impact generating vibrations in the tested ground and the gas pipeline.

The investigation cycle was divided into four tests, with the initiative alongside pipeline force value equal 0, 20, 100, 130 kN as controlled variable. The axis pipeline stretch was fulfilled by a special constructed screw actuator witch allow generate required tangent forces on the contact surface of ambient ground and pipeline wall. The pipeline under static strain was tre-

nie określonych wartości sił stycznych na kontakcie grunt – gazociąg. Będący pod napięciem gazociąg, poddawano impulsom dynamicznym, wywoływanych udarem spadającego ciężaru  $C = 12$  kN, z wysokości 2,7 m. Miejsca uderu (S1, S2, S3, S4, S5) były rozmieszczone na półokręgu o promieniu równym 10 m (rys. 1). W każdym punkcie uderu ciężar opuszczany był 5-ciokrotnie. W punkcie pomiarowym PP rejestrowano odkształcenia oraz przyspieszenia drgań gazociągu, a także dokonywano kontroli napinającej siły statycznej podczas napinania gazociągu. Punkt pomiarowy PP1 miał za zadanie rejestrację odkształceń i przyspieszeń gazociągu w odległości 18,3 m od siłownika. W punkcie pomiarowym PP2 dokonywano przy pomocy akcelerometru pomiaru przyspieszenia drgań gruntu. Pomiarzy przeprowadzano zgodnie z planem eksperymentu i rozmieszczeniem aparatury pomiarowo- rejestrującej przedstawionych na rys. nr 1.

Punkty PP, PP1 i PP2 obejmowały pomiary następujących wielkości:

A) Punkt PP – pomiar na odcinku rurociągu, bezpośrednio przy siłowniku

- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – naprężenia od sił i momentów działających w osiach X, Y, Z

- $a_x, a_y, a_z$  – przyspieszenia drgań gazociągu w osiach X, Y, Z

B) Punkt PP1 – pomiar na odcinku gazociągu w odległości 18,3 m od punktu PP

- $\sigma_{x1}, \sigma_{y1}, \sigma_{z1}$  – naprężenia od sił i momentów działających w osiach X, Y, Z

- $a_{x1}, a_{y1}, a_{z1}$  – przyspieszenia drgań gazociągu w osiach X, Y, Z

C) Punkt PP2 – pomiar w gruncie na odcinku pomiędzy punktami PP i PP1

- $a_{x2}, a_{y2}, a_{z2}$  – przyspieszenia drgań gruntu w osiach X, Y, Z

Do badań zaprojektowano system pomiaru odkształceń gazociągu oraz przyspieszeń drgań gruntu i rury. Jego budowa oraz zestawienie elementów pomiarowo-rejestrujących przedstawiono w pracy [1].

Przyjęto następującą kolejność przeprowadzonych testów badawczych:

Pierwsze pomiary wykonano dla siły naciągu 20 kN, a następnie dla odprężonego gazociągu (bez siły naciągu). Następnie dokonano napinania gazociągu do 100 kN, co zarejestrowano na plikach w czasie około 500 sek. rejestracji każdy. Po tych testach przystąpiono po raz drugi do napinania gazociągu do 200 kN, ale

ated by a dynamic impact yielded by drop of weight  $C = 12$  kN, from height 2.7 m. The point of dynamic weight impact (S1, S2, S3, S4, S5) were arranged on a semicircle with radius 10 m (Pic.1). The weight was dropping 5-times on each point of impact.

In each point of measurements (PP) there was registered the strain and the vibration acceleration in pipeline as well as there was verifying tangent strain forces of pipeline from the screw actuator. The measurement point PP1 was for the strain and the vibration acceleration registration in the pipeline point distant 18.3 m from actuator. In the measurement point PP2 it was measured the vibration acceleration of ground. All measurements were executed according with the experiment plan and the arrangement of instruments according to scheme represented on Pic.1.

The measurement points PP0, PP1, PP2 were executed the registration following technical quantity:

A) Point PP0 – measurement on the sector of pipeline, immediate near actuator

- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – stresses from forces and moments operating in X, Y, Z axis

- $a_x, a_y, a_z$  – pipeline vibration acceleration in X, Y, Z axis

B) Point PP1 – measurement on pipeline in the point distant 18.3 m from point PP

- $\sigma_{x1}, \sigma_{y1}, \sigma_{z1}$  – stresses from forces and moments operating in X, Y, Z axis,

- $a_{x1}, a_{y1}, a_{z1}$  – pipeline vibration acceleration in X, Y, Z axis

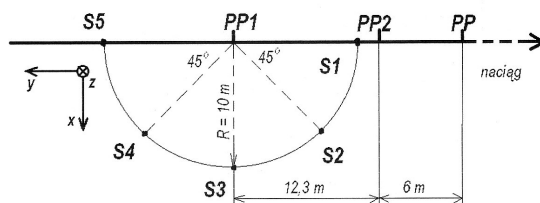
C) Point PP2 – measurement in the section of ground between point PP and PP1

- $a_{x2}, a_{y2}, a_{z2}$  – ground vibration acceleration in X, Y, Z axis

It was constructed measurement system for the pipeline strain as well as the vibration acceleration of ground and pipeline. The measurement system construction and list of register/measurement units is represented in paper [1]. Sequence of tests was accepted as below: first measurements was done for 20 kN force strain and later for relaxed pipeline (without strain force); next, the pipeline was strained continuously up to 100 kN, what was registered in few

files during 500 s time each.

After described tests, the pipeline has been strained up to 200 kN force second time, but after reaching 180 kN force, it's occurred spontaneous strain force drop down to about 130 kN. The equilibrium of friction and strain forces were break down at this strain force



Rys. 1. Plan poligonowych badań współczynnika tarcia rurociągu i gruntu w obecności drgań

Pic.1. Layout of the ground pipeline friction coefficient research range at the vibration presence

po osiągnięciu wartości siły statycznej równej 180 kN, nastąpił samoistny spadek wartości siły napięcia do około 130 kN. Przy tej wartości siły naciągu została zerwana równowaga sił tarcia i siły naciągu. Proces napinania gazociągu do 20 kN zarejestrowano na plikach po około 1000 sek. rejestracji każdy.

W ostatnim etapie eksperymentu dokonano badania gazociągu przy samoistnie ustabilizowanej sile napięcia 130 kN.

## 5. Wyniki badań

Uzyskano bardzo znaczną liczbę wyników badań, które opracowano w formie graficznej. Na wykresach przedstawiono przebiegi zarejestrowanych odkształceń gazociągu, wartości składowych naprężeń kierunkowych  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  w MPa, pochodzących od działających sił i momentów odpowiednio w kierunkach osi OX, OY, OZ. Dla porównania, obok przedstawiono wartości przyspieszeń drgań gazociągu  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  w jednostkach przyspieszenia ziemskiego  $g$ , zarejestrowane akcelerometrem w kierunkach osi OX, OY, OZ. Przykład zarejestrowanych przyspieszeń drgań gruntu i odpowiedzi gazociągu w postaci przebiegu odpowiadających mu naprężeń  $\sigma_y$ , przedstawiono na rys. 2. Przykładowy przebieg obliczonej siły napinającej gazociągu  $F$  w kN, w funkcji czasu w sek. i naprężeń  $\sigma_y$  w MPa, działającej wzdłuż osi gazociągu OY z zarejestrowanym obciążeniem dynamicznym, pochodzącym od wstrząsu, przedstawiono na rys. 3. Jest to wykres fazowego przesunięcia składowego naprężenia kierunkowego zarejestrowanego w kierunku osi OY.

Podobne przebiegi zmian wartości kierunkowych naprężeń składowych –  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , przyspieszeń gazociągu –  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  oraz statycznej siły napinającej –  $F$ , dla kolejnych punktów wymuszania drgań – S1, S2, S3, S4, S5, po pięć przykładowych testów dla każdego punktu S i kolejnych wartości siły napinającej 0, 20, 100, 130 kN zarejestrowano w punktach pomiarowych PP, PP1 i PP2.

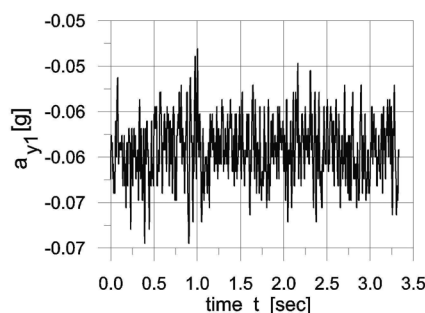
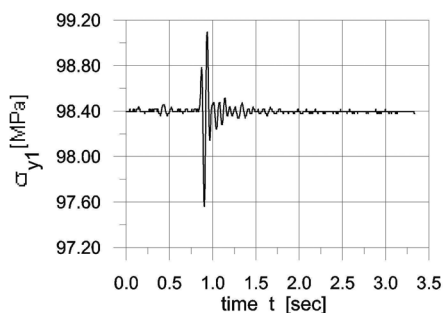
W artykule wykorzystano tylko część wyników, bezpośrednio związaną z wyznaczeniem współczyn-

value. The process of pipeline tensing to 20 kN was registered in 1000s time files each. In last step of the experiment pipeline was tested with spontaneous stabilized force strain 130 kN.

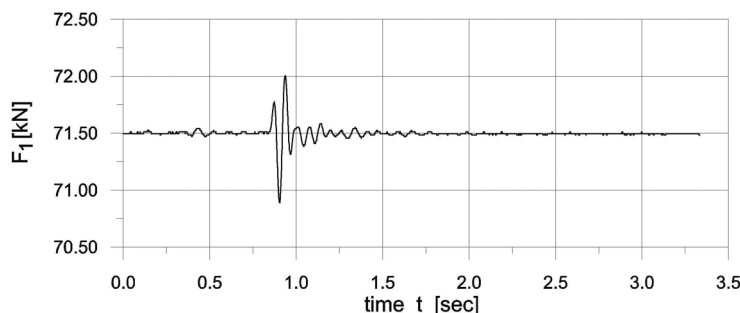
## 5. Results of the tests

It was obtained plentiful results set which was work out in graphical form. On the charts there were depicted registered strains of pipeline curves and the values of axis components direction stresses  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  in Mpa, coming from the forces and the moments operating in axis direction OX, OY, OZ. For comparison, on side, there were depicted the pipeline vibration acceleration  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  in earth acceleration units  $g$ , registered by accelerometer in axis direction OX, OY, OZ. Example of registered ground vibration acceleration and responding pipeline stresses  $\sigma_y$ , depicted on pic. 2. Example of calculated strain pipeline force  $F$  expressed in kN, as a function of time in sec. and stresses  $\sigma_y$  in Mpa, operating in alongside axis of pipeline direction OY, with registered dynamic strain from the impacts is depicted on pic. 3. It is shifted phase chart component directed stress registered in axis OY direction.

The time pattern of the components directional stresses –  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , the pipeline vibration acceleration –  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  as well the static strain force –  $F$ , at forced vibration in points – S1, S2, S3, S4, S5, five times test each and successively next static strain forces of pipeline 0, 20, 100, 130 kN, all in measurement points PP, PP1, PP2 were registered. In the paper it was used only part of all results, directly bonded with the friction coefficient retrieval process. The data pipeline stresses  $\sigma_y$ , calculated on the measured pipeline strains in axis direction OY, belong to that set. It should be marked, that value of 200 kN pipeline strain force were not reached, because tangent strain limit of con-



Rys. 2. Wartości naprężeń gazociągu  $\sigma_{y1}$  oraz przyspieszeń drgań gruntu  $a_{y1}$  uzyskane w badaniach współczynnika tarcia  
Pic. 2. The pipeline stress values  $\sigma_{y1}$  and the ground vibration accelerations  $a_{y1}$  collected at the friction coefficient determination



Rys. 3. Przebiegi zmian siły napinającej  $F = f(\sigma_y, t)$  z zarejestrowanym udarem dynamicznym w punkcie pomiarowym PP1  
 Pic. 3. Plots of the strain forces variable  $F = f(\sigma_y, t)$  with the dynamic impact registered in the measurement point PP1

nika tarcia. Należą do nich wartości naprężeń  $\sigma_y$ , wyliczone na podstawie zmierzonych odkształceń gazociągu w kierunku osi OY.

Należy zaznaczyć, że podczas napinania gazociągu siłą 20 kN, wartości tej nie osiągnięto, ponieważ nastąpiło przekroczenie granicznych naprężeń stycznych na kontakcie grunt-gazociąg i zerwanie styku, połączone ze zmianą tarcia statycznego na kinetyczne.

## 6. Identyfikacja parametrów tarcia rurociągu i gruntu

Istotnym zagadnieniem w przeprowadzonym eksperymencie jest wyznaczenie współczynnika tarcia rurociągu i gruntu. Rodzaj posiadanego materiału eksperymentalnego (danych pomiarowych) oraz informacji o warunkach eksperymentu, szczególnie o dokładnej konfiguracji terenu w obrębie strefy pomiarowej oraz o faktycznym ułożeniu rury w wykopie (krzywiznie rurociągu) zmuszają do zastosowania zaprezentowanej metody wyznaczenia współczynnika tarcia. Podstawą obliczeń jest przyjęcie, że siły działające na rurociąg w dwóch rozważanych punktach pomiarowych PP0 i PP1 muszą być zrównoważone (to znaczy w takim stanie, gdy nie następują już istotne zmiany wartości naprężenia) przez siłę tarcia, w tym wypadku – siłę tarcia statycznego.

Wyznaczanie współczynnika tarcia przeprowadzono wg następującego algorytmu:

Obliczono wartości siły działającej na rurociąg w punktach PP0 i PP1.:

Wartości siły napinającej gazociągu  $F$ , równoważonej siłami tarcia gruntu i gazociągu, wyznaczono na podstawie pomiaru, wykorzystując w mostku kanał pomiarowy B ( $\sigma_y$ ). Po uwzględnieniu współczynnika obliczeniowego (zależny od modułu Young'a) równego  $1/210$ , współczynnika obliczeniowego (zależnego od liczby Poissona) równego  $1,3$  oraz współczynnika uzyskanego ze skalowania równego  $1/0,00852$ , wartość siły wyliczono ze wzoru:

$$F = \sigma_y \times \left( \frac{1}{210} \times 1,3 \times \frac{1}{0,00852} \right) \quad (1)$$

tact ground – pipeline were overstepped, and the static friction were transferred to the kinetic one.

## 6. Identification of ambient ground and pipeline friction parameters

The pipeline and the ambient ground friction coefficient retrieval process is essential problem of executed experiment. Character of the acquisition experimental data (the measurement data), the data of experimental conditions, especially experimental range configuration and sculpture one, as well as the actual pipeline stratification in excavation (pipeline curvature) are reason for applied methodology of friction coefficient retrieval process. The base assumption of calculation is that the forces operating in two points PP0 i PP1 must be counterbalanced (changes of the stresses are not essential) by the friction force (static friction force in the case).

The algorithm of friction coefficient retrieval process is as below:

It was calculated the force value operating in pipeline point PP0 and PP1.:

The pipeline strain force value  $F$ , counterbalanced by ground – pipeline friction force, was measured with tensometer bridge channel B ( $\sigma_y$ ).

After taking account of: the calculation coefficient (depending of Young's modulus) equal  $1/210$ , the calculation coefficient (depending of Poisson's constant) equal  $1.3$  and the scale coefficient equal  $1/0.00852$ , the force value calculated according with formula:

$$F = \sigma_y \times \left( \frac{1}{210} \times 1,3 \times \frac{1}{0,00852} \right) \quad (1)$$

where:  $F$  – stabilized pipeline strain force in [kN],  $\sigma_y$  – the component directional pipeline stress in axis direction OY.

gdzie:  $F$  – stabilizowana siła napinająca gazociągu [kN],  $\sigma_y$  – składowa kierunkowego naprężenia gazociągu, w kierunku osi OY.

Pomiędzy punktami PP0 i PP1 działa siła wyrażająca się wzorem:

$$F_T = F_{PP0} - F_{PP1} \quad (2)$$

Do celów estymacji współczynnika tarcia wykorzystywane są wartości tej siły przed i po przejściu fali sejsmicznej, a więc w chwili ustabilizowania się stanu rurociągu (rys. 4).

Wartości tej siły przed nadejściem fali i po jej przejściu różnią się w małym stopniu, a w chwilę po przejściu fali stabilizują swą wartość.

Należy zaznaczyć, że wyniki pomiaru przeprowadzone dla wstępnego naprężenia rurociągu o wartości 130 kN są do celów estymacji nieprzydatne. W wyniku procesu odciążania powstał w tym wypadku w rurociągu stan niemonotonicznego naprężenia, które nie zostaje zrelaksowane w wyniku działania fali sejsmicznej do chwili zakończenia rejestracji sygnału. Mamy zatem do czynienia z procesem dynamicznym i z tarcie dynamicznym, które jest równoważone przez mniejszą siłę.

Do zadania identyfikacji współczynnika tarcia statycznego dysponujemy wartościami siły uzyskanymi dla naciągów 0 kN, 20 kN i 100 kN.

Wartość siły  $F_T$  obliczona dla naciągu 0 kN wyraża stan naprężeń wewnętrznych rurociągu, powstałych w wyniku działań przygotowawczych przed eksperymentem (montowanie czujników, wykonywanie wykopów, itp.). Wielkość ta stanowi skalę odniesienia dla wyników uzyskanych przy innych naprężeniach i posłuży do skorygowania uzyskanego wyniku. Średnia wartość tej siły (obliczona dla wszystkich zebranych danych, tzn. 5 punktów pomiarowych i 5 serii w każdym punkcie) wyniosła 1,93 kN

Wartości siły  $F_T$  uzyskane dla naciągów 20 kN i 100 kN odpowiadają siłom tarcia statycznego, które oddziałują na rurociąg w przypadkach tych obciążeń. Uzyskane wartości różnią się od siebie, ponieważ siła tarcia wywołana jest przez dwa składniki. Pierwszym z nich jest siła nacisku gruntu na rurę (o charakterze hydrostatycznym), jednakowa w przypadku obu wartości naciągów. Drugim

Between the pipeline points PP0 and PP1 operate the force expressed by formula:

$$F_T = F_{PP0} - F_{PP1} \quad (2)$$

The value of this force is used to estimate friction coefficient as before as after seismic wave pass, so in the moment of stabilized pipeline state (pic. 4).

The values of that forces differed a little before arrival and after pass-on wave, and awhile moment after wave pass-on, the force stabilize its value.

It should be emphasized, that measurement data with initiative pipeline stress force 130 kN are not useful for estimate purpose.

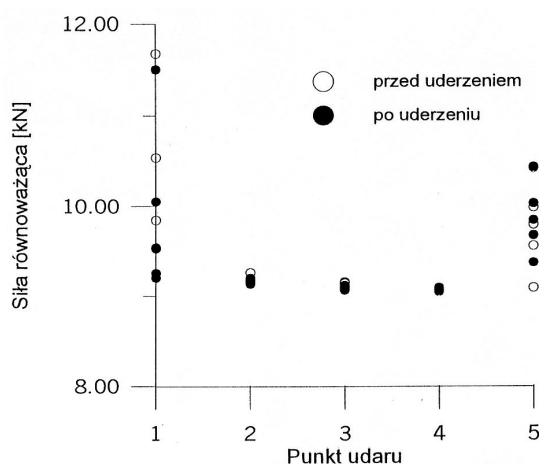
As a result of relief process, it arise the pipeline state of non monotonous stresses, which is not relaxed by seismic wave up to end of signal registration. Therefore, there is the dynamic process and the dynamic friction, counterbalanced by smaller pipeline force.

The identification task of the static friction coefficient is realized with initial strain pipeline forces 0 kN, 20 kN i 100 kN.

The force value  $F_T$  calculated at initial strain 0 kN expresses initial internal stresses in pipeline, made by initial processes before experiment (making monitoring excavations, sensor mounting etc) . The measured value constitutes reference scale and will be used to adjust obtained results. The average force value ( calculated for all collected data i.e. form 5 measurement points and 5 series in each point) was equal 1.93 kN .

The force value  $F_T$  calculated at the initial strain 20 kN and 100 kN expresses the static friction forces, which interacts on pipeline with mentioned stresses at case .

Obtained results are differed to each other, because the friction forces are caused by two factors. The first is the ground pressure on a pipeline (hydrostatic character), identical in both cases of the strain values. The second component is additional force clamping pipeline into ground, arisen by the strain force in pipeline lying on curved supporting trench base (pipeline is laying on the mining activity range). Calculation of that component pipeline force is impossible, because of uncertain geometrical factors of pipeline between measurement points.



Rys. 4. Wartości siły równoważącej  $F_T$  przed i po przejściu fali sejsmicznej, dla pięciu punktów uderu i napięciu gazociągu siłą  $F = 20$  kN

Pic. 4. The counterbalance force value  $F_T$  before and after seismic wave pass for five impact points and at the strain pipeline force  $F = 20$  kN

składnikiem jest dodatkowa siła dociskająca rurę do gruntu, powstała w wyniku działania siły naciągającej na zakrzywiony rurociąg (leżący przecież na terenach szkód górniczych). Obliczenie wartości tej siły jest niemożliwe, ze względu na nieznajomość geometrii rury w jej odcinku między punktami pomiarowymi. O zakrzywieniu rurociągu świadczą również niezerowe wartości naprężeń  $\sigma_x$  i  $\sigma_z$ , mierzone w stanie ustalonym dla wszystkich naciągów rury. Wyeliminowanie tej siły jest możliwe przez odpowiedni zabieg rachunkowy.

W celu wyeliminowania zmiennej siły dociskającej rurociąg do gruntu wykonajmy następujące rozumowanie. Wiadomo, że siła ta zależy od wartości siły naciągu. Gdy naciąg jest równy zero – siła dociskająca nie istnieje. Ponieważ dysponujemy jedynie dwoma pomiarami (dla 20 kN i 100 kN) założmy, że siła ta zależy liniowo od wartości siły naciągającej rurociąg i ekstrapolujemy wartość siły tarcia dla naciągu 0 kN, przyjmując, że znamy wartości tej siły dla 20 kN i 100 kN.

Wynik tak zaplanowanych obliczeń przedstawiono na rys. 5. Wykorzystano w nich wszystkie dostępne pomiary, a prostą aproksymującą poprowadzono zgodnie z zasadą najmniejszych kwadratów (regresja liniowa). W wyniku uzyskano wartość siły tarcia statycznego odpowiadającą jedynie ciśnieniu hydrostatycznego gruntu na rurociąg jako  $F_T = 6,32$  kN.

Ostatnim krokiem jest uwzględnienie poprawki obliczonej powyżej, co w ostatecznym wyniku daje wartość siły tarcia jako  $F_T = 8,25$  kN. Ta wartość posłuży do obliczenia współczynnika tarcia statycznego gruntu i rurociągu.

Do obliczenia współczynnika tarcia potrzebna jest znajomość siły nacisku działającej na powierzchnię rurociągu pomiędzy punktami pomiarowymi. Siłę działającą na powierzchnię rurociągu możemy wyliczyć ze wzoru:

$$F_N = 2\pi r l h \rho g \quad (3)$$

Dla parametrów badanego gazociągu i gruntu o następujących wartościach liczbowych:

- średnica rury: 0,05 m (promień:  $r = 0,025$  m),
- rednie zagłębienie rurociągu (od powierzchni do osi rury):  $h = 0,8$  m,
- długość zagłębionego rurociągu:  $l = 18,3$  m,
- gęstość materiału gruntu:  $\rho = 1820$  kg/m<sup>3</sup>,
- wartość przyspieszenia ziemskiego przyjmujemy  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>,
- obliczona wartość siły  $F_N \approx 41,03$  kN.

Wartość współczynnika tarcia statycznego  $\tau_s$  obliczamy z wzoru:

$$\tau_s = \frac{F_T}{F_N} \quad \tau_s = \frac{8,25}{41,03} = 0,20 \quad (4)$$

Not null stresses value  $\sigma_x$  and  $\sigma_z$  at the static state with all initial pipeline strain betray the pipeline curvature. Towards to eliminate variable force which clamping pipeline to ground, it was made some reasoning. It is common knowledge, that this force depend of the strain force. In case the strain force is null – clamping force is zero too. Because we have only two measure results ( at 20 kN and 100 kN ) it was assumed linear dependency of the strain pipeline force and we extrapolate friction force value at initial strain 0 kN, assuming known value of the forces at 20 kN and 100 kN initial strain.

The results of that scheduled calculations are presented on pic.5. It was used all available measurement data, and approximation strait line was led according with minimum square principle ( linear regression ). As a result it was obtained the static friction force from the hydrostatic ground pressure on pipeline equal  $F_T = 6.32$  kN.

The last step is to take account of correction calculated above and as the final result friction force is as  $F_T = 8.25$  kN. This value is used at calculation of static friction coefficient of ground and pipeline.

It is necessary knowledge of a normal force operating on surface of pipeline between measurement points to calculate friction coefficient. That force operating on surface of pipeline can be calculate from formula:

$$F_N = 2\pi r l h \rho g \quad (3)$$

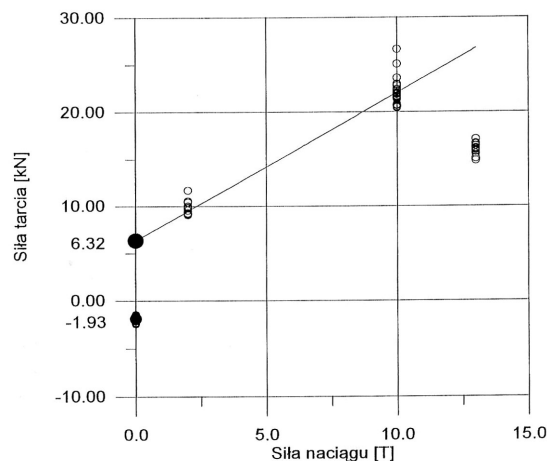
At parameters data of the ground and the pipeline as below:

- pipe diameter: 0.05 m (radius:  $r = 0.025$  m);
- average pipeline immersion ( from surface to pipe axis ) :  $h = 0.8$  m,
- length of the immersed pipeline part:  $l = 18.3$  m,
- ground density:  $\rho = 1820$  kg/m<sup>3</sup>,
- earth gravitation  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>,
- calculated force value is  $F_N \approx 41,03$  kN.

The static friction coefficient value  $\tau_s$  is calculated from formula:

$$\tau_s = \frac{F_T}{F_N} \quad \tau_s = \frac{8.25}{41.03} = 0,20 \quad (4)$$

The obtained calculation result corresponds to authors expectations, because some friction coefficient value obtained in analogous conditions and cited by other authors is similar. Percentage error is not too big, thanks to the facts that: the majority of parameter values are accurately known, range of applied exploration (20 kN) to the strain scale is comparatively small ( force value can not changed



Rys. 5. Wykres siły tarcia  $T$  w funkcji siły napięcia gazociągu  $F$  w badaniach współczynnika tarcia w obecności drgań  
 Pic. 5. Chart of the friction force  $T$  vs. the pipeline strain force  $F$  at the friction coefficient determination with vibration presence

Otrzymany wynik odpowiada oczekiwaniom, ponieważ wartości współczynnika tarcia rozpatrywanego w analogicznych zagadnieniach przez innych autorów są podobne. Za tym, że błąd (procentowy) nie jest zbyt duży przemawia fakt, iż większość parametrów występujących we wzorze dla siły tarcia jest znanych dokładnie, a zasięg ekstrapolacji (20 kN) – stosunkowo mały w porównaniu z rozpatrywanym zakresem naciągów (siła na tym odcinku nie może wykonywać zbyt gwałtownych skoków). Ponadto, siła odniesienia obliczana przy faktycznym naciągu równym 0 kN jest praktycznie stała dla wszystkich eksperymentów, co świadczy o tym, że obliczona wartość średnia tej siły jest bardzo bliska jej rzeczywistej wartości.

Jednak ze względu na przyjęte przybliżenie liniowe w celu eliminacji jednego ze składników siły tarcia oraz konieczność korekcji naprężeń własnych rurociągu, jedynie dwa stany naciągu przydatne do obliczeń, niemożność podania dokładnej długości odcinka rurociągu zagłębionego w ziemi (w wyniku jego krzywizny i konieczności wykopania studzienek w miejscu ulokowania czujników), powstaje konieczność kontynuacji podjętych badań.

## 7. Wnioski

1. Przeprowadzone badania potwierdziły celowość realizacji podjętego tematu badań, oraz pozwoliły na zidentyfikowanie procesów tarcia rurociągu o grunt i wpływu impulsów sejsmicznych na ten proces. W szczególności istotne było wyznaczenie współczynnika tarcia statycznego gruntu i rurociągu, który daje podstawy do określania rzeczywistych wartości obciążeń rurociągów, budowanych na terenach niestabilnych.
2. W obszarze szkód górniczych, w procesach, w których występuje tarcie istotny jest nie tylko

fiercy). Moreover, reference force calculated at the actual strain force 0 kN is practically constance for all experiments. It means, that calculated average force is very close to real value.

On account acceptance of linear approximation for elimination some component of the friction force, necessity initial inner pipeline strain correction, only two pipeline strain values accepted in calculations, not definite length of immersed part of pipeline (due to pipeline curvature and sensor wells), there is research continuation suggested.

## 7. Conclusions

1. Performed research on the undertaken subject acknowledged chosen purpose. Identification of the ground – pipeline friction process with the seismic impact was done. Particular essential was the static friction ground pipeline coefficient retrieval. It is base to determination of the actual pipeline (lying on unstable mining activity range) stresses.
2. The curvature of pipeline and the ground pipeline friction coefficient are essential elements



współczynnik tarcia, lecz także kształt (krzywizna) rurociągu w gruncie. Te dwie wielkości mają wpływ na całkowitą siłę tarcia działającą na rozważany odcinek rurociągu.

3. W trakcie prowadzonych badań zgromadzono duży zasób danych eksperymentalnych, które mogą posłużyć do prowadzonych w przyszłości badań – symulacji wymuszeń parasejsmicznych lub drgań konstrukcji liniowej, prowadzonych w celu określenia procesów zużycia, zmęczenia lub zniszczenia gazociągów w terenach o dużym zagrożeniu dla trwałości takich obiektów (tereny górnicze, tereny o dużym natężeniu ruchu drogowego, itp.
4. Uzyskane z badań wyniki mogą stanowić materiał przydatny do dalszych badań jako podstawa ustalania gęstości widmowych przydatnych w obliczeniach numerycznych (symulacja złożonych zjawisk parasejsmicznych i ich wpływu na gazociągi), jak również jako materiał porównawczy dla realizacji procesów parasejsmicznych symulowanych komputerowo.

in some friction processes on mining activity damages ranges. That two mentioned above variables affect total friction forces at considered part of pipeline.

3. During the executed experiment it was collected plenty of useful data. They can be useful for other research with para seismic impact simulations, the cable construction vibrations analysis, etc. with goal to determination of wear process, fatigue and destruction of pipelines on range with high level damage threat (mining activity ranges, load traffic site ect.)
4. Data acquisition as result of experiment can be useful in other research and a base to determination spectral density at numerical calculations (computer simulations of para seismic processes and their impact on gas pipelines) as well as comparison material in computer simulated para seismic processes.

## 8. Literatura

- [1] Gawędzki W., Tarnowski J.: *System diagnozowania i monitoringu statycznych i dynamicznych stanów odkształceń gazociągów eksploatowanych w warunkach niestabilnego środowiska*, ZEM 4/99.
- [2] Broniec Z., Czachórska E., Szybka J., Tarnowski J.: *Safety Problems of Gas Grid Maintenance on Mining Area*, The 8<sup>th</sup> International Colloquium, Haigh Pressure Pipeline Reliability after a Long Time Operation, Praga '1999.
- [3] Tarnowski J.: *Analiza wpływu tarcia na zmiany obciążenia gazociągu współpracującego z górnictwo – odkształcalnym ośrodkiem gruntowym*, 5<sup>th</sup> International Symposium INSYCONT '98, Tribologia Nr 6/98.
- [4] Doliński K., Kotulski Z.: *Localisation effect during wave pulse propagation in randomly stratified medium*, Arch.Mech. 51, 311-334, (1999).
- [5] Doliński K., Kotulski Z., Tarnowski J.: Sprawozdanie z projektu KBN Nr 9T12A04812
- [6] Kotulski Z.: *Elastic waves in randomly stratified medium*. I. Acta Mechanica 83, 61-75 (1990), II. Acta Mechanica 92, 143-163, (1992).
- [7] Ciesielski R., Maciąg E.: *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990
- [8] Tarnowski J.: *Analysis of the Effect of Friction on Changes of Loads Exerted on Gas Pipeline Cooperating with Mining-Deformable Ground*, The 8<sup>th</sup> International Colloquium, Haigh Pressure Pipeline Reliability after a Long Time Operation, Praga '1999.
- [9] Szcześniak Z.: *Modelowanie zachowania dynamicznego konstrukcji podziemnych w warunkach działania fali uderzeniowej*, Wydawnictwo WAT, Warszawa 1999.

---

**dr inż. Jerzy TARNOWSKI**

**dr inż. Włodzimierz FIGIEL**

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Akademia Górniczo - Hutnicza Kraków

Aleje Mickiewicza 30

[jtarnow@interia.pl](mailto:jtarnow@interia.pl)

[tarnow@uci.agh.edu.pl](mailto:tarnow@uci.agh.edu.pl)

---