

Piotr KALISZ

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

PROBABILISTYCZNA ANALIZA WPLYWU EKSPLOATACJI GÓRNICZEJ NA RUROCIĄGI

Streszczenie. W referacie przedstawiono analizę oddziaływania deformacji przypowierzchniowej warstwy gruntu na rurociągi układane w wykopach i budowane metodami przeciskowymi. W analizie tej uwzględniono rozproszenie losowe wartości występujących na terenach górniczych poziomych odkształceń warstwy gruntu, które mają istotne znaczenie z uwagi na obciążenia rurociągów oraz na pracę ich złącz i kompensatorów.

PROBABILISTIC ANALYSIS OF MINING INFLUENCE ON PIPELINES

Summary. In the paper an analysis of influence of subsurface ground layout deformation on pipelines lain in excavations and built with push-through methods was discussed. In this analysis the random distribution of values of horizontal ground layout strains observed on mining terrain has been considered, which are of importance with respect to a pipeline load and an operation of connectors and compensating pieces.

1. Wprowadzenie

Deformacje przypowierzchniowej warstwy gruntu, wywołane podziemną eksploatacją górnictw, powodują dodatkowe obciążenia rurociągów oraz ich przemieszczenia. Może to prowadzić do zniszczenia rur i utraty szczelności połączeń. Projektowanie i budowa rurociągów na terenach górniczych wymaga uwzględnienia dodatkowych obciążeń rur i studzienek oraz zastosowania odpowiednich zabezpieczeń, pozwalających na ich prawidłową pracę w czasie ujawniania się wpływów eksploatacji górnictw. Na terenach górniczych stosowane są rury o wydłużonych kielichach lub nasuwkach oraz kompensatory w przypadku rurociągów o małej podłużnej odkształcalności. Istotne znaczenie dla obliczenia obciążeń rurociągów oraz niezbędnej długości złącz i kompensatorów jest wyznaczenie

ekstremalnych wartości odkształceń, jakie z określonym prawdopodobieństwem mogą oddziaływać na rurociąg.

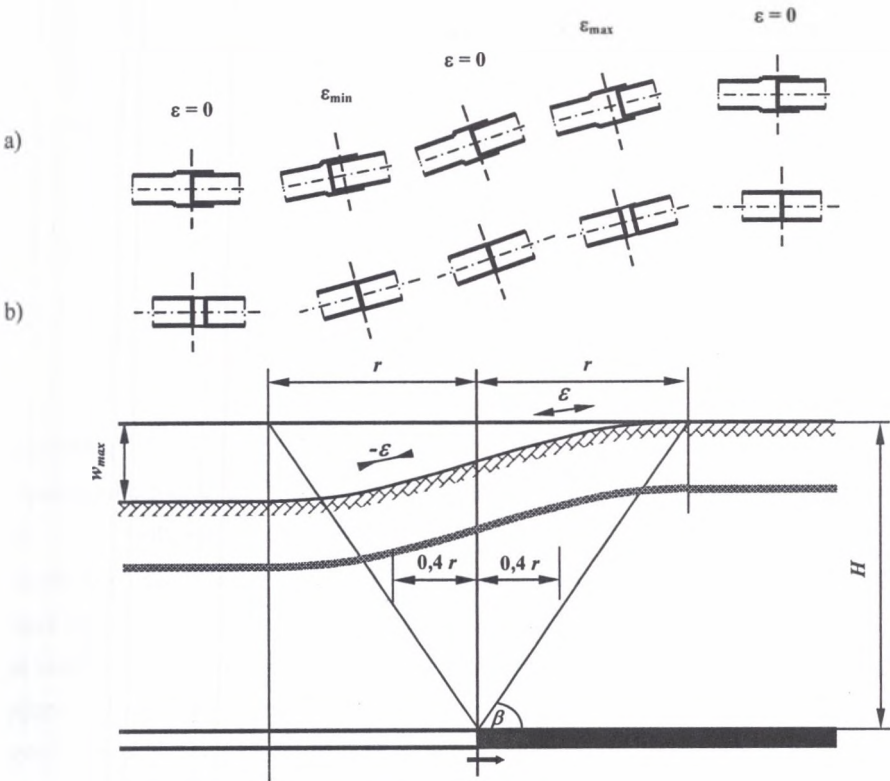
Referat poświęcony jest analizie oddziaływania deformacji przypowierzchniowej warstwy gruntu na obciążenia oraz na pracę złącz i kompensatorów rurociągów budowanych na terenach górniczych, z uwzględnieniem rozproszenia losowego wskaźników deformacji.

2. Oddziaływanie podziemnej eksploatacji górniczej na rurociągi

Oddziaływanie podziemnej eksploatacji górniczej na rurociągi rozpatruje się na kierunku podłużnym i poprzecznym do ich osi. Oddziaływanie przemieszczającego się frontu eksploatacyjnego na przypowierzchniową warstwę gruntu, a tym samym na obiekty w niej zagłębione, można podzielić na trzy fazy: rozluźnianie, zagęszczanie i ponowne rozluźnianie. Na rysunku 1 przedstawiono oddziaływanie eksploatacji na rurociąg o złączach kielichowych, ułożony w wykopie (a) oraz wykonany metodą przeciskową (b).

Front eksploatacyjny, zbliżając się na odległość promienia zasięgu wpływów głównych r do określonego punktu na powierzchni terenu, powoduje rozluźnianie gruntu przypowierzchniowej warstwy w tym miejscu. Odkształcenia rosną od zera do wartości maksymalnej ϵ_{\max} . Dalsze przemieszczanie się frontu eksploatacyjnego powoduje ponowne zagęszczanie gruntu od maksymalnej ϵ_{\max} do minimalnej wartości odkształceń ϵ_{\min} . Zmienia się przy tym ich znak z dodatniego na ujemny. Dalszy postęp eksploatacji powoduje rozluźnianie gruntu. W odległości promienia zasięgu wpływów głównych od stałych krawędzi wybranego złoża, ustala się statyczna niecka obniżeniowa i trwały stan odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu w pasie o szerokości około $2r$.

Wskaźniki deformacji charakteryzują się znacznym rozproszeniem losowym, w związku z czym ich wartości na danym terenie górniczym mogą być znacznie większe od przewidywanych ϵ_{\max} i ϵ_{\min} . Na podstawie przeprowadzonych dla kopalń węgla kamiennego i rud miedzi analiz statystycznych wyników pomiarów odkształceń [7, 9, 10] określono parametry tego rozproszenia. Współczynniki zmienności poziomych odkształceń określono dla standardowych długości baz pomiarowych, wynoszących 25 m. Dla przypadku rozluźniania i zagęszczania gruntu wartości współczynników zmienności odkształceń wynoszą odpowiednio $M_1 = 0,2$ i $M_2 = 0,3$ [9], a według ostatnich badań $M_2 = 0,26$ [10].



Rys. 1. Wpływ eksploatacji górniczej na rurociągi: a) rurociąg układany w wykopie, b) rurociąg wykonany metodą przeciskową, c) profil niecki obniżeniowej
 Fig. 1. Influence of mining on pipelines: a) pipeline lain in excavation, b) pipeline made with push-through method, c) subsiding through profile

Współczynniki zmienności M zależą od długości analizowanych odcinków i dla długości odbiegających od długości standardowej bazy pomiarowej można je obliczyć ze wzoru [9]

$$M(l) = M \sqrt{\frac{l_0}{l}} \quad (1)$$

gdzie:

- M – współczynnik zmienności standardowej bazy pomiarowej, $M = M_r$, $M = M_z$,
- l_0 – długość standardowej bazy pomiarowej, 25 m,
- l – długość rozpatrywanego odcinka rurociągu.

Ekstremalne wartości odkształceń dla rozluźniania ϵ^r i zagęszczania ϵ^z warstwy gruntu, jakie mogą z danym prawdopodobieństwem działać na odcinek rurociągu o długości l , można określić opierając się na wartościach współczynników zmienności $M_r(l)$ i $M_z(l)$ według wzorów

$$\varepsilon^r = \varepsilon[1 + nM_r(l)] \quad (2)$$

$$\varepsilon^z = \varepsilon[1 + nM_z(l)] \quad (3)$$

gdzie:

- ε – średnia wartość ekstremalnych odkształceń,
- n – współczynnik tolerancji, zależny od prawdopodobieństwa nieprzekroczenia wartości ekstremalnych, dla prawdopodobieństwa 0,95 $n = 1,645$,

3. Obciążenia rurociągów na terenach górniczych

Wartość obciążeń rurociągu na terenach górniczych zależy głównie od poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu ε , wywołujących zmiany poziomego parcia gruntu na kierunku poprzecznym i obciążenia styczne na kierunku podłużnym [3, 8]. W przypadku rurociągów o dużych średnicach i małej podłużnej odkształcalności należy uwzględnić również wpływ krzywizny. Ze względu na obciążenia podłużne, rurociągi stalowe o złączach spawanych są dzielone na odcinki, pomiędzy którymi wbudowywane są kompensatory. Rurociągi z tworzyw sztucznych o złączach zgrzewanych ulegają odkształceniom o wartościach równych poziomym odkształceniom warstwy gruntu, które należy uwzględnić w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych. Złącza kielichowe i nasuwkowe nie mogą natomiast przenosić znacznych podłużnych sił rozciągających, a w przypadku braku odpowiednich luzów siły ściskające w czasie zagęszczania gruntu wzdłuż osi rurociągu mogą doprowadzić do ich uszkodzenia. Siły ściskające działające na rury przeciskowe nie przekraczają maksymalnej wartości sił, występujących w czasie wykonywania przecisku.

Poprzeczne obciążenia rurociągów na terenach górniczych zależą od wartości poziomego odkształcenia przypowierzchniowej warstwy gruntu oraz odkształcalności przekroju poprzecznego rur. Obciążenie poziome przekroju rur można ogólnie określić według wzoru

$$\sigma_{22} = \xi \sigma_{11} \quad (4)$$

gdzie:

- ξ – współczynnik rozporu bocznego gruntu,
- σ_{11} – obciążenie pionowe rurociągu.

Rozluźnianie warstwy gruntu przy odkształceniach rzędu 2–3 mm/m [7, 8] powoduje wystąpienie wokół rur o małej odkształcalności czynnego stanu granicznego. Rozluźnianie gruntu wokół rur odkształcalnych powoduje zmniejszenie początkowego oporu gruntu,

wywołanego ich odkształcalnością. W obu przypadkach obciążenie poziome rurociągu jest wtedy mniejsze od obciążenia początkowego, powodując zwiększenie nierównomierności obciążeń rur.

Zagęszczanie powoduje zwiększenie parcia gruntu na ścianki rurociągów. Wartość tego parcia może osiągnąć nawet wartość parcia biernego, które występuje w gruntach niespoistych przy odkształceniach o wartościach większych od 30 mm/m [7, 8]. Zmienność współczynnika rozporu bocznego ξ gruntu niespoistego dla odkształceń mniejszych od krytycznych, od których występuje bierny stan graniczny, opisuje zależność [2, 6, 7]

$$\xi = \xi_z - (\xi_z - \xi_0) \left(1 - \frac{k_0 \varepsilon}{\varepsilon_{kr}^z} \right)^m \quad (5)$$

gdzie:

- ξ_z – współczynnik rozporu gruntu w biernym stanie granicznym,
- ξ_0 – współczynnik rozporu gruntu w spoczynku,
- k_0 – współczynnik koncentracji odkształceń przy ściankach rurociągu,
- ε – średnia wartość odkształcenia warstwy gruntu przy zagęszczaniu,
- ε_{kr}^z – odkształcenie krytyczne przy zagęszczaniu gruntu,
- m – współczynnik doświadczalny, dla gruntu niespoistego średnio $m = 3,1$.

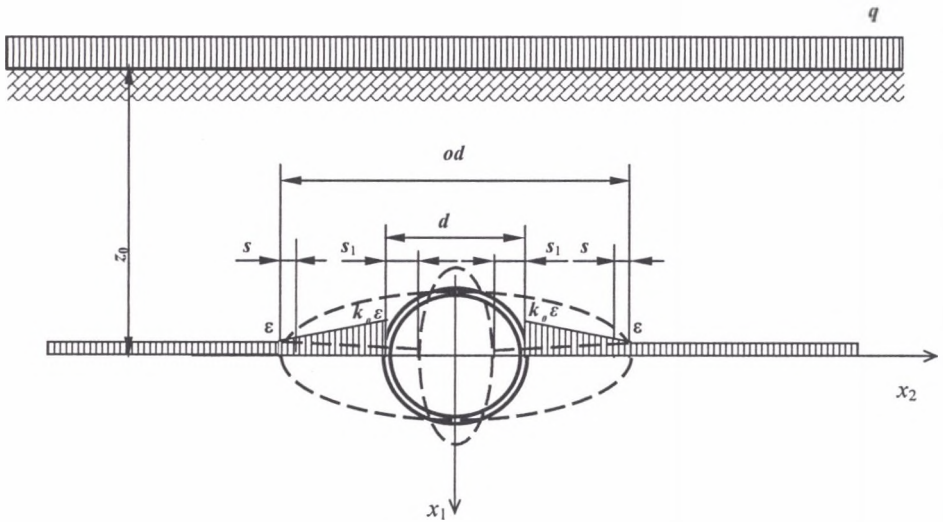
W strefie bezpośrednio przylegającej do ścian rurociągów o małej odkształcalności dochodzi do koncentracji odkształceń gruntu, które charakteryzuje współczynnik $k_0 \geq 1,0$ [4, 8]. W strefie gruntu bezpośrednio przylegającej do ścianek rurociągów odkształcalnych, na skutek przemieszczania ich ścianek pod naporem gruntu, odkształcenia są mniejsze od odkształceń wokół rurociągów mało odkształcalnych. Odkształcenia te dla rurociągów o dużej odkształcalności mogą być mniejsze od odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu ε , wywołanych podziemną eksploatacją, wtedy $k_0 \leq 1,0$. Współczynnik ten można określić z zależności [2]

$$k_0 = \frac{o+1}{o-1} - \frac{2\alpha_1}{o-1} \quad (6)$$

gdzie:

- o – wielokrotność średnicy rury,
- α_1 – ugięcie przekroju rury przypadające na jednostkę odkształcenia gruntu.

Stan odkształceń gruntu wokół przekroju poprzecznego rurociągów przedstawiono na rysunku 2. Linia przerywaną zaznaczono stan odkształcenia wokół rur odkształcalnych.



Rys. 2. Poziome odkształcenia gruntu wzdłuż osi poziomej przekroju rury
 Fig. 2. Distribution of horizontal ground strains along an axis of pipe intersection

Przy obliczaniu parcia gruntu na rurociąg należy przyjmować ekstremalną wartość poziomych odkształceń ϵ , jaka z określonym prawdopodobieństwem może działać na jego ścianki. Przy założeniu, że obciążenie pionowe σ_{11} rurociągu nie ulega zmianie, maksymalną wartość parcia można obliczyć ze wzoru [1]

$$\sigma_{22} = \bar{\sigma}_{22} + n s_{\sigma_{22}} = \xi \sigma_{11} + n s_{\sigma_{22}} \quad (7)$$

gdzie:

n – współczynnik tolerancji,

$s_{\sigma_{22}}$ – odchylenie standardowe poziomego obciążenia rury.

Odchylenie standardowe funkcji złożonej określa ze wzoru ogólnego [1]

$$s_M \approx \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 s_{x_i}^2} \quad (8)$$

Odchylenie standardowe poziomego obciążenia rurociągu określone według wzoru (8), przy założeniu, że obciążenie pionowe nie ulega zmianie, a współczynniki rozporu gruntu są stałe, można przedstawić w postaci

$$s_{\sigma_{22}} \approx -(\xi_z - \xi_0) m \left(1 - \frac{k_0 \epsilon}{\epsilon_{kr}^z} \right)^{m-1} \left(-\frac{k_0}{\epsilon_{kr}^z} \right) s_\epsilon \sigma_{11} = m \frac{k_0}{\epsilon_{kr}^z} (\xi_z - \xi_0) \left(1 - \frac{k_0 \epsilon}{\epsilon_{kr}^z} \right)^{m-1} M_z \epsilon \sigma_{11} \quad (9)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorach od (1) do (7).

3. Analiza pracy złącz rurociągów

W celu zapewnienia niezawodności [5] rurociągów na kierunku podłużnym należy określić zakres przemieszczeń końców rur w złączach lub kompensatorach, jakie mogą wystąpić na terenach górniczych, uwzględniając nie tylko przeciętną wartość ekstremalnych odkształceń warstwy gruntu, ale także ich rozproszenie losowe. Wartość odkształceń, jaka może oddziaływać na złącze rurociągu, oblicza się ze wzorów (2), (3) i (1).

Końce rur w złączach przewodów układanych w otwartych wykopach, podobnie jak w kompensatorach, są ustawiane z odpowiednim minimalnym rozsunieniem, wynikającym z przemieszczania rur w fazie zagęszczania gruntu, które może być obliczone ze wzoru [3]

$$\Delta l_z = \bar{\Delta l}_z [1 + nM_{\Delta l_z}(l)] = \varepsilon l [1 + nM_z(l)] \quad (10)$$

gdzie:

$\bar{\Delta l}_z$ – średnia, początkowa odległość końców rur, $\bar{\Delta l}_z = \varepsilon l$

ε – średnia wartość ekstremalnego odkształcenia gruntu w czasie zagęszczania,

l – średnia długość rur,

n – współczynnik tolerancji zależny od prawdopodobieństwa nieprzekroczenia wartości ekstremalnych,

$M_{\Delta l_z}$ – współczynnik zmienności,

$M_z(l)$ – współczynnik zmienności odkształceń przy zagęszczaniu gruntu odcinka o długości l różnej od standardowej bazy pomiarowej l_0 , według wzoru (1).

Rozkład zmiennej losowej będącej iloczynem niezależnych zmiennych losowych ε i l o rozkładach normalnych jest niesymetryczny, jednak w obliczeniach technicznych można założyć rozkład normalny tej zmiennej. Współczynnik zmienności jest wtedy równy [1]

$$M_{\Delta l_z} = \sqrt{M_z^2(l) + M_z^2(l)M_l^2 + M_l^2} \approx M_z(l) \quad (11)$$

Współczynnik zmienności długości produkowanych rur jest mały w porównaniu ze współczynnikiem zmienności odkształceń gruntu i na ogół nie przekracza wartości 0,02, a więc współczynnik zmienności rozpatrywanego iloczynu jest w przybliżeniu równy współczynnikowi zmienności odkształceń.

Podczas rozluźniania gruntu końce rur ulegną rozsunieniu od położenia początkowego o wartość Δl_r . Maksymalna wartość tego rozsunienia może być obliczona według wzoru

$$\Delta l_r = \bar{\Delta l}_r [1 + nM_{\Delta l_r}(l)] = \varepsilon l [1 + nM_r(l)] \quad (12)$$

gdzie:

ε – średnia wartość ekstremalnego odkształcenia gruntu podczas rozluźniania,

M_{Δ_r} – współczynnik zmienności,

$M_r(l)$ – współczynnik zmienności odkształceń przy rozluźnianiu gruntu dla odcinka o długości l różnej od standardowej bazy pomiarowej l_0 , według wzoru (1).

Współczynnik zmienności przy rozluźnianiu jest również w przybliżeniu równy współczynnikowi zmienności odkształcenia gruntu

$$M_{\Delta_r} = \sqrt{M_r^2(l) + M_r^2(l)M_l^2 + M_l^2} \approx M_r(l) \quad (13)$$

Maksymalna odległość między końcami rur lub bosym końcem a dnem kielicha, jaka może wystąpić z uwagi na poziome odkształcenia gruntu na terenach górniczych, wynosi

$$\Delta l = \overline{\Delta l} [1 + nM_{\Delta_r}(l)] = (\overline{\Delta l}_r + \overline{\Delta l}_z) [1 + nM_{\Delta_r}(l)] \quad (14)$$

gdzie współczynnik zmienności sumy $\overline{\Delta l}_r + \overline{\Delta l}_z = 2\varepsilon l$ jest równy [3]

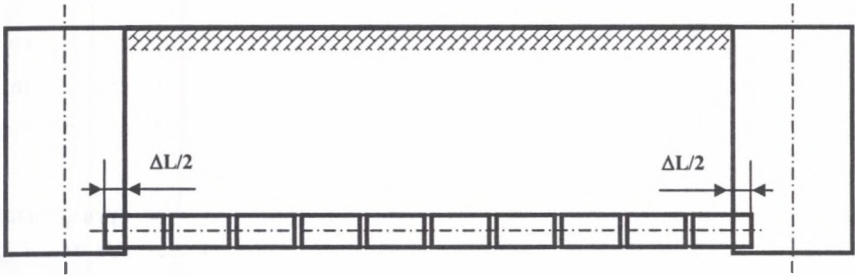
$$M_{\Delta_r}(l) = \frac{\sqrt{M_r^2(l)\overline{\Delta l}_r^2 + M_z^2(l)\overline{\Delta l}_z^2}}{\overline{\Delta l}_r + \overline{\Delta l}_z} \approx \frac{\sqrt{M_r^2(l) + M_z^2(l)}}{2} \quad (15)$$

Złącza rur oraz kompensatory wbudowane w rurociągi na terenach górniczych powinny zapewnić ich właściwą odporność na poziome odkształcenia przypowierzchniowej warstwy gruntu, zachowując przy tym niezbędny zapas ich niezawodności. Minimalna losowa odporność złącza lub kompensatora Δl_0 na poziome odkształcenia warstwy gruntu, a więc minimalna długość jego przestrzeni roboczej, powinna spełniać warunek

$$\Delta l_0 \geq 2\varepsilon l \left[1 + n \frac{\sqrt{M_r^2(l) + M_z^2(l)}}{2} \right] \quad (16)$$

W przypadku rurociągów budowanych metodą przeciskową, końce rur w złączach stykają się ze sobą. Dla zapewnienia prawidłowej pracy takiego rurociągu na terenach górniczych należy wydłużyć jego złącza do takiej samej długości, jaka jest przyjmowana dla rurociągów układanych w wykopach. Różnica w pracy rurociągów zbudowanych metodą przeciskową zachodzi przy ujawnianiu się wpływów pierwszej eksploatacji górniczej, co przedstawiono na rysunku 1b. Wpływy te podczas rozluźniania warstwy gruntu spowodują rozsunięcie końców rur w złączu na odległość Δl_r , wynikającą z wydłużenia odcinka równego długości rury. Zagęszczanie gruntu spowoduje powrót końców rur do stanu początkowego, w którym ich czoła znowu stykają się ze sobą i wystąpienie podłużnych sił ściskających, jednak rury te są dostosowane do przenoszenia tych sił. Ponowne rozluźnianie gruntu spowoduje rozsunięcie końców rur i po przejściu pierwszej eksploatacji w złączu pozostanie luz równy początkowemu rozsunięciu Δl_z rur układanych w wykopach. Ponadto na skutek utworzenia się trwałych luzów w złączach tych rurociągów nastąpi wydłużenie

odcinka między dwoma sąsiednimi studniami [4]. Wywoła to trwałe przemieszczenie końców skrajnych rur do środka studni kanalizacyjnych, co przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Odcinek rurociągu przeciskowego między studniami kanalizacyjnymi po przejściu pierwszej eksploatacji górniczej

Fig. 3. Section of lying between sink basins, pushed-through pipeline after conducting first mining run

Suma przemieszczeń końców skrajnych rur będzie równa sumie luzów, jakie powstaną w poszczególnych złączach tego odcinka. Maksymalną wartość sumy tych przemieszczeń można określić według wzoru [3]

$$\Delta L = \overline{\Delta L} + ns_{\Delta L} = \overline{\Delta L}_z (z + nM_z(l)\sqrt{z}) \quad (17)$$

gdzie:

- z – liczba złącz odcinka rurociągu między studniami kanalizacyjnymi,
- $\overline{\Delta L}_z$ – wartość średniego luzu powstałego w złączu,
- n – współczynnik tolerancji,
- $M_z(l)$ – współczynnik zmienności odkształceń przy zagęszczaniu gruntu dla odcinka o długości l różnej od standardowej bazy pomiarowej l_0 .

3. Wnioski

Przedstawiona analiza oddziaływania deformacji podłoża na rurociągi, wywołanych wpływami eksploatacji górniczej, pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Niezawodność rurociągu posadowionego w przypowierzchniowej warstwie gruntu, rozumiana jako prawdopodobieństwo jego bezawaryjnej pracy na terenach górniczych, zależy od właściwie określonych maksymalnych wartości parcia gruntu na jego ścianki oraz minimalnych długości złącz nasuwkowych lub kompensatorów.

2. Parcie gruntu na rurociąg zależy od poziomych odkształceń ϵ , których wyznaczoną z określonym prawdopodobieństwem ekstremalną wartość należy przyjmować do obliczeń obciążenia jego ścianek.
3. Minimalna długość stosowanych na terenach górniczych złącz nasuwkowych i kompensatorów powinna być określana z odpowiednim prawdopodobieństwem przy uwzględnieniu wartości współczynników zmienności odkształceń dla długości rozpatrywanych odcinków rurociągu.
4. Minimalna długość złącz nasuwkowych rurociągów wykonanych metodami przeciskowymi na terenach górniczych powinna być taka sama, jak w przypadku rurociągów układanych w wykopach. Po przejściu pierwszej eksploatacji górniczej w złączach takiego rurociągu powstaną luzy, co przejawia się trwałym przemieszczeniem skrajnych rur do studzienek kanalizacyjnych.

LITERATURA

1. Biegus A.: Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. PWN, Warszawa–Wrocław 1999.
2. Kalisz P.: Wpływ eksploatacji górniczej na obciążenia poprzeczne rurociągów podziemnych z tworzyw sztucznych. GIG, Katowice 2001 (rozprawa doktorska).
3. Kalisz P.: Probabilistyczna analiza oddziaływania eksploatacji górniczej na rurociągi wykonane metodą przeciskową. Praca zbiorowa pod red. prof. J. Kwiatka. VIII Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych. GIG, Katowice 2005.
4. Kowalczyk A.: Badanie możliwości stosowania na terenach górniczych kanalizacyjnych rur przeciskowych. Prace GIG niepublikowane, Katowice 2002.
5. Kwietniewski M., Kłoss-Trębaczewicz H., Roman M.: Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Arkady, Warszawa 1993.
6. Kwiatek J. i inni: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. GIG, Katowice 1997.
7. Kwiatek J.: Podstawy budownictwa na terenach górniczych. UWND AGH, Kraków 2004.
8. Mokrosz R.: Wprowadzenie do mechaniki budowli liniowych zagłębionych w gruncie na terenach górniczych. Zakład Narodowy im. Ossolińskich–PAN, Wrocław 1985.
9. Popiołek E.: Rozproszenie statystyczne odkształceń poziomych terenu w świetle geodezyjnych obserwacji skutków eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe AGH Geodezja z. 44, Kraków 1976.
10. Stoch T.: Wpływ warunków geologiczno-górniczych eksploatacji złoża na losowość procesu przemieszczeń i deformacji powierzchni terenu. AGH, Kraków 2005 (rozprawa doktorska).