

## Oddziaływanie wstrząsów górniczych na gazociągi

### Impact of mining tremors on gas pipelines



Dr inż. Piotr Kalisz\*)



Dr hab. inż. Krystyna Stec, prof. GIG\*)

**Treść:** Na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego znaczna część sieci gazowej jest poddawana oddziaływaniu wstrząsów górotworu, związanych z eksploatacją górnictwa. Sieć ta jest zbudowana z rurociągów polietylenowych i stalowych. W artykule przedstawiono analizę oddziaływania fal sejsmicznych na elementy sieci gazowej dla oceny ich odporności dynamicznej. Przedstawiono również przykład oceny oddziaływania silnego wstrząsu górotworu, wywołanego podziemną eksploatacją górnictwa, na gazociąg stalowy.

**Abstract:** In the Upper Silesian Coal Basin a significant part of the gas network is subjected to the impact of mining rock mass tremors. This network is made of polyethylene and steel pipelines. The article presents the impact analysis of seismic waves on the gas network elements to their dynamic resistance evaluation. An example of impact assessment of strong mining tremor on the steel gas pipeline was also presented.

#### Słowa kluczowe:

wstrząsy górnicze, gazociągi, ocena oddziaływania

#### Key words:

mining tremors, gas pipelines, impact assessment

### 1. Wprowadzenie

Występujące w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW) wstrząsy górotworu są zjawiskami dynamicznymi, będącymi następstwem podziemnej eksploatacji górnictwa, powstającymi w wyniku gwałtownego przemieszczania, bądź pęknięcia lub załamania się warstw skalnych. Poziom intensywności i energii górnictwa zjawisk sejsmicznych w GZW jest bardzo zróżnicowany, od słabych niewyczuwalnych przez ludzi, do bardzo silnych, które mogą powodować określone szkody w istniejącej infrastrukturze powierzchniowej. Wieloletnie pomiary i badania wskazują na bimodalność wstrząsów górotworu, tzn. na występowanie wstrząsów o charakterze czysto eksploatacyjnym oraz wstrząsów o charakterze tektonicznym, nazywanych powszechnie regionalnymi. Wstrząsy regionalne są związane z istnieniem podwyższonych naprężeń w skorupie ziemskiej, np. naprężeń tektonicznych w rejonie większych uskoków i sumowaniem się z nimi naprężeń związanych z eksploatacją górnictwa

w skali większego rejonu (np. obszaru górnictwa kilku kopalń). Wstrząsy regionalne są to wstrząsy o wysokich energiach rzędu  $10^8$  -  $10^9$  J i występują w obszarze GZW rzadko (jeden do kilku na rok), natomiast wstrząsy eksploatacyjne są zjawiskami o niższych energiach rzędu  $10^2$  -  $10^7$  J, których częstotliwość występowania osiąga wartość nawet kilka tysięcy rocznie. Wstrząsy eksploatacyjne generowane są głównie przez naprężenia eksploatacyjne i są lokalizowane w stosunkowo bliskim otoczeniu wyrobisk górnictwa.

Do prognozy i oceny skutków oddziaływania wstrząsów górotworu związanych z podziemną eksploatacją górnictwa na obiekty powierzchni i ludzi służą Górnictwa Skale Intensywności Drgań (Mutke i in. 2012). Skale te mogą być wykorzystywane również do oceny odporności istniejących obiektów kubaturowych oraz sieci uzbrojenia podziemnego na drgania podłoża o parametrach zdefiniowanych według poszczególnych stopni intensywności.

Zagadnienie oddziaływania drgań podłoża na gazociągi stalowe było przedmiotem badań (Dulińska 2010, Mutke, Tarnowski 2005), w których analizowano wpływ drgań o para-

\*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

metrach występujących w GZW oraz Legnicko-Głogowskim Zagłębiu Miedziowym (LGOM) na konstrukcję prostego odcinka przewodu. Analiza oddziaływania drgań podłoża na gazociągi oraz ocena ich odporności dynamicznej ma duże znaczenie praktyczne, szczególnie w przypadku starszych gazociągów stalowych na terenach zabudowanych (Jachim, Kalisz 2010). Dlatego problem ten ma istotne znaczenie z uwagi na bezpieczeństwo mieszkańców oraz innych użytkowników powierzchni.

## 2. Ogólna charakterystyka sieci gazowej w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym

Sieć gazowa na terenie GZW jest złożona z rozbudowanego systemu rurociągów stalowych i polietylenowych, pracujących pod różnym ciśnieniem roboczym (Rozporządzenie 2013). W Polsce, pod względem maksymalnego ciśnienia roboczego, gazociągi dzielą się na:

- gazociągi niskiego ciśnienia - do 10 kPa włącznie,
- gazociągi średniego ciśnienia - powyżej 10 kPa do 0,5 MPa włącznie,
- gazociągi podwyższonego średniego ciśnienia - powyżej 0,5 MPa do 1,6 MPa włącznie,
- gazociągi wysokiego ciśnienia - powyżej 1,6 MPa.

Sieć gazowa w zasięgu oddziaływania wstrząsów górotworu na terenie GZW jest zbudowana z dwóch rodzajów rur:

- wykonanych ze stali, łączonych przez spawanie,
- wykonanych z polietylenu, łączonych przez zgrzewanie.

Na terenach górniczych gazociągi stalowe o średnicach 80 mm i większych zabezpieczano kompensatorami przed ciągłymi deformacjami przypowierzchniowej warstwy górotworu. Kompensatory rozmieszczano co kilkadziesiąt metrów. Gazociągi o mniejszych średnicach i przyłącza do budynków takich zabezpieczeń nie posiadają.

Od początku lat 90. XX wieku do budowy gazociągów niskiego i średniego ciśnienia są stosowane rury polietylenowe, wcześniej były stosowane tylko rury stalowe. Gazociągi stalowe występujące na terenach górniczych charakteryzują się dość często złym stanem technicznym i wysoką awaryjnością. Awarie są niekiedy powodowane wstrząsami górnymi. Nowsze gazociągi niskiego i średniego ciśnienia są

zbudowane z rur wykonanych z polietylenu, które można stosować do budowy gazociągów o ciśnieniu nominalnym do 1,0 MPa. Gazociągi polietylenowe dzięki swej elastyczności nie są na terenach górniczych zabezpieczane kompensatorami (Barczyński i in. 2006). Ze względu na obowiązujące Rozporządzenie (2013) gazociągi średniego podwyższonego ciśnienia o ciśnieniu nominalnym 1,0÷1,6 MPa i wysokiego ciśnienia są budowane wyłącznie z rur stalowych.

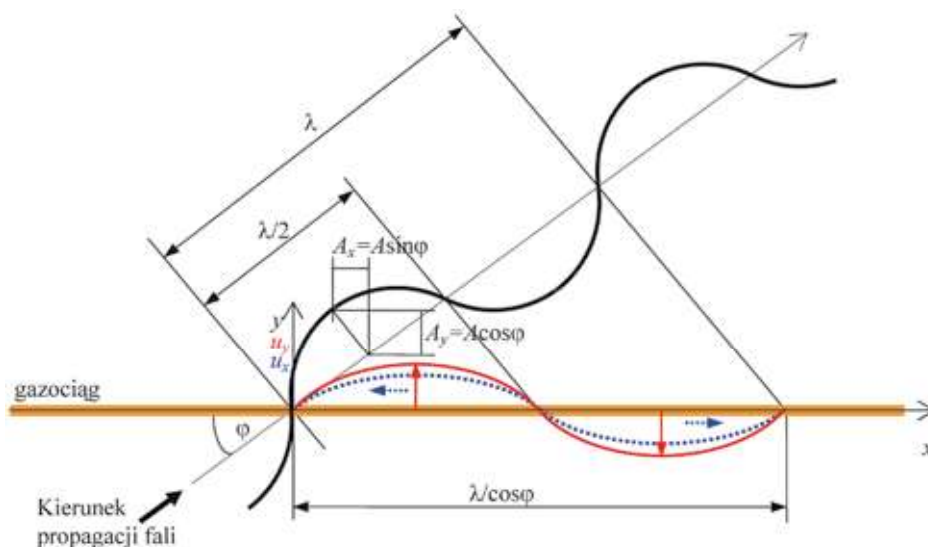
## 3. Oddziaływanie wstrząsów górotworu na gazociągi

Wstrząsy górotworu powodują drgania przypowierzchniowej warstwy gruntu, w której są posadowione gazociągi, stanowiące obiekty liniowe. Fale sejsmiczne rozchodzące się w tej warstwie z różnymi prędkościami (Siata 2004) oddziałują na obiekty liniowe, co przedstawiono na rys. 1.

Fale sejsmiczne mogą wywoływać w gazociągach:

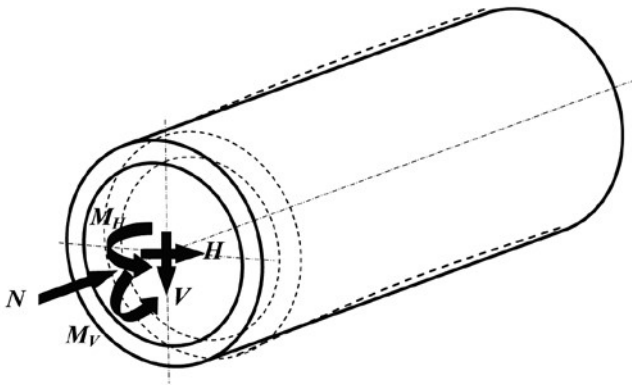
- podłużne odkształcenia oraz podłużne siły rozciągające i ściskające (rys. 2),
- krzywizny i momenty zginające (rys. 2),
- odkształcenia postaciowe i siły ścinające (rys. 2),
- dodatkowe siły i momenty zginające działające na załomy (rys. 3) i trójniki,
- przemieszczenia.

Oceny wpływu drgań sejsmicznych i parasejsmicznych na obiekt liniowy zagłębiony w gruncie dokonuje się na podstawie analizy odkształceń i naprężeń w jego ściankach. Analiza ta jest oparta często na teorii propagacji fali w jednorodnym, izotropowym ośrodku sprężystym. Pomija się interakcje między tym obiektem a ośrodkiem gruntowym, przyjmując założenie, że ulega on takim samym odkształceniom i przemieszczeniom jak grunt, którym jest on otoczony (Chen 1995, Hashash i in. 2001). Takie założenie jest prawdziwe dla podatnych (odkształcalnych) obiektów liniowych, którymi są gazociągi polietylenowe. Założenie to może też być wykorzystywane do wstępnej oceny wpływu drgań ośrodka gruntowego na obiekty liniowe o małej podatności, którymi są gazociągi stalowe. W bardziej zaawansowanych analizach dla obiektów liniowych o małej podatności uwzględnia się interakcję między drgającym podłożem a obiektem (Hashash



Rys. 1. Oddziaływanie fal sejsmicznych na obiekt liniowy, na podstawie (Hashash i in. 2001, John, Zahrah 1984)

Fig. 1. Impact of seismic waves on a linear object, on the basis of (Hashash i in. 2001, John, Zahrah 1984)



Rys. 2. Skutki oddziaływania drgań gruntu w obiekcie liniowym: siła podłużna  $N$ , siły ścinające - pionowa  $V$  i pozioma  $H$ , momenty zginające - pionowy  $M_V$  i poziomy  $M_H$

Fig. 2. Effects of ground vibrations in a linear object: longitudinal force  $N$ , shear forces - vertical  $V$  and horizontal  $H$ , bending moments - vertical  $M_V$  and horizontal  $M_H$

i in. 2001, O'Rurke, Liu 1999). Maksymalne odkształcenia podłużne, wywołane falami sejsmicznymi, są ograniczone do odkształceń powodowanych maksymalną wartością siły stycznej działającej na jego powierzchnię zewnętrzną (Ogawa, Koike 2001).

Z uwagi na analizę oddziaływania wstrząsów górotworu na istniejącą na terenach górniczych sieć gazową wyróżnia się:

- gazociągi o konstrukcji ciągłej - stalowe o złączach spawanych (bez kompensatorów), polietylenowe o złączach zgrzewanych,
- gazociągi o konstrukcji odcinkowej - stalowe o złączach spawanych, z kompensatorami.

### Gazociągi o konstrukcji ciągłej

Oddziaływanie fal sejsmicznych powoduje odkształcenia i krzywizny obiektu liniowego, jakim jest gazociąg o konstrukcji ciągłej. Zakładając, że ulega on takim samym odkształceniom i przemieszczeniom jak ośrodek gruntowy, wartość odkształceń wywołanych oddziaływaniem fal podłużnych  $P$  o dowolnym kierunku propagacji do jego osi można obliczyć ze wzorów (Hashash i in. 2001, John, Zahrah 1984):

- odkształcenie podłużne

$$\varepsilon_{ip} = \frac{v_p}{c_p} \cdot \cos^2 \varphi + \frac{(D/2)a_p}{c_p^2} \cdot \sin \varphi \cdot \cos^2 \varphi \quad (1)$$

- odkształcenie postaciowe

$$\gamma = \frac{v_p}{c_p} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

gdzie:

- $v_p$  - amplituda prędkości fali podłużnej,
- $c_p$  - prędkość propagacji fali podłużnej,
- $a_p$  - amplituda przyspieszenia drgań fali podłużnej,
- $\varphi$  - kąt między kierunkiem propagacji fali a osią obiektu liniowego,
- $D$  - zewnętrzna średnica obiektu.

Wartość odkształceń podłużnych i postaciowych obiektu liniowego, wywołanych falami poprzecznymi  $S$  o dowolnym kierunku propagacji do jego osi, można obliczyć ze wzorów (Hashash i in. 2001, John, Zahrah 1984):

- odkształcenie podłużne

$$\varepsilon_{is} = \frac{v_s}{c_s} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi + \frac{(D/2)a_s}{c_s^2} \cdot \cos^3 \varphi \quad (3)$$

- odkształcenie postaciowe

$$\gamma = \frac{v_s}{c_s} \cdot \cos^2 \varphi \quad (4)$$

gdzie:

- $v_s$  - amplituda prędkości fali poprzecznej,
- $c_s$  - prędkość propagacji fali poprzecznej,
- $a_s$  - amplituda przyspieszenia drgań fali poprzecznej.

Znając wartości odkształceń ścianek gazociągu, można obliczyć wartości dodatkowych naprężeń.

Analiza oddziaływania fal sejsmicznych na ciągłe obiekty liniowe o małej podatności powinna uwzględniać wzajemne oddziaływanie między drgającym podłożem a tym obiektem. Na powierzchni kontaktu gruntu z jego powierzchnią zewnętrzną występują siły styczne, które powodują odkształcenia podłużne. Według Shinzouka i Koike (O'Rurke, Liu 1999) wartość ekstremalnych odkształceń podłużnych  $\varepsilon_p$ , wywołanych w rurociągach może być obliczona ze wzoru

$$\varepsilon_p = \beta \varepsilon_1 \quad (5)$$

gdzie  $\beta$  jest współczynnikiem konwersji, którego wartość dla małych odkształceń gruntu wywołanych wstrząsami górnymi można obliczyć ze wzoru

$$\beta = 1 / \left[ 1 + \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{AE}{K_u} \right] \quad (6)$$

gdzie:

- $K_u$  - współczynnik podatności gruntu w kierunku podłużnym rurociągu, na jednostkę długości,
- $A$  - pole przekroju poprzecznego rurociągu,
- $E$  - moduł sprężystości materiału rurociągu,
- $\lambda$  - długość fali,  $\lambda = c_s / f$ ,
- $f$  - dominująca częstotliwość drgań.

Dla rurociągu o małej podatności i ciągłej konstrukcji wartość siły podłużnej  $N$  wynika z wartości sił stycznych, działających na jego powierzchnię zewnętrzną na  $1/4$  długości fali  $\lambda / \cos \varphi$  wzdłuż jego osi. Wartość ta może być obliczona ze wzoru

$$N = t \cdot (\lambda / \cos \varphi) / 4 \quad (7)$$

gdzie:

- $t$  - siła styczna działająca na jednostkę długości rurociągu,  $t \leq t_u$
- $t_u$  - graniczna siła styczna działająca na jednostkę długości rurociągu.

Wartość ekstremalnych momentów zginających  $M$  działających na rurociąg, wywołanych krzywiznami podłoża, można obliczyć ze wzoru (Kwiatkiewicz 2007)

$$M = KEI \quad (8)$$

gdzie:

- $K$  - krzywizna podłoża wywołana falami sejsmicznymi,
- $I$  - moment bezwładności przekroju poprzecznego rurociągu.

Znając wartość maksymalnej siły osiowej i momentów zginających, działających na gazociąg, można obliczyć dodatkowe wartości naprężeń podłużnych w jego ściankach.

### Gazociągi o konstrukcji odcinkowej

W przypadku gazociągów stalowych o konstrukcji odcinkowej (segmentowej), wyposażonych w kompensatory, oddziaływanie drgań podłoża powoduje:

- przemieszczenia podłużne segmentów,
- siły podłużne i odkształcenia segmentów,
- odchylenia kątowe i wygięcia segmentów, wywołane krzywizną podłoża.

Rozciąganie lub ściskanie przypowierzchniowej warstwy gruntu na kierunku podłużnym powoduje względne przemieszczenie  $\Delta u$  segmentów rurociągu (O'Rurke, Liu 1999), które można obliczyć ze wzoru

$$\Delta u = \varepsilon_{\text{ekstr}} L \quad (9)$$

gdzie:

$\varepsilon_{\text{ekstr}}$  – ekstremalne odkształcenie gruntu wywołane falami sejsmicznymi,

$L$  – długość odcinka rurociągu między kompensatorami.

Przemieszczenie  $\Delta u$  nie może być większe od aktualnej zdolności dylatacyjnej kompensatora.

Krzywizny podłoża mogą wywołać odchylenia segmentów rurociągu o kąt  $\Delta\theta$ , którego maksymalna wartość może być obliczona ze wzoru

$$\Delta\theta = K_{\text{ekstr}} L \quad (10)$$

gdzie  $K_{\text{ekstr}}$  jest ekstremalną krzywizną podłoża, wywołaną falami sejsmicznymi o amplitudzie przyspieszenia drgań  $a$  i prędkości propagacji  $c$ ,  $K_{\text{ekstr}} = a/c^2$ . Wartości kąta  $\Delta\theta$  wywołane wstrząsami górnymi są w przypadku gazociągów pomijalne, tym bardziej, że odcinki między kompensatorami ulegają wygięciu wskutek krzywizny podłoża. Wygięcie to powoduje na ogół niewielkie dodatkowe odkształcenia ich ścianek, co uwzględnione jest we wzorach (1) i (3).

Podłużne siły osiowe powodują odkształcenia segmentów gazociągu między kompensatorami. Siły te osiągną wartości nie większe niż suma sił stycznych z połowy ich długości segmentów (Mokrosz 1985), co nastąpi gdy  $\frac{1}{2}L \leq \frac{1}{4}\lambda/\cos\phi$ .

#### Załomy

Oddziaływanie drgań ośrodka gruntowego na załomy powoduje przemieszczenia oraz dodatkowe siły i momenty zginające, działające na jego elementy konstrukcyjne (rys. 3). *Shinzouka i Koike (O'Rurke, Liu 1999)* zaproponowali do obliczania wartości maksymalnej siły  $S$  i momentu zginającego  $M$  działających na załom oraz ugięcia  $\Delta_1$  elementu 2 załomu (rys. 3) wzory:

$$S = \frac{3\lambda}{8\pi} \cdot \frac{K_g}{\zeta} \cdot \frac{1}{1+Q} \cdot (1-\beta)\varepsilon_{\text{ekstr}} \quad (11)$$

$$M = \frac{S}{3\zeta} \quad (12)$$

$$\Delta_1 = \frac{4\zeta S}{3K_g} \quad (13)$$

gdzie:

$$Q = \frac{3}{16} \cdot \frac{K_g \lambda}{AE\zeta} \quad \zeta = \sqrt[4]{K_g / (4EI)}$$

$K_g$  – współczynnik poprzecznej podatności (sztywności) gruntu (Mokrosz 1985, Zhang i in. 1991).

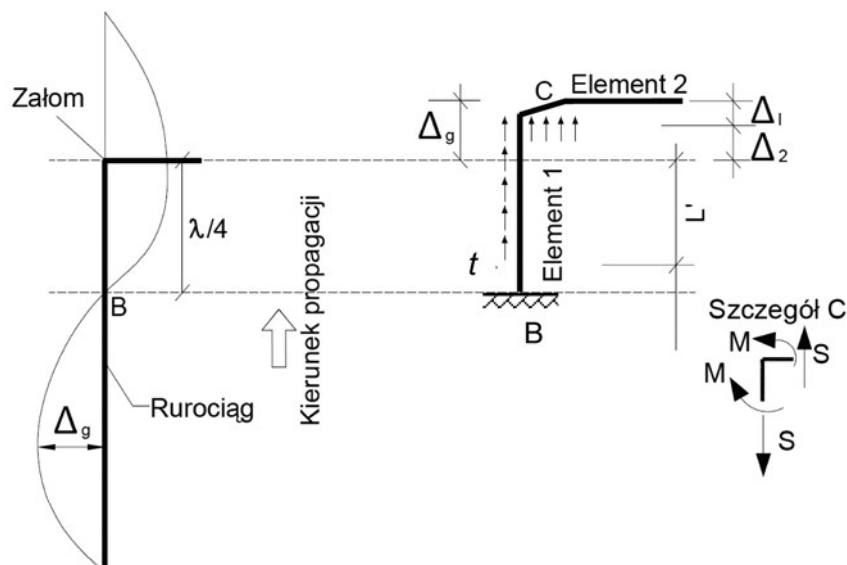
Uzyskane na podstawie obliczeń wartości ekstremalnych sił i momentów zginających służą do obliczeń wytrzymałościowych. Porównanie maksymalnych naprężeń z wytrzymałością materiału oraz maksymalnych odkształceń i przemieszczeń z wartościami dopuszczalnymi pozwala na ocenę oddziaływania wstrząsu oraz ocenę odporności dynamicznej gazociągu.

#### 4. Charakterystyka parametrów drgań powierzchni od wstrząsów górniczych w GZW

W GZW można wyróżnić wstrząsy tak zwane eksploatacyjne i regionalne. Wstrząsy eksploatacyjne z reguły charakteryzują się relatywnie wysokimi przyspieszeniami drgań w strefie epicentralnej i krótkimi czasami trwania, a ich intensywność jest znacząco odczuwalna tylko w strefie epicentralnej. Z kolei wstrząsy regionalne charakteryzują się większą długością fali sejsmicznej (niższymi częstotliwościami drgań fazy dominującej), dłuższymi czasami trwania, wyższymi energiami sejsmicznymi i rozległym obszarem z wysokimi stopniami intensywności drgań. Stopień intensywności wstrząsów regionalnych (czyli odczucia drgań i ich skutki w obiektach budowlanych) jest zwykle większy niż dla wstrząsów eksploatacyjnych.

Prace prowadzone w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach (Dubieński i in. 2008, Mutke, Tataro 2009) pozwoliły na sformułowanie tezy, że dobrą korelację oceny skutków drgań uzyskuje się przy wykorzystaniu parametru amplitudy prędkości drgań oraz czasu ich trwania. Parametr ten ( $PGV_{\text{Hmax}}$ ) jest proporcjonalny do odkształceń i naprężeń występujących podczas wstrząsu w poszczególnych elementach obiektu. Czas trwania ma z kolei znaczący wpływ na wystąpienie drgań rezonansowych.

Uwzględniając przytoczone założenia, określono odpowiednie parametry charakteryzujące drgania, które odniesio-



Rys. 3. Oddziaływanie fali sejsmicznej na załom, na podstawie (O'Rurke, Liu 1999)

Fig. 3. Impact of seismic wave on a bend, on the basis of (O'Rurke, Liu 1999)

ne do opisów skutków wywołanych wstrząsami stanowiły zależności empiryczno-pomiarowej skali makrosejsmicznej  $GSI_{GZW_{KW}}$  (Dubiński i in. 2008). Skala ta umożliwia ocenę intensywności oddziaływania wstrząsów górniczych na budynki, infrastrukturę techniczną i na ludzi. Analiza rodzaju uszkodzeń i pomierzonych w tych miejscach parametrów drgań dla kopalń Kompanii Węglowej S.A. pozwoliła na zmodyfikowanie dotychczasowych granic stopni intensywności opisanych w skali  $GSI_{GZW_{KW}}$  i aktualnie obowiązuje skala  $GSI_{GZW_{KW}}-2012$  (Mutke i in. 2012, Uszko i in. 2013).

Skala  $GSI_{GZW_{KW}}-2012$  jest skalą otwartą i kończy się na IV stopniu intensywności drgań. Pozwala na przybliżoną ocenę wpływu oddziaływania wstrząsów górniczych na obiekty budowlane, w tym liniowe obiekty infrastruktury podziemnej, oraz ocenę odczuwalności wstrząsów przez ludzi i poziomu uciążliwości użytkowania obiektów budowlanych. Przekroczenie granicy stopnia szkodliwości oznacza, że opisane skutki mogą, ale nie muszą wystąpić. Poniżej przedstawiono opis stopni intensywności drgań w skali  $GSI_{GZW_{KW}}-2012$  dla obiektów liniowych.

**Stopień 0** (słabo zauważalne)

**Oddziaływanie drgań na liniowe obiekty infrastruktury podziemnej:**

Drgania nieszkodliwe dla liniowych obiektów podziemnej infrastruktury technicznej.

**Stopień I** (odczuwalne)

**Oddziaływanie drgań na liniowe obiekty infrastruktury podziemnej:**

Drgania nieszkodliwe dla liniowych obiektów podziemnej infrastruktury technicznej. Parametry drgań działających na te obiekty po zaistnieniu wstrząsach są porównywalne do parametrów drgań wywołanych ruchem pojazdów mechanicznych w przypadku usytuowania takich obiektów pod jezdniami (drogami).

**Stopień II** (intensyfikacja istniejących uszkodzeń)

**Oddziaływanie drgań na liniowe obiekty infrastruktury podziemnej:**

W pojedynczych przypadkach drgania mogą być szkodliwe dla liniowych obiektów podziemnej infrastruktury technicznej, szczególnie w starych instalacjach, w miejscu ich łączenia.

**Stopień III** (uszkodzenia niekonstrukcyjne)

**Oddziaływanie drgań na liniowe obiekty infrastruktury podziemnej**

W pojedynczych przypadkach drgania mogą być szkodliwe dla liniowych obiektów podziemnej infrastruktury technicznej, szczególnie w starych instalacjach w miejscu ich łączenia.

**Stopień IV** (uszkodzenia konstrukcyjne)

**Oddziaływanie drgań na liniowe obiekty infrastruktury podziemnej**

Drgania mogą być szkodliwe dla liniowych obiektów podziemnej infrastruktury technicznej, szczególnie w starych instalacjach w miejscu ich łączenia.

W obszarze GZW dla kopalń węglowych ze względu na oddziaływanie na powierzchnię można wyróżnić następujące rodzaje drgań gruntu od wstrząsów sejsmicznych:

- krótkie, wysokoczęstotliwościowe drgania o dużych przyspieszeniach i prędkościach, (drgania pochodzące od wstrząsów eksploatacyjnych),
- dłużej trwające drgania o umiarkowanych przyspieszeniach i prędkościach (ogniska najczęściej oddalone od strefy epicentralnej, mogą to być wysokoenergetyczne wstrząsy eksploatacyjne lub również regionalne),
- drgania występujące w strefach tektonicznych o długich czasach trwania, umiarkowanych przyspieszeniach i dużych prędkościach (drgania pochodzące od tzw. wstrząsów regionalnych podobnych do słabych i płytkich trzęsień ziemi).

Wielkość i charakterystyka drgań od wstrząsów decyduje o ich oddziaływaniu na obiekty budowlane, w tym na obiekty infrastruktury technicznej. Dotychczas po najsilniejszych wstrząsach górotworu nie zaistniały poważne katastrofy budowlane, z reguły występowały uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych w obiektach budowlanych. Taki rodzaj oddziaływania powoduje określone trudności z rozdzieleniem ich od innych wpływów, takich jak drgania parasejsmiczne, oddziaływanie temperatury i wilgoci, naturalne zużycie, a na terenach górniczych występowanie deformacji ciągłych.

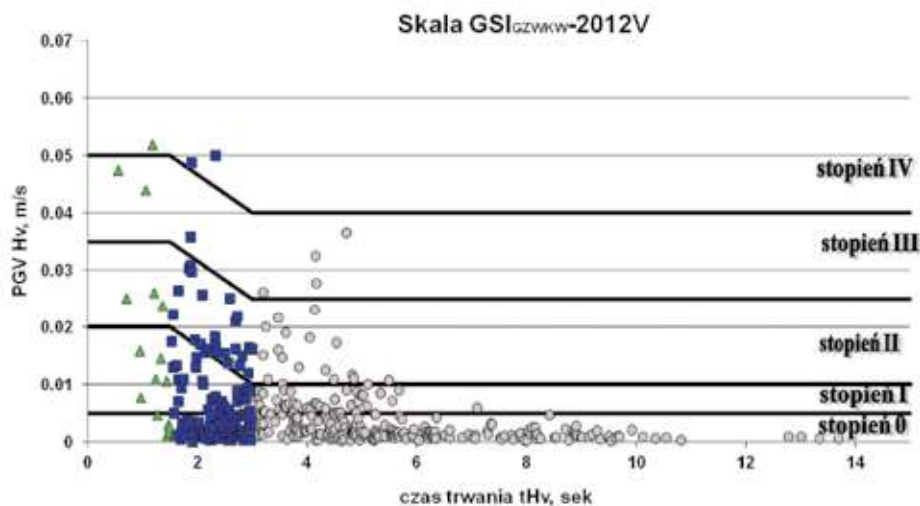
Na obszarze GZW drgania gruntu pochodzące od wstrząsów górotworu są rejestrowane przez kilkadziesiąt powierzchniowych stanowisk sejsmometrycznych. Tworzone są bazy danych, które zawierają parametry sejsmologiczne wstrząsów (data i czas wystąpienia, energia sejsmiczna, lokalizacja ogniska) oraz parametry zarejestrowanych drgań od wstrząsów na poszczególnych powierzchniowych stanowiskach i obliczone wg założeń skali  $GSI$ , takie jak:

- amplituda prędkości i czas trwania drgań z przebiegów prędkościowych,
- amplituda przyspieszenia w paśmie do 10 Hz i czas trwania drgań z przebiegów przyspieszeniowych.

Rysunek 4 przedstawia wyniki obliczeń parametrów drgań dla 78 wysokoenergetycznych wstrząsów zarejestrowanych przez stanowiska sejsmometryczne rozmieszczone w różnych miejscach GZW. W sumie zostało przeanalizowanych 383 rejestracji drgań.

Rys. 4. Zestawienie stopni intensywności drgań według  $GSI_{GZW_{KW}}-2012-V$  dla wstrząsów o energii  $E \geq 5 \cdot 10^6$  J z okresu styczeń 2003 – sierpień 2014

Fig. 4. Summary of vibration intensity levels according to  $GSI_{GZW_{KW}}-2012-V$  for tremors with energy  $E \geq 5 \cdot 10^6$  J within the period January 2003 – August 2014



**Tabela 1. Zakres rejestrowanych parametrów drgań dla wstrząsów z okresu styczeń 2003 – sierpień 2014**  
**Table 1. Range of recorded vibration parameters for mining tremors within the period January 2003 - August 2014**

Parametr	Dolny zakres	Górny zakres
pikowe amplitudy prędkości drgań składowych poziomych, $PGV_{HV}$	0,0001 m/s	0,052 m/s
czas trwania drgań na zapisie prędkościowym	0,5 s	13,7 s
pikowe amplitudy przyspieszenia drgań składowych poziomych, $PGA_{H10}$ , w paśmie do 10 Hz	0,003 m/s <sup>2</sup>	1,522 m/s <sup>2</sup>
czas trwania drgań na zapisie przyspieszeniowym	0,6 s	14 s
energia sejsmiczna analizowanych wstrząsów	$5 \cdot 10^6$ J	$3 \cdot 10^9$ J
odległość epicentralna od stanowisk	46 m	14 526 m

Ogólnie, zakres zarejestrowanych parametrów drgań od wstrząsów jest przedstawiony w tab. 1.

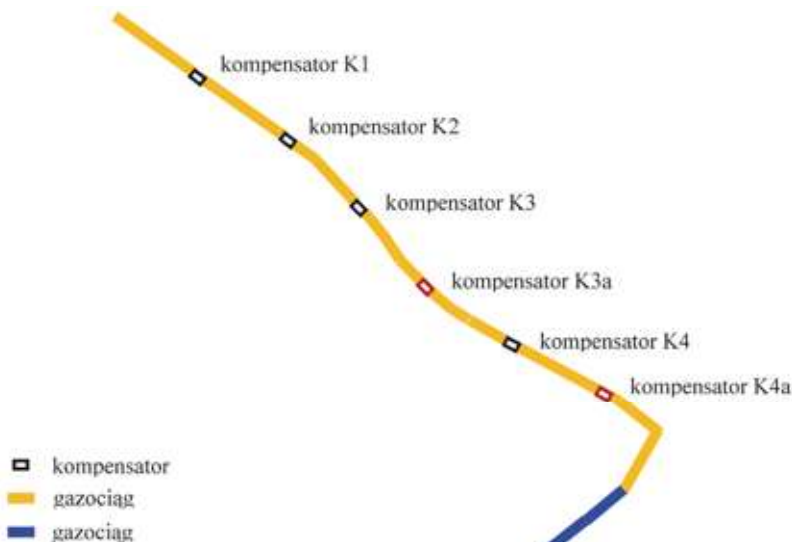
### 5. Przykład analizy oddziaływania silnego wstrząsu górniczego na gazociąg stalowy

Analizę oddziaływania silnego wstrząsu górniczego na rurociągi stalowe przedstawiono na przykładzie gazociągu niskiego ciśnienia DN200, wyposażonego w typowe kompensatory dławikowe. Gazociąg ten, zlokalizowany w południowo-zachodniej części GZW, zbudowano w latach 70. XX wieku z rur stalowych o złączach spawanych o następujących parametrach: średnica zewnętrzna 219,0 mm, grubość ścianki 6,0 mm, materiał stal R35 o wytrzymałości obliczeniowej  $f_d = 210,0$  MPa. Rozpatrywany gazociąg jest posadowiony pod chodnikiem z kostek betonowych, składa się z pięciu odcinków między kompensatorami oraz jednego załomu o kącie załamania wynoszącym blisko  $90^\circ$  (rys. 5). Pozostałe załomy

posiadają kąty mniejsze od  $15^\circ$ . W wykopach kontrolnych stwierdzono dobry stan techniczny rur oraz kompensatorów, a pomierzone odległości między nimi wynoszą od 39,5 m do 46,2 m. Do analizy przyjęto, że maksymalna odległość między kompensatorami nie jest większa niż 50 m.

W rejonie rozpatrywanego gazociągu wystąpił wstrząs o energii  $8 \cdot 10^7$  J, o wysokich parametrach drgań i krótkim czasie trwania (Stec, Barański 2010). Tabela 2 przedstawia zestawienie parametrów drgań gruntu zarejestrowanych na czterech stanowiskach pomiarowych.

Na najbliższym stanowisku sejsmometrycznym położonym w odległości epicentralnej 932 m, maksymalna amplituda prędkości drgań wyniosła 0,052 m/s, a czas trwania wstrząsu 1,16 s oraz maksymalna amplituda przyspieszenia drgań wyniosła 1,245 m/s<sup>2</sup> przy czasie trwania 0,67 s. Zgodnie z aktualnie obowiązującą skalą  $GSI_{GZW}^{GZWKW}$ -2012-V drgania gruntu na tym stanowisku odpowiadały IV stopniowi intensywności. Na pozostałych stanowiskach zarejestrowane drgania gruntu charakteryzowały się mniejszą intensywnością w zakresie II, I oraz 0 stopnia.



**Rys. 5. Schemat analizowanego odcinka gazociągu DN200**  
**Fig. 5. Draft of the DN200 gas pipeline section**

**Tabela 2. Parametry drgań gruntu od wstrząsu o energii  $8 \cdot 10^7$  J**  
**Table 2. Ground vibration parameters caused by mining tremor with energy  $8 \cdot 10^7$  J**

Stanowisko	Odległość, m	Prędkość				Przyspieszenie			
		$V_{max}$ , m/s	$V_{GSI-GZW}$ , m/s	Czas trwania, s	Stopień I	$A_{max}$ , m/s <sup>2</sup>	$A_{GSI-GZW}$ , m/s <sup>2</sup>	Czas trwania, s	Stopień I
A	932	0,052	0,052	1,16	IV	1,500	1,245	0,67	IV
B	1224	0,021	0,021	2,69	II	0,870	0,615	1,28	II
C	1973	0,006	0,006	3,58	I	0,230	0,164	3,14	I
D	2635	0,002	0,003	4,57	0	0,064	0,064	3,75	0

Przy założeniu możliwości oddziaływania parametrów drgań o najwyższych zarejestrowanych wartościach przeprowadzono analizę statyczno-wytrzymałościową i kinematyczną gazociągu w oparciu o obliczenia kontrolne dla wytypowanych elementów – odcinka prostego o przyjętej długości 50 m oraz odcinka załamane w planie o kącie  $90^\circ$  i długości ramion 29 m oraz 16 m. Rzeczywiste parametry drgań podłoża gazociągu były niższe.

Do obliczeń przyjęto następujące parametry, charakteryzujące drgania gruntu:

- częstotliwość  $f = 5$  Hz,
- prędkość propagacji fali poprzecznej w nadkładzie dla rejonu posadowienia  $c_s = 200$  m/s,
- długość fali  $\lambda = 40$  m,
- amplituda prędkości drgań  $v_s = 0,052$  m/s,
- amplituda przyspieszenia drgań  $a_s = 1,245$  m/s<sup>2</sup>.

Parametry charakteryzujące warunki posadowienia gazociągu:

- zagłębienie osi przewodu w gruncie  $z = 1,0$  m,
  - ciężar objętościowy gruntu  $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup>,
  - obciążenie użytkowe naziomu  $p_n = 5$  kN/m<sup>2</sup>,
  - współczynnik tarcia gruntu o rurociąg  $\mu = 0,5$ ,
  - graniczna jednostkowa siła styczna na kierunku podłużnym  $t = 6,1$  kN/m,
  - współczynnik parcia spoczynkowego  $K_0 = 0,5$ ,
  - współczynnik poprzecznej podatności gruntu  $K_g = 3800$  kN/m,
  - współczynnik podłużnej podatności gruntu  $K_u = 2440$  kN/m
- Prosty odcinek gazociągu o długości 50 m
- maksymalne odkształcenie ośrodka gruntowego  $\varepsilon_{ekstr} = 0,130$  mm/m, wzór (3),
  - maksymalna wartość odkształceń gazociągu  $\varepsilon_{ekstr} = 0,014$  mm/m, wzór (5),
  - maksymalny moment zginający wywołany maksymalną krzywizną  $K_{ekstr}$  podłoża  $M_{max} = 0,15$  kNm, wzór (9),
  - dodatkowe ekstremalne naprężenia podłużne  $\sigma_{1ekstr} = 3,6$  MPa,
  - przy założeniu, że na powierzchni gazociągu wystąpiła graniczna siła styczna  $t$ 
    - maksymalna siła podłużna  $N_{max} = 64,5$  kN, wzór (7),
    - dodatkowe ekstremalne naprężenia podłużne  $\sigma_{1ekstr} = 17,5$  MPa.

Odcinek gazociągu załamany w planie

- maksymalna siła  $S_{max} = 3,1$  kN (wg rys. 3), wzór (11),
- maksymalny moment zginający  $M_{max} = 1,5$  kNm, wzór (12),
- dodatkowe ekstremalne naprężenia zredukowane  $\sigma_{red} = 8,1$  MPa,
- maksymalne ugięcie elementu 2 (wg rys. 3)  $\Delta l = 0,7$  mm, wzór (13).

Analiza kinematyczna

- ekstremalne względne przemieszczenia podłużne końców rur, jakie mogły wystąpić w kompensatorach dla długości odcinków gazociągu  $l_1 = l_2 \leq 50,0$  m  $\Delta u_{ekstr} = \pm 6,5$  mm, wzór (9),
- ekstremalne odchylenia kątowe odcinków gazociągu  $l_1 = l_2 \leq 50,0$  m jakie mogły wystąpić w kompensatorach, na podstawie wzoru (10)  $\Delta \theta_{ekstr} = \pm 0^\circ 05'$ .

Gdyby przyjąć, że w podłożu gazociągu wystąpiły zarejestrowane na stanowisku A wartości parametrów drgań, mogłyby wystąpić względne przemieszczenia segmentów gazociągu o ekstremalnych wartościach  $\pm 6,5$  mm oraz pomijalne wartości odchylenia katowych  $\Delta \theta_{ekstr}$ . Wartości tych przemieszczeń są znacznie mniejsze od wartości wywołanych ciągłymi deformacjami podłoża. Jednak już niewielkie przemieszczenia odcinków rurociągu mogą powodować utratę szczelności kompensatorów (Jachim, Kalisz 2010, Zięba, Kalisz 2014), co niekiedy ma miejsce po silnych wstrząsach górotworu.

## 6. Podsumowanie

Drgania przypowierzchniowej warstwy gruntu, wywołane wstrząsami powodowanymi podziemną eksploatacją górnictwa, oddziałują na istniejącą sieć gazową, złożoną z rurociągów stalowych i polietylenowych. Oddziaływanie to powoduje przemieszczenia, odkształcenia i dodatkowe naprężenia w elementach tej sieci. Zakres zarejestrowanych w okresie styczeń 2003 – sierpień 2014 parametrów drgań w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym był następujący:

- pikowe amplitudy prędkości drgań  $PGV_{Hmax}$  - od 0,0001 do 0,052 m/s,
- czas trwania drgań na zapisie prędkościowym - od 0,5 do 13,7 s,
- pikowe amplitudy przyspieszenia drgań  $PGA_{H10}$  w paśmie do 10 Hz - od 0,003 do 1522 mm/s<sup>2</sup>,
- czas trwania drgań na zapisie przyspieszeniowym - od 0,6 do 14,0 s.

Skala GSI<sub>GZWKW</sub>-2012 pozwala na ocenę wpływu drgań na liniowe obiekty infrastruktury podziemnej zlokalizowane na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, jakimi są gazociągi. Skala ta może być również wykorzystywana do oceny odporności istniejących gazociągów na drgania podłoża o intensywnościach zdefiniowanych poszczególnymi jej stopniami.

Przedstawiona analiza oddziaływania silnego wstrząsu górotworu na gazociąg stalowy charakteryzujący się dobrym stanem technicznym wykazała, że wartości przemieszczeń, odkształceń i naprężeń, działających na elementy tego gazociągu są stosunkowo niskie. Wartości te są znacznie niższe od wywołanych górnictwymi deformacjami podłoża o charakterze ciągłym.

W przypadku występowania silnych wstrząsów górotworu o intensywności stopnia III i IV jest wskazana szczegółowa analiza ich oddziaływania na sieć gazową, w szczególności na starsze gazociągi stalowe. Analiza statyczno-wytrzymałościowa i kinematyczna, pozwalająca na ocenę oddziaływania wstrząsu oraz ocenę odporności dynamicznej gazociągów, powinna uwzględniać ich aktualny stan techniczny.

*Publikację wykonano na podstawie pracy prowadzonej w ramach działalności statutowej Głównego Instytutu Górniczego o numerze 11120133-132.*

## Literatura

- BARCZYŃSKI A. i in. 2006 - Sieci gazowe polietylenowe. Projektowanie, budowa, użytkowanie. SITPNiG – Ośrodek Szkolenia i Rzeczoznawstwa w Poznaniu – Grupa Terenowa Rzeczoznawców. Poznań.
- CHEN Y. 1995 - Simplified and Refined Earthquake Analyses for Buried Pipes. Mathematical and Computer Modelling 1995, Vol. 21, No. 11, pp. 47-60.
- DUBIŃSKI J., MUTKE G., STEC K., LURKA A., BARAŃSKI A. 2008 - Zasady stosowania „Górnictwa” skali intensywności drgań GSI-GZWKW do oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w zakładach górniczych Kompanii Węglowej S.A. na obiekty budowlane i na ludzi. Kompania Węglowa S.A. Katowice, lipiec 2008 r.
- DULIŃSKA J. 2010 - Oddziaływanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górnictwymi w rejonie GZW i LGOM na konstrukcję gazociągu. Wstrząsy górnictwowe – charakterystyka parametrów drgań oraz kryteria oceny wpływu na obiekty budowlane. Główny Instytut Górniczy. „Górnictwo i Środowisko”. nr 4/4, s. 7-16.
- HASHASH Y.M.A., HOOK J.J., SCHMIDT B., YAO J.I. 2001 - Seismic design and analysis of underground structures. Tunneling and Underground Technology nr 16, s. 247-293.

- JACHIM K., KALISZ P. 2010 - Awarie sieci gazowych na terenach górniczych. Główny Instytut Górnictwa. „Górnictwo i Środowisko”. nr 4/1, s. 95-105.
- JOHN C.M.ST., ZAHRAH T.F. 1984 - Seismic design considerations for underground structures. *Advances in Tunneling Technology and Subsurface Use* 3/1984, s. 105-112.
- KWIATEK J. 2007 - Obiekty budowlane na terenach górniczych. Główny Instytut Górnictwa. Katowice.
- MOKROSZ R. 1985 - Wprowadzenie do mechaniki budowli liniowych zagłębionych w gruncie na terenach górniczych. Polska Akademia Nauk Oddział w Katowicach, Komisja Ochrony Terenów Górniczych 1985.
- MUTKE G. i in. 2012 - Weryfikacja Górniczej Skali Intensywności Drgań GSI-GZWKW, stosowanej w kopalniach Kompanii Węglowej S.A. od sierpnia 2008 roku, w aspekcie oceny skutków oddziaływania wstrząsów górniczych na obiekty budowlane i na ludzi. Dokumentacja pracy badawczej Głównego Instytutu Górnictwa Nr 58127682-120. Katowice. Praca niepublikowana.
- MUTKE G., TATARA T. (red.) 2009 - Górnicze Skale Intensywności Drgań GSI i doświadczenie z ich stosowania”, Praca Naukowa GIG nr 2/2, s. 155.
- MUTKE G., TARNOWSKI J. 2005 - Wpływ drgań podłoża na gazociągi. „Rurociągi” nr 4/41, s. 29-32.
- OGAWA Y., KOIKE T. 2001 - Structural design of buried pipelines for severe earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquakes Engineering* No 21, s. 199-209.
- O'RURKE M.J., LIU X. 1999 - Response of buried pipelines subject to earthquake effects. Monograph Series. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. A National Center of Excellence in Advanced Technology Applications. The Research Foundation of the State University of New York and the Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 26 kwietnia 2013 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe. Dz. U. 2013 poz. 640.
- SIATA R. 2004 - Badanie przypowierzchniowych warstw podłoża metodą sejsmiczną. Prace Naukowe GIG. „Górnictwo i Środowisko” nr 4, s. 33-42.
- STEC K., BARAŃSKI A. 2010 - Charakterystyka i ocena skutków drgań wstrząsów w kopalniach Kompanii Węglowej S.A. o pikowym przyspieszeniu drgań gruntu powyżej 0,5 m/s<sup>2</sup>. Główny Instytut Górnictwa. „Górnictwo i Środowisko”, nr 4/4, s. 81-10.
- USZKO M., BARAŃSKI A., KOWAL T., MUTKE G. 2013 - Zagrożenia naturalne w kopalniach Kompanii Węglowej SA. Część II. Oddziaływanie wstrząsów górniczych na powierzchnię. „Wiadomości Górnicze” nr 12, s. 708-720.
- ZHANG X., LEON R.L.W., ISHIBASHI I. 1991 - Lateral Stiffness and Damping Coefficient of Soils for Seismic Analysis of Buried Pipelines. *Proceedings: Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, March 11-15, St. Louis, Missouri. Paper No. 5.25.
- ZIĘBA M., KALISZ P. 2014 - Impact of mining exploitation on pipelines. *Acta Montanistica Slovaca. Ročník 19, číslo 3*, s. 111-117.

Artykuł wpłynął do Redakcji - październik, 2015  
Artykuł zaakceptowano do druku 19.08.2016

---

## ***Zwiększajmy prenumeratę najstarszego – czołowego miesięcznika Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa!***

Liczba zamawianych egzemplarzy określa zaangażowanie jednostki  
gospodarczej w procesie podnoszenia kwalifikacji swoich kadr!

Zapraszamy do publikacji artykułów w wersji angielskojęzycznej