

WITOLD FRĄC  
ANDRZEJ PYTLIK  
KRZYSZTOF PACZEŚNIEWSKI

## Badania wytrzymałościowe żerdzi kotwi górniczych i gruntowych przy obciążeniu statycznym i dynamicznym

*Do wzmocnienia górotworu oraz gruntu powszechnie stosuje się różnego typu żerdzie kotwi wykonane zarówno w postaci stalowych prętów o pełnym przekroju, jak i rur z gwintem na całej długości, które służą do iniekcji spoiw płynnych. W artykule przedstawiono metodykę oraz przykładowe wyniki wytrzymałościowych badań żerdzi kotwi samowiercących iniekcyjnych z gwintem falistym R32. Tego typu żerdzie stosowane są zarówno w górnictwie podziemnym, jak i geoinżynierii, przy obciążeniu statycznym i dynamicznym – o charakterze impulsowym (udarowym). Przedstawiono również wyniki badań mikropali iniekcyjnych o średnicach gwintu o zarysie trapezowym z zakresu T51–T111 mm, stosowanych głównie w geoinżynierii. Na podstawie norm oraz dokumentu EAD (European Assessment Document), obowiązującego w Unii Europejskiej, w artykule przedstawiono także podstawowe wymagania w zakresie obciążeń zmęczeniowych, stawiane gwoździom i mikropalom iniekcyjnym stosowanym w geoinżynierii.*

Słowa kluczowe: kotwie górnicze, gwoździe gruntowe, mikropale iniekcyjne, wytrzymałość na obciążenie statyczne i dynamiczne, badania zmęczeniowe

### 1. WPROWADZENIE

Do wzmocnienia górotworu oraz gruntu powszechnie stosuje się różnego typu żerdzie kotwi wykonane zarówno w postaci stalowych prętów o pełnym przekroju, jak i rur z gwintem na całej długości, które służą do iniekcji spoiw płynnych. Wraz ze wzrostem eksploatacji górniczej w kopalniach głębinowych rośnie również rola obudowy kotwowej, której działanie polega głównie na wzmocnieniu i zwiększeniu samonośności górotworu. Obudowę kotwową stosuje się również w warunkach obciążeń dynamicznych wywołanych nie tylko wstrząsami górotworu i tąpnięciami [1], ale również dynamicznymi oddziaływaniami środków transportu [2]. Podczas tąpnięcia kotwie narażone są głównie na dynamiczne obciążenie rozciągające [3, 4] oraz ścinające [5]. Ważną rolę w coraz większej popularności obudowy kotwowej odgrywa również czynnik ekonomiczny, ponieważ obudowa kotwowa jest tańsza od stalowej obudowy podporowej i wygodniejsza w transporcie. Współczesne kotwie charakteryzują się dużą wytrzymałością nie tylko na obciążenia statyczne, ale i na obciążenia dynamiczne o charakterze udarowym. Wymagania dotyczące wy-

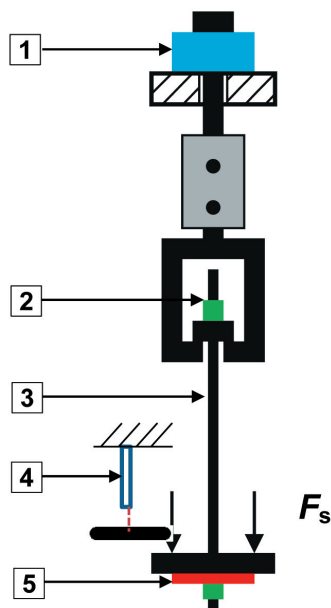
konawstwa robót geotechnicznych ujęte zostały w normach dotyczących gwoździ [6] i mikropali [7], które stosowane się głównie do wzmocnienia gruntu [8–10], posadowienia obiektów budowlanych oraz stabilizacji tuneli [11]. Dlatego do wykonania żerdzi kotwi, nakrętek, tulei łączących oraz innych elementów stanowiących cały system wzmocnień stosuje się materiały stalowe o wysokich właściwościach mechanicznych potwierdzonych badaniami wytrzymałościowymi głównie przy obciążeniu statycznym i zmęczeniowym. W artykule przedstawiono metodykę oraz przykładowe wyniki wytrzymałościowych badań żerdzi kotwi samowiercących iniekcyjnych, stosowanych zarówno w górnictwie podziemnym, jak i geoinżynierii, przy obciążeniu statycznym i dynamicznym – o charakterze impulsowym (udarowym). Przedstawiono również wyniki badań mikropali iniekcyjnych, stosowanych głównie w geoinżynierii, przy obciążeniu statycznym. Na podstawie norm oraz dokumentu EAD [12, 13], obowiązującego w Unii Europejskiej, w artykule przedstawiono także podstawowe wymagania w zakresie obciążeń zmęczeniowych, stawiane gwoździom i mikropalom iniekcyjnym stosowanym w geoinżynierii.

## 2. METODYKA BADAŃ

### 2.1. Badania przy obciążeniu statycznym

Podstawowymi parametrami wytrzymałościowymi żerdzi jest ich maksymalna wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , górna  $R_{eH}$  i dolna  $R_{eL}$  granica plastyczności lub umowna granica plastyczności  $R_{0,2}$ , wydłużenie procentowe całkowite  $A_{gt}$  przy sile maksymalnej oraz wydłużenie całkowite procentowe po rozerwaniu  $A_r$ . Badania rozciągania próbek stali, z której wykonuje się żerdzie, nie są miarodajne. Wynika to głównie z faktu, że podczas produkcji żerdzi na skutek procesów technologicznych ulegają również zmianom właściwości mechaniczne stali. Konieczne więc jest przeprowadzanie prób rozciągania gotowego wyrobu, to znaczy żerdzi kotwi, co dopuszcza norma PN-EN ISO 6892-1 [14]. Wyniki takich badań, choć przeprowadzonych w nieco innych warunkach, przedstawione są w pracy [15].

Badania takich żerdzi, jak również żerdzi połączonych ze sobą za pomocą łączników, przeprowadzane są w statycznej maszynie wytrzymałościowej o maksymalnej sile rozciągającej 5000 kN (klasa dokładności 1). Na rysunku 1 został pokazany schemat badania statycznego. Badana żerdź (3) zamocowana jest między trawersami maszyny i zablokowana z każdej strony za pomocą dwóch nakrętek (2). Pomiar siły realizowany jest za pomocą czujnika siły (1) zamocowanego na trawersie stałej, a pomiar przemieszczenia jest realizowany za pomocą czujnika linkowego (4) zamocowanego do trawersy ruchomej, do której jest przyłożona siła  $F_s$ . Długość pomiarowa początko-



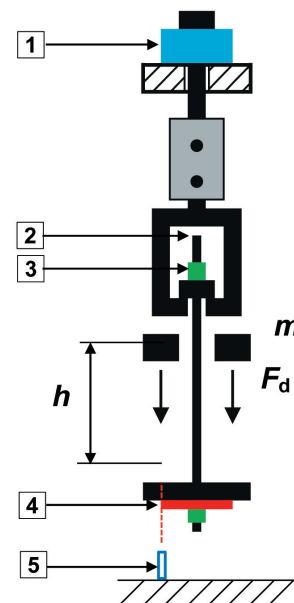
Rys. 1. Schemat obciążenia żerdzi kotwi przy obciążeniu statycznym: 1 – czujnik siły, 2 – nakrętka kotwi, 3 – żerdź kotwi, 4 – czujnik przemieszczenia, 5 – podkładka kotwi

wa  $L_o$  wynosi zwykle 1000 mm. Badanie polega na obciążaniu badanej żerdzi siłą rozciągającą  $F_s$ , aż do momentu jej zerwania. Szybkość rozciągania określana jest na podstawie szybkości przyrostu naprężenia (metoda B w normie PN-EN ISO 6892-1 [14]), tj. 6–60 MPa·s<sup>-1</sup>. Podczas badania rejestrowana jest siła obciążająca  $F_s$  oraz wydłużenie żerdzi  $\Delta L$ .

Parametry wytrzymałościowe żerdzi wyznaczane są za pomocą programu komputerowego, który został opracowany i zwalidowany w Laboratorium Badań Urządzeń Mechanicznych GIG na podstawie zaleceń normy PN-EN ISO 6892-1 [14]. Program ten na podstawie danych pomiarowych zapisywanych w pliku w kodzie ASCII oraz informacji o polu poprzecznego przekroju badanej próbki  $S_o$  i długości pomiarowej  $L_o$  oblicza parametry wytrzymałościowe żerdzi. Wyniki przedstawiane są w postaci graficznej (wykres rozciągania) oraz tabelarycznej.

### 2.2. Badania przy obciążeniu dynamicznym o charakterze udarowym

Metoda badania kotwi według normy ASTM D7401-08 [16] przy obciążeniu dynamicznym o charakterze impulsowym (udarowym) polega na swobodnym spadku (pod wpływem siły grawitacji) bijaka o masie  $m$  z określonej wysokości  $h$  na końcówkę żerdzi kotwi (rys. 2). Pomiar siły realizowany jest za pomocą czujnika siły (1) zamocowanego na trawersie stałej, a pomiar przemieszczenia jest realizowany za pomocą czujnika laserowego (5) zamocowanego do podłoża mierzącego przesunięcie końcówki żerdzi kotwi.



Rys. 2. Schemat obciążenia żerdzi kotwi przy obciążeniu dynamicznym o charakterze udarowym: 1 – czujnik siły, 2 – żerdź kotwi, 3 – nakrętka kotwi, 4 – podkładka kotwi, 5 – czujnik przemieszczenia

Wynik próby uznaje się za pozytywny, jeżeli żerdź kotwi przeniesie bez zniszczenia obciążenie o określonej przez jej producenta energii i prędkości uderzenia.

Zgodnie z normą amerykańską ASTM D7401-08 [16] początkową energię uderzenia, odpowiadającą energii potencjalnej  $E_p$  obliczamy ze wzoru:

$$E_p = mgh \quad (1)$$

a prędkość uderzenia  $v$  w badaną kotew obliczamy ze wzoru:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

gdzie:

- $h$  – wysokość swobodnego spadku masy bijaka [m],
- $m$  – masa bijaka [kg],
- $g$  – stała grawitacji 9,81 [m/s<sup>2</sup>].

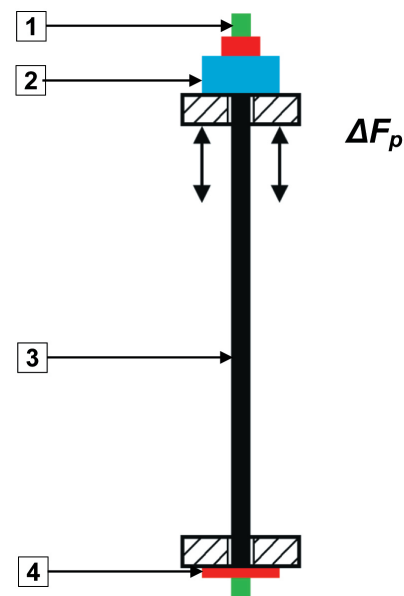
Podczas badań mierzona jest dynamiczna siła obciążająca  $F_d$  za pomocą tensometrycznego czujnika siły (klasa 0,5) oraz wydłużenie  $L_d$  kotwi za pomocą czujnika laserowego (rozdzielczość 0,1% mm, błąd liniowości 0,25%) z minimalną częstotliwością próbkowania około  $f = 10$  kHz (wymaganie normy ASTM D7401-08 [16]). Doświadczenia Laboratorium Badań Urządzeń Mechanicznych GIG wskazują jednak, że w celu lepszego uchwycenia charakteru zmian fali obciążenia dynamicznego  $F_d$  minimalna częstotliwość próbkowania podczas prób powinna wynosić  $f = 19,2$  kHz. Czujniki połączone są ze wzmacniaczem pomiarowym, który współpracuje z komputerem, gdzie rejestrowane są dane pomiarowe. Wzmacniacz pomiarowy wyposażony jest w 24-bitowe przetworniki analogowo-cyfrowe, a dane pomiarowe przekazywane są w postaci 4-bajtowej (3 bajty opisujące wartość zmierzoną i 1 bajt statusu).

### 2.3. Badania przy obciążeniu dynamicznym o charakterze pulsacyjnym

Badania kotwi przy obciążeniu dynamicznym o charakterze pulsacyjnym wykonuje się na podstawie dokumentu EAD (ang. European Assessment Document) [12, 13]. Badanie przeprowadza się w maszynie wytrzymałościowej o stałej częstotliwości obciążenia nie większej niż 30 Hz przy stałym obciążeniu górnym wynoszącym 65% wytrzymałości charakterystycznej żerdzi kotwi – w tym przypadku jest to siła uplastyczniająca  $F_{p0,2}$ , którą uprzednio należy wyznaczyć podczas badań na rozciąganie żerdzi przy statycznym obciążeniu. Zakres obciążeń  $\Delta F_p = F_{zmax} - F_{zmin}$  należy utrzy-

mywać na stałym poziomie przez cały czas trwania badania. Odpowiada to amplitudzie naprężeń wynoszącej 80 MPa w nominalnym przekroju poprzecznym rozciąganej żerdzi. Całe badanie składa się z 2 mln cykli obciążenia. Schemat badania pokazano na rysunku 3. Badana żerdź kotwi (3) zamocowana jest między trawersami maszyny i jest zablokowana z każdej strony za pomocą nakrętek (1). Osiowość żerdzi zapewniają podkładki kotwi (4). Pomiar siły jest realizowany za pomocą tensometrycznego czujnika siły (2).

Próbkę należy badać w taki sposób, aby wykluczyć drgania wtórne (rezonans). Również istotne jest, aby próbka nie zawierała materiału wypełniającego. Podczas badania istotne jest utrzymywanie stałej amplitudy drgań i zliczanie ilości cykli. Po badaniu należy sprawdzić stan elementów badanych, np. czy nastąpiły pęknięcia oraz odkształcenia.



Rys. 3. Schemat obciążenia żerdzi kotwi przy obciążeniu dynamicznym o charakterze pulsacyjnym:  
1 – nakrętka kotwi, 2 – czujnik siły, 3 – żerdź kotwi,  
4 – podkładka kotwi

## 3. WYNIKI BADAŃ

### 3.1. Wyniki badań przy obciążeniu statycznym

Podstawowym badaniem żerdzi przy obciążeniu statycznym jest próba rozciągania. Na podstawie tej próby wyznacza się maksymalną wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , górną  $R_{eH}$  i dolną  $R_{eL}$  granicę plastyczności lub umowną granicę plastyczności  $R_{0,2}$ , wydłużenie procentowe całkowite  $A_{gt}$  przy sile maksymalnej oraz wydłużenie całkowite procentowe po rozerwaniu  $A_r$ .

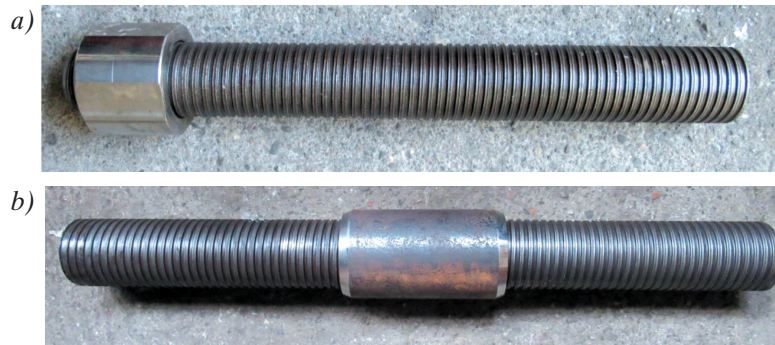
Badaniom przy obciążeniu statycznym poddano żerdzie kotwi z gwintem falistym R32 oraz mikropale iniekcyjne wraz z elementami łącznymi (rys. 4).

Na rysunku 5 pokazano przykładowy wykres rozciągania żerdzi górniczych kotwi samowiercących R32 przy obciążeniu statycznym.

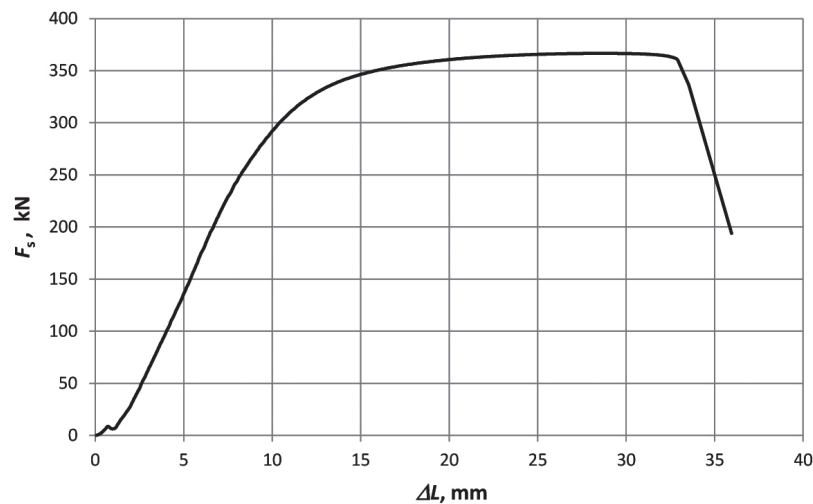
Żerdź kotwi uległa zerwaniu przy sile  $F_{smax} = 366$  kN. Na rysunkach 6–8 pokazano przykładowe wykresy

rozciągania żerdzi mikropali iniekcyjnych T51, T76 oraz T111 przy obciążeniu statycznym.

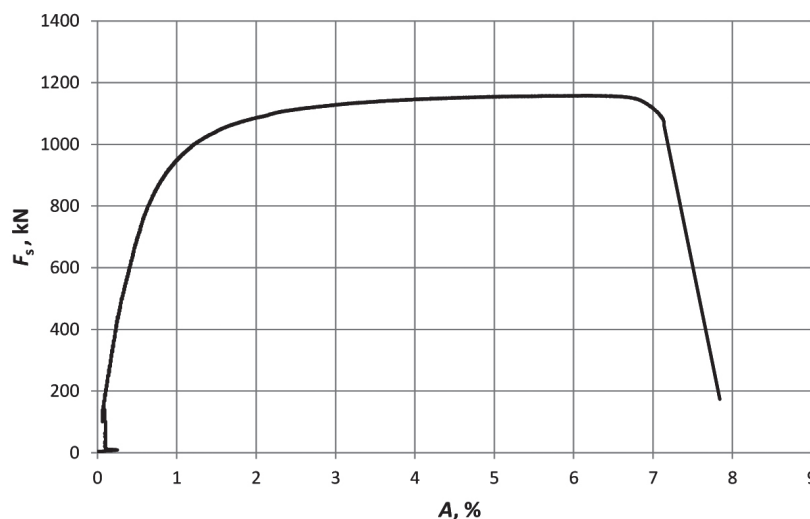
Przykładowe zdjęcia stalowej żerdzi z łącznikiem i nakrętkami w maszynie wytrzymałościowej o zakresie 5000 kN podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy obciążeniu statycznym przedstawiono na rysunku 9. Łącznik pozwala na łączenie ze sobą żerdzi kotwi celem jej przedłużenia. Na rysunku 10 pokazano żerdź kotwi po próbie rozciągania.



Rys. 4. Przykładowy widok mikropala iniekcyjnego z nakrętką (a) oraz dwóch odcinków mikropali połączonych ze sobą za pomocą łącznika (b)

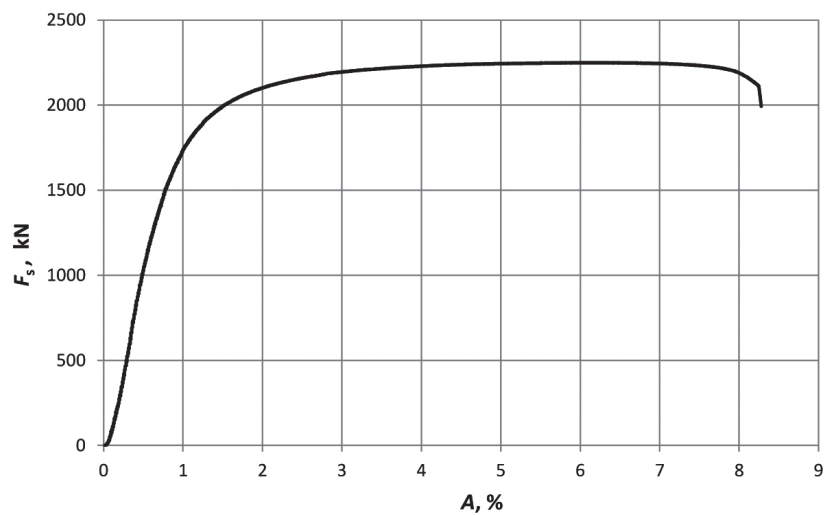


Rys. 5. Wykres rozciągania żerdzi kotwi R32

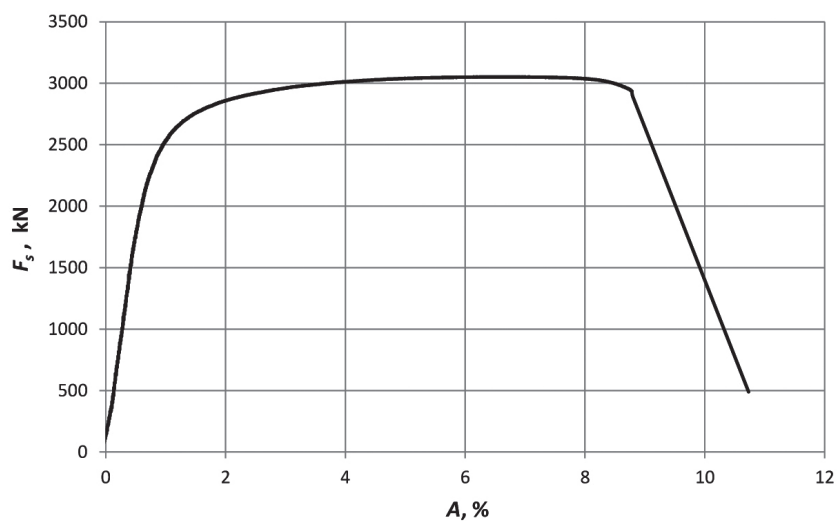


Rys. 6. Wykres rozciągania żerdzi kotwi T51 ( $F_{smax} = 1159$  kN;  $A_{gt} = 6,2\%$ )





Rys. 7. Wykres rozciągania żerdzi kotwi T76 ( $F_{smax} = 2250$  kN;  $A_{gt} = 6,0\%$ )



Rys. 8. Wykres rozciągania żerdzi kotwi T111 ( $F_{smax} = 3052$  kN;  $A_{gt} = 6,4\%$ )



Rys. 9. Badanie wytrzymałości na rozciąganie żerdzi z łącznikiem w maszynie wytrzymałościowej o zakresie 5000 kN



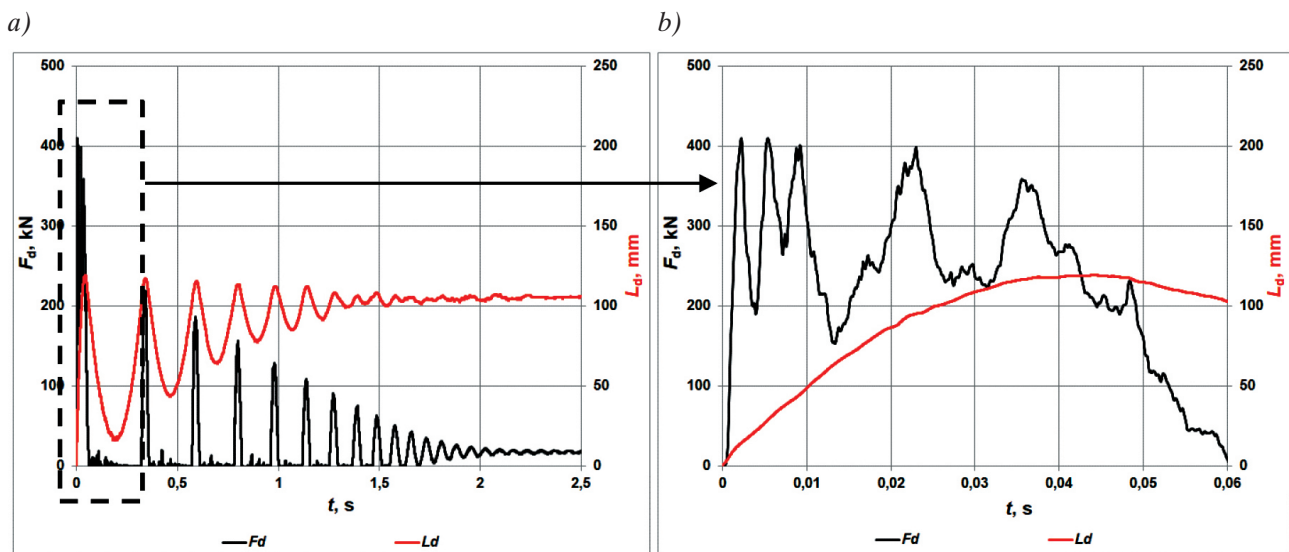
Rys. 10. Zerwana żerdź kotwi T111 po próbie rozciągania

### 3.2. Wyniki badań przy obciążeniu dynamicznym o charakterze udarowym

Badaniom poddano kotwie samowiercą z gwintem falistym R32, wyposażone w stalowe podkładki kwadratowe o wymiarach  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ . Sprawdzano odporność żerdzi kotwi na obciążenie o energii uderzenia  $E_p = 30 \text{ kJ}$  i prędkości uderzenia  $5,5 \text{ m/s}$  (parametry badania obliczane są wg wzorów (1) i (2)). Podczas badań użyto bijaka o masie  $m = 1950 \text{ kg}$ , który opuszczany był na kotew z wysokości  $h = 1560 \text{ mm}$ , co powodowało, że kotew uderza-

na była z prędkością  $v = 5,5 \text{ m/s}$ . Przykładowy przebieg dynamicznej siły  $F_d$  w funkcji czasu  $t$  uzyskany podczas próby przedstawiono na rysunku 11.

Kotew bez zniszczenia przeniosła obciążenie dynamiczne o charakterze impulsowym, którego energia wyniosła  $30 \text{ kJ}$ . Na rysunku 11a widoczne są drgania gasnące spowodowane odbiciami bijaka od podkładki kotwi. Na rysunku 11b widoczny jest pierwszy impuls obciążenia, podczas którego żerdź kotwi poddana została maksymalnemu obciążeniu o wartości  $F_{d\max} = 410 \text{ kN}$ , a żerdź kotwi uległa maksymalnemu wydłużeniu o wartości  $L_{d\max} = 119 \text{ mm}$ .



Rys. 11. Przykładowy przebieg dynamicznej siły  $F_d$  w funkcji czasu  $t$  uzyskany podczas próby:

a) pełny przebieg próby; b) pierwszy impuls obciążenia

Pozostałe impulsy obciążenia wynikające z kolejnych niewielkich odbić bijaka od podkładki kotwi, nie powodują odkształcenia plastycznego żerdzi, dlatego nie są poddawane analizie.

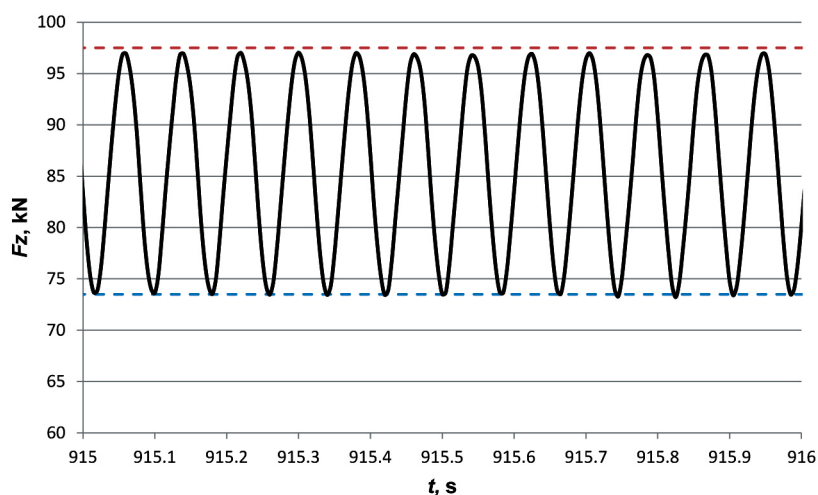
### 3.3. Wyniki badań przy obciążeniu dynamicznym o charakterze pulsacyjnym

Badaniom przy obciążeniu dynamicznym o charakterze pulsacyjnym poddano żerdzie kotwi z gwintem falistym R25. Jej nominalna siła uplastyczniająca

$F_{p0,2}$  wynosi  $150 \text{ kN}$ , a nominalne pole powierzchni przekroju  $S_o$  wynosi  $300 \text{ mm}^2$ . Maksymalna siła pulsacji wynosi  $65\%$  z  $F_{p0,2}$ , czyli  $97,5 \text{ kN}$  przy amplitudzie pulsacji  $24 \text{ kN}$ . Podczas próby częstotliwość pulsacji wynosiła powyżej  $10 \text{ Hz}$ . Przykładowe zdjęcia stalowej żerdzi w maszynie wytrzymałościowej podczas badania pulsacyjnego przedstawiono na rysunku 12, a przykładowy przebieg pulsacyjnej siły  $F_z$  w funkcji czasu  $t$  uzyskany podczas próby przedstawiono na rysunku 13. Żerdź kotwi po próbie nie wykazywała żadnych widocznych wad ani pęknięć.



Rys. 12. Żerdź kotwi zamocowana w pulsacyjnej maszynie wytrzymałościowej



Rys. 13. Przykładowy przebieg pulsacyjnej siły  $F_z$  w funkcji czasu  $t$  uzyskany podczas próby

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule metody badań kotwi samowiercących iniekcyjnych z gwintem falistym R32 oraz mikropali iniekcyjnych o trapezowym zarysie gwintu z zakresu T51–T111 mm uwzględniają typową specyfikę pracy kotwi w różnych warunkach ich stosowania. Standardowo wykonuje się badania tych elementów przy obciążeniu statycznym, ale w czasie eksploatacji kotwi, mikropali i gwoździ gruntowych mogą się zdarzyć różne przypadki ich obciążenia. Badania mikropali i gwoździ gruntowych przy dynamicznym obciążeniu o charakterze zmęczeniowym są bardzo ważne dla określenia ich wytrzymałości na długotrwałe obciążenia cykliczne. Wydaje się jednak,

że ze względu na to, że są one stosowane często do stabilizacji obiektów infrastruktury krytycznej, powinno się wziąć pod uwagę fakt, że mogą one być również poddane obciążeniom udarowym, indukowanym, np. przez trzęsienia ziemi lub wstrząsy na terenach górniczych i pogórnich.

Działania Głównego Instytutu Górnictwa zmierzają do tego, aby poprawić bezpieczeństwo ludzi oraz warunki ich pracy nie tylko w podziemiach kopalń, ale również na terenach pogórnich, na których występują duże problemy z utrzymaniem stabilizacji nasypów, skarp, dróg oraz innych obiektów inżynierskich. Dlatego planuje się rozszerzenie badań mikropali i gwoździ gruntowych, w tym również o badania zmęczeniowe i udarowe.

## Literatura

- [1] Li C.C.: *Principles of rockbolting design*, „Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering” 2017, 9, 3: 396–414.
- [2] Pytlik A.: *Tests of steel arch and rock bolt support resistance to static and dynamic loading induced by suspended monorail transportation*, „Studia Geotechnica et Mechanica” 2019, 2, 41: 81–92.
- [3] Pytlik A., Prusek S., Masny W.: *A methodology for laboratory testing of rockbolts used in underground mines under dynamic loading conditions*, „Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy” 2016, 12, 116: 1101–1110.
- [4] Li C.C., Hadjigeorgiou J., Mikula P., Knox G., Darlington B., Royer R., Pytlik A., Hosp M.: *Performance of identical rockbolts tested on four dynamic testing rigs employing the direct impact method*, „Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering” 2021, 13, 4: 745–754.
- [5] Pytlik A.: *Comparative Shear Tests of Bolt Rods Under Static and Dynamic Loading*, „Studia Geotechnica et Mechanica” 2020, 2, 42: 151–167.
- [6] PN-EN 14490:2010: *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Gwoździe gruntowe*.
- [7] PN-EN 14199:2015-07: *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Mikropale*.
- [8] Cała M., Kowalski M.: *Analiza stateczności skarp z gruntu zbrojonego*, „Górnictwo i Geoinżynieria” 2008, 2, 32: 67–77.
- [9] Furtak K., Gaszyński J., Pabian Z.: *Geotechniczne systemy zabezpieczeń i stabilizacji na terenach osuwiskowych, cz. 1*, „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2011, 6, 39: 68–70.
- [10] Furtak K., Gaszyński J., Pabian Z.: *Geotechniczne systemy zabezpieczeń i stabilizacji na terenach osuwiskowych, cz. 2*, „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2012, 1, 40: 44–48.
- [11] Majcherczyk T., Niedbalski Z., Kowalski M.: *3D numerical modeling of road tunnel stability. The Laliki project*, „Archives of Mining Sciences” 2012, 1, 57: 61–78.
- [12] European Assessment Document EAD: *Post-tensioning kits for prestressing of structures*, 2016, September: 160004-00-0301.
- [13] European Assessment Document EAD: *Kit for micropiles – kit with hollow bars for self-drilling micropiles – hollow bars of seamless steel tubes*, 2016, August: 200036-00-0103.
- [14] PN-EN ISO 6892-1:2019:11: *Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*.
- [15] Skrzypkowski K., Korzeniowski W., Herezy Ł.: *Metody badania obudowy kotwowej w Katedrze Górnictwa Podziemnego AGH*, „CUPRUM – Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud” 2015, 3, 76: 49–60.
- [16] ASTM D7401-08: *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Rock Anchor Capacities by Pull and Drop Tests*.

mgr inż. WITOLD FRĄC

dr inż. ANDRZEJ PYTLIK

dr inż. KRZYSZTOF PACZEŃNIOWSKI

Główny Instytut Górnictwa

pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice

{wfrac, apytlik, kpaczesniowski}@gig.eu