

Opracowanie i konstrukcja nowych przetworników strunowych do pomiarów przemieszczeń gruntu, odkształceń obiektów budowlanych i betonu

ADAM KANCIRUK, LESZEK STANISŁAWSKI

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

W artykule przedstawiono prototypową konstrukcję tensometrów strunowych do pomiarów przemieszczeń gruntu, obiektów budowlanych i betonu. Podczas prac projektowych zwracano szczególną uwagę nie tylko na spodziewane dobre parametry metrologiczne nowego przyrządu, ale też na prostotę jego konstrukcji, dobór tanich materiałów i niski koszt wykonania. Przyrząd może współpracować z opracowanymi wcześniej elektronicznymi urządzeniami pomiarowo-rejestrującymi. Przeprowadzone testy dowiodły słuszności założeń konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: metrologia, elektronika, mechanika skał, budownictwo

1. Wstęp

W Pracowni Odkształceń Skał we wczesnych latach 70. opracowano i skonstruowano tensometry TTCS-4000.3 i TTCS-2000 do długotrwałych pomiarów przemieszczeń gruntu, zwłaszcza na terenach objętych podziemną eksploatacją górniczą [1]. Przyrządy te instalowano nie tylko w wielu miejscach na terenie Polski, ale też w Gruzji w górach Kaukaz. Podczas wieloletnich okresów pozostawania w gruncie wykazały wysoką niezawodność i stabilność parametrów metrologicznych. Dowodem na to są testy tensometrów odzyskanych po 14. latach nieprzerwanego użytkowania, jak też i zestaw tensometrów zainstalowany w sąsiedztwie Instytutu, funkcjonujący bezawaryjnie od ponad 30 lat. Tensometry TTCS-4000.3 i TTCS-2000 są instalowane najczęściej w układach rozet, w odpowiednich wykopach, poniżej strefy przemarzania gruntu.

2. Konstrukcja tensometru

Jak wspomniano we wstępie, tensometry przeznaczone do pomiarów przemieszczeń gruntu mogą być odzyskiwane po zakończeniu obserwacji w danym miejscu i po przeglądzie technicznym, usunięciu ewentualnych usterek i przewzorcowaniu zastosowane w innym miejscu. Nie jest natomiast możliwe odzyskiwanie podobnych urządzeń zalewanych płynnym betonem po jego stwardnieniu. Z tego względu tensometry stosowane do pomiaru odkształceń wewnątrz betonu jako urządzenia „jednorazowe” powinny mieć konstrukcję jak najprostszą i być tanie w produkcji.

Dlatego, przy projektowaniu tensometru do pomiaru odkształceń wewnątrz betonu należało w maksymalny sposób uwzględnić dostępne na rynku tanie, choć wykonane z wystarczającą precyzją półfabrykaty oraz konieczność minimalizacji pracochłonności wykonania przyrządów i użycia w tym celu nieskomplikowanych narzędzi i obrabiarek.

Do wykonania tensometrów wybrano następujące zasadnicze półfabrykaty:

- rury aluminiowe o średnicy zewnętrznej 12 i 10 mm i ściance 1mm (rys. 1),
- płaskowniki mosiężne 7×2.5mm (rys. 1),
- wkręty metryczne M5 i M3,

- ocynkowane pręty gwintowane M5 (rys.1),
 - struny do gitary elektrycznej \varnothing 0.406 mm,
 - drut sprężynowy \varnothing 1.5 mm,
 - drut miedziany, nawojowy,
 - małe magnesy trwałe,
 - blaszki ze stali transformatorowej,
 - dwużyłowy kabel teletechniczny
- oraz popularne kleje i silikon.



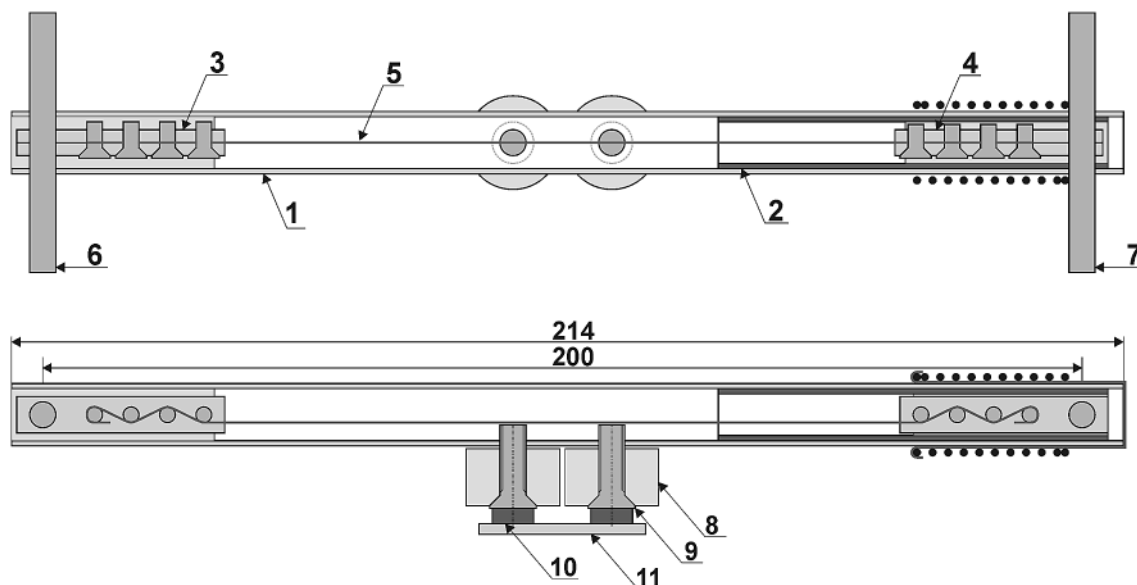
Rys. 1. Niektóre półfabrykaty do wykonania tensometrów

Zaprojektowano i wykonano również szablony do wierceń i proste przyrządy do montażu tensometrów (rys. 2). W ten sposób jedynymi koniecznymi obrabiarkami stały się wiertarka stołowa i elektryczna piła tarczowa.



Rys. 2. Przyrządy do montażu tensometrów: szablony do wierceń, szpulka do nawijania cewek

Rysunek 3 przedstawia tensometr przeznaczony do pomiarów odkształceń betonu. Odcinek rurki \varnothing 12 stanowi korpus tensometru (1), w którego jeden koniec wmontowany jest przy pomocy szpilki M5 (6) zacisk (3) struny pomiarowej (5). Drugi zacisk (4) jest wmontowany w odcinek rurki \varnothing 10 (2) przy pomocy identycznej szpilki M5 (7). Odległość szpilek (6 i 7) wynosi 200 mm i taka jest baza pomiarowa tensometru. Zamocowania struny (3 i 4) wykonane są z płaskownika miedzianego i składają się z dwóch podobnych połówek



Rys. 3. Konstrukcja tensometru strunowego do betonu

skręconych wkrętami M3. Struna do gitary elektrycznej 'G' (5), o długości czynnej 130 mm, jest stale napięta i sposób jej zamocowania jest ze względu na możliwość czasowego płynięcia wyników pomiarowych bardzo istotny. Wydaje się, że wykonanie zacisków ze sprężystego mosiądzu jest dobrym rozwiązaniem. Stalowa, hartowana struna pod wpływem docisku wgniata się w mosiądz, sama nie doznając większych odkształceń trwałych. Przez zalanie przestrzeni między zaciskami i rurkami klejem epoksydowym otrzymuje się dodatkowe usztywnienie połączenia i skasowanie luzów.

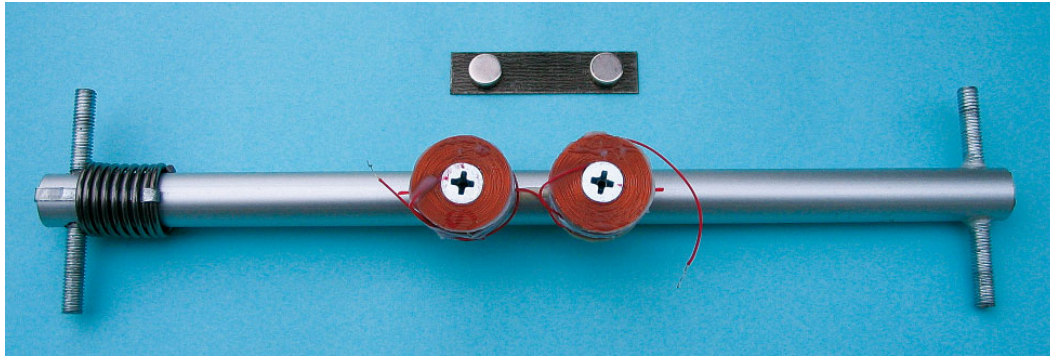
Zastosowane rurki aluminiowe pokryte są zewnętrznie bardzo twardą i gładką warstwą tlenku glinu. Warstwa ta dobrze współpracuje ciernie z innymi materiałami. Ze względu też i na niewielki luz (około 50 μm) rurka (2) ma możliwość przesuwania się swobodnego wewnątrz rurki (1). Oczywiście korzystne jest smarowanie odpowiednim smarem (np. grafitowym) współpracujących powierzchni.

Pobudzanie struny pomiarowej i zamiana jej drgań na napięciowy przemienny sygnał elektryczny realizowane jest za pomocą elektromagnesu. Jego uzwojenie stanowią dwie jednakowe cewki drutu DNE 0.15 mm (8) nawinięte na rdzeniach – wkrętach metrycznych M5 (9). Cewki są bezkarkasowe, nawijane przy użyciu specjalnej rozbieralnej szpulki, zalewane żywicą epoksydową. Wkręty (9) z nawiniętymi cewkami są wkręcane 'na klej' w otwory nagwintowane w korpus tensometru (1). Połączenie gwintowe umożliwi dokładne ustalenie szczeliny (0.8-1 mm) między rdzeniem-wkrętem (9) a struną (5). Magnesy stałe w formie krążków (10) utrzymują stałą składową pola magnetycznego elektromagnesu. Obwód magnetyczny domyka zwora (11) z blachy transformatorowej.

Drgająca w polu magnetycznym elektromagnesu struna indukuje w uzwojeniu (8) sygnał elektryczny, ale też i w aluminiowym korpusie (1) prądy wirowe osłabiające znacznie sygnał. Dlatego korpus pomiędzy otworami gwintowanymi dla wkrętów (9) jest przecięty, a powstała szczelina jest wypełniana klejem.

Struna pomiarowa tensometru przeznaczonego do zabetonowania musi być wstępnie napięta. Ze względu na początkowy skurcz betonu podczas jego wiązania napięcie to powinno być znaczne – w pobliżu górnej granicy zakresu pracy struny. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że najbardziej prawidłową pracę tensometru uzyskuje się, gdy odkształcenie struny pomiarowej jest w granicach 1-2%. Naciąg struny zapewnia sprężyna spiralna (12) opierająca się o szpilkę (7) i jarzmo (13) wykonane z paska blachy. Takie rozwiązanie umożliwia zmianę naciągu struny po zmontowaniu kompletnego tensometru.

Aby tensometr prawidłowo reagował na odkształcenia betonu powinien być związany z jego masą tylko poprzez szpilki (6 i 7). Dlatego jego korpus, elektromagnes i sprężyna powinny być pokryte elastycznym materiałem. Dobrym rozwiązaniem jest użycie taśm z gąbki lub silikonu budowlanego.



Rys. 4. Tensometr do betonu z częściowo zdemontowanym elektromagnesem

3. Charakterystyki tensometru

Przed zastosowaniem tensometru w praktyce należy zbadać jego charakterystykę i wyznaczyć zależność zmian jego sygnału wyjściowego, czyli częstotliwości drgań struny pomiarowej od sygnału wejściowego, jakim w tym przypadku jest odkształcenie. Konieczne jest też zbadanie jego wrażliwości na zmiany temperatury.

Do zbadania charakterystyki konieczne jest urządzenie zadające odkształcenie i przyrząd pomiarowy o klasie wyższej niż spodziewana klasa tensometru. Odkształcenie można zadawać poprzez stałe zamocowanie szpilki (6) i przemieszczanie względem tego zamocowania szpilki (7). Biorąc pod uwagę długość czynną struny, zakres jej naciągu oraz zaniehbując odkształcenia zacisków otrzymujemy zakres tego przemieszczenia zaledwie 0.13 mm. O ile zadawanie takiego przemieszczenia przy użyciu elastycznych przekładek nie jest trudne, to pomiar z odpowiednią dokładnością i rozdzielczością jest kłopotliwy.

Najlepszymi z dostępnych w Instytucie urządzeniami do pomiaru przemieszczeń są 2 ekstensometry typu 2620-603 będącymi elementami wyposażenia maszyny wytrzymałościowej Instron 8500. Ich zakres pomiarowy wynosi 2 mm, mogą być podłączane do urządzenia uśredniającego wynik pomiaru. Zastosowanie tych ekstensometrów do zbadania charakterystyki tensometru przedstawia rysunek 5. Do zadawania przemieszczenia została użyta sama maszyna wytrzymałościowa.

Znając jednak parametry struny pomiarowej można też na podstawie zmian częstotliwości jej drgań swobodnych wyznaczyć jej odkształcenie, a co za tym idzie, odkształcenie tensometru. Związek między odkształceniem struny Δ/l a jej częstotliwością drgań własnych f [Hz] przedstawia poniższy wzór [3]:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E \Delta l}{\gamma l}}$$

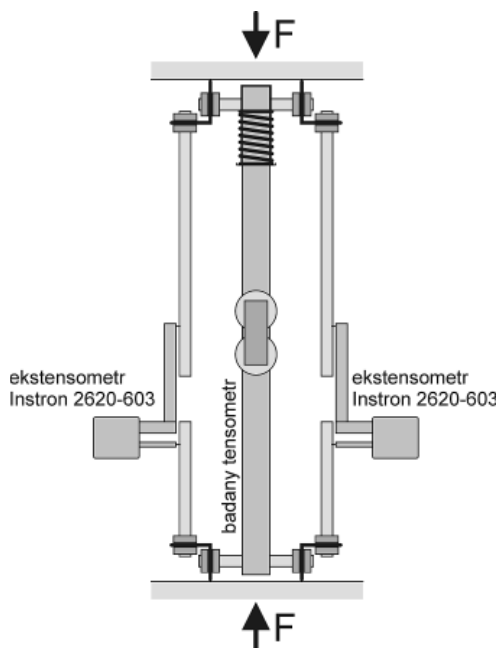
gdzie:

- l – długość struny [m],
- γ – gęstość materiału struny [kg/m^3],
- E – moduł Younga [Pa].

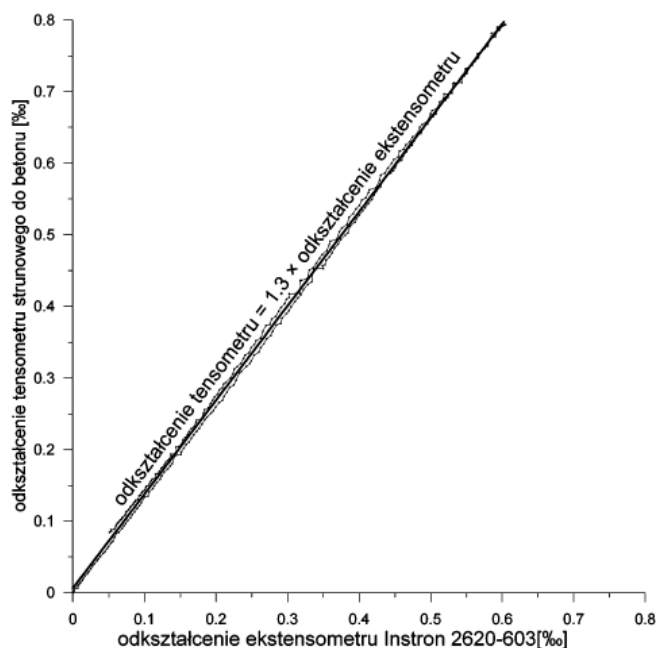
Długość czynna struny wynosi 130 mm, gęstość jej materiału 7860 kg/m^3 a moduł Younga – zapewne około 220 GPa. Zastosowany do eksperymentu miernik strunowy – rejestrator zapisuje wynik pomiaru okresu drgań struny pomiarowej T jako liczbę będącą wielokrotnością 40 ns [2]. Biorąc pod uwagę powyższe parametry wzór na odkształcenie tensometru można zapisać jako:

$$\Delta/l = 974 \times 10^6 / T^2$$

Rysunek 6 przedstawia wyliczone według ostatniego wzoru odkształcenie jako funkcję odkształcenia zmierzonego przez ekstensometry. Widać, że wskazania tensometru są zawyżone. Powodem tego błędu może być inny niż założono moduł Younga materiału struny, zbyt mało sztywny układ z rys. 5, a też i fakt, że ekstensometry pracują tylko w zakresie 6.5 % swojego pełnego zakresu.



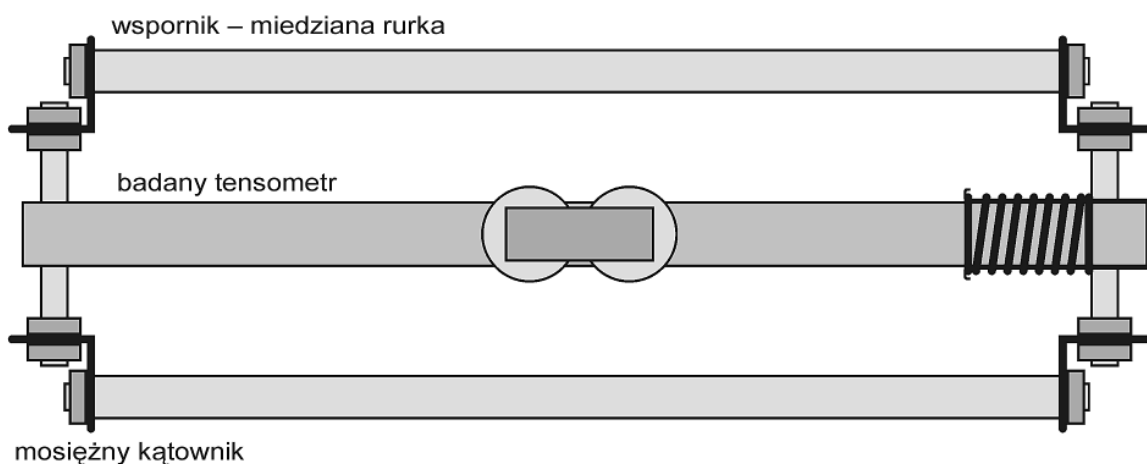
Rys. 5. Układ do badania charakterystyki tensometru



Rys. 6. Charakterystyka tensometru

Tensometr strunowy zbudowany z materiałów o różnym współczynniku rozszerzalności cieplnej (stal stopowa, mosiądz) z pewnością może wykazywać wrażliwość wskazań na temperaturę. Aby zbadać charakterystykę temperaturową tensometru zbudowano układ przedstawiony na rysunku 6.

Współczynnik rozszerzalności cieplnej miedzi wynosi $16,2 \times 10^{-6}/K$, a mosiądzu – $18 \times 10^{-6}/K$. Stąd sumaryczny współczynnik rozszerzalności cieplnej całego wspornika złożonego z miedzianej rurki i mosiężnego kątownika wynosi $16,4 \times 10^{-6}/K$. Dla zbadania charakterystyki temperaturowej tensometru układ jak na rys. 7 umieszczano w różnych temperaturach.

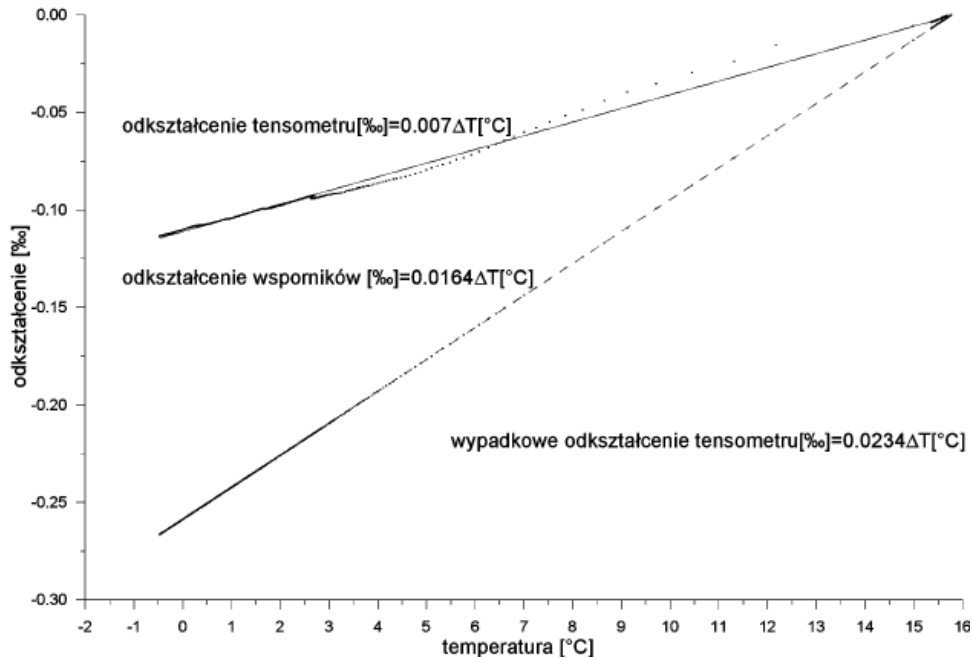


Rys. 7. Układ do wyznaczania charakterystyki temperaturowej tensometru

Rysunek 8 przedstawia wynik eksperymentu. Wynika z niego, że wpływ temperatury na wskazania tensometru jest znaczny. Stąd wniosek, że stal o nieznanym składzie użyta do produkcji struny ma znaczny współczynnik rozszerzalności cieplnej przekraczający w/w współczynnik dla miedzi.

Jak wspomniano w rozdziale 2 bardzo istotnym czynnikiem decydującym o jakości przetwornika strunowego jest prawidłowe zamocowanie końców struny pomiarowej uniemożliwiające czasowe płynię-

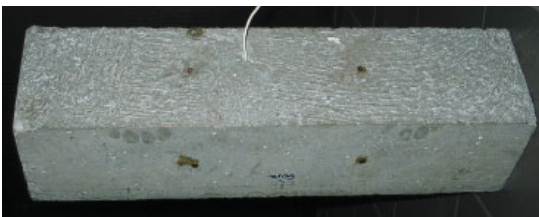
cie wyników pomiarowych. W celu zbadania ewentualnego płynięcia wskazań tensometru zamocowano go w układzie podobnym jak na rys. 7 – zamiast miedzianych wsporników zastosowano grubościenną żeliwną rurę. Przez okres 8 miesięcy zaobserwowano niewielkie fluktuacje pomiaru okresu drgań struny (maks. 4-5×40 ns) nie wykazujące jakichkolwiek tendencji.



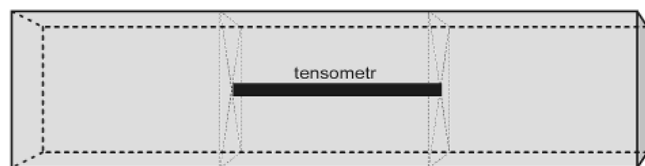
Rys. 8. Charakterystyka temperaturowa tensometru

4. Zastosowanie tensometru do badania skurczu betonu

Tensometr skonstruowany według powyższego opisu został użyty do badania skurczu betonowej belki o wymiarach 60×15×15 cm (rys. 9). W czasie wlewania do formy betonu, w jego masie dokładnie pośrodku został umieszczony tensometr jak na rysunku 10.

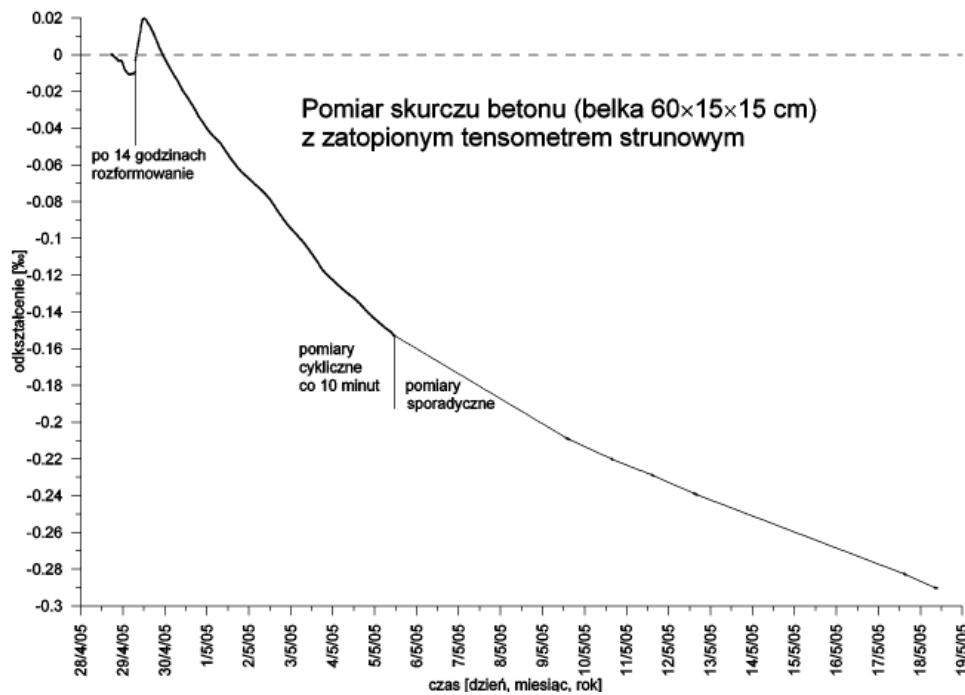


Rys. 9. Betonowa belka z zalany tensometrem



Rys. 10. Układ tensometru w belce

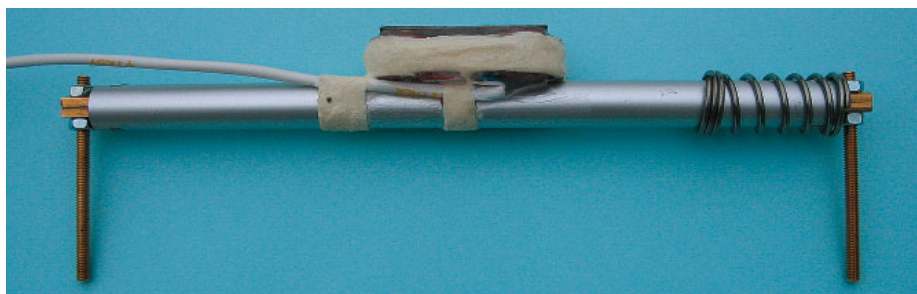
Rysunek 11 przedstawia wynik badania. Zastosowano beton szybkowiązący – od 6 godziny testu wyniki należy uznać za poprawne. Widoczny jest początkowy niewielki skurcz niemal do momentu rozformowania belki. Następujące po tym pęcznienie zostało nagle przyspieszone przez rozformowanie belki. Forma do wykonywania belek to masywne stalowe korytko, nie pozwalające na zbytne pęcznienie betonu w jego początkowej fazie wiązania. Po około 20 godzinach od zalania formy następuje początkowo szybki, potem coraz wolniejszy skurcz betonu.



Rys. 11. Pomiar skurczu betonu w czasie jego wiązania

5. Tensometry do pomiaru odkształceń obiektów budowlanych i gruntu

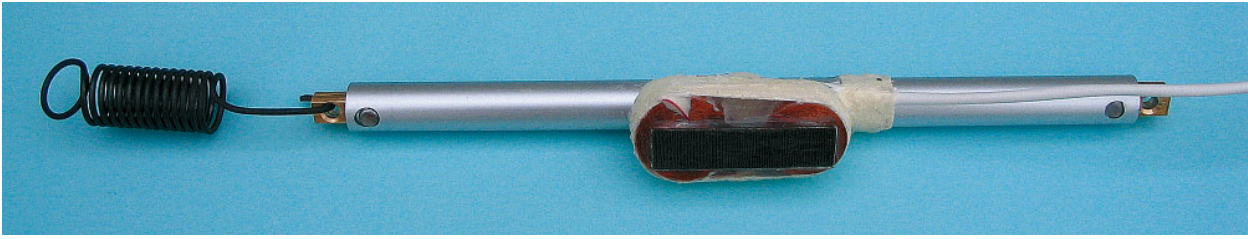
Tensometry do pomiaru odkształceń obiektów budowlanych i gruntu zostały zbudowane na podstawie projektu tensometru do betonu. Niewiele też różnią się od niego konstrukcyjnie. Rysunek 12 przedstawia tensometr do pomiaru odkształceń obiektów budowlanych.



Rys. 12. Tensometr do pomiaru odkształceń obiektów budowlanych

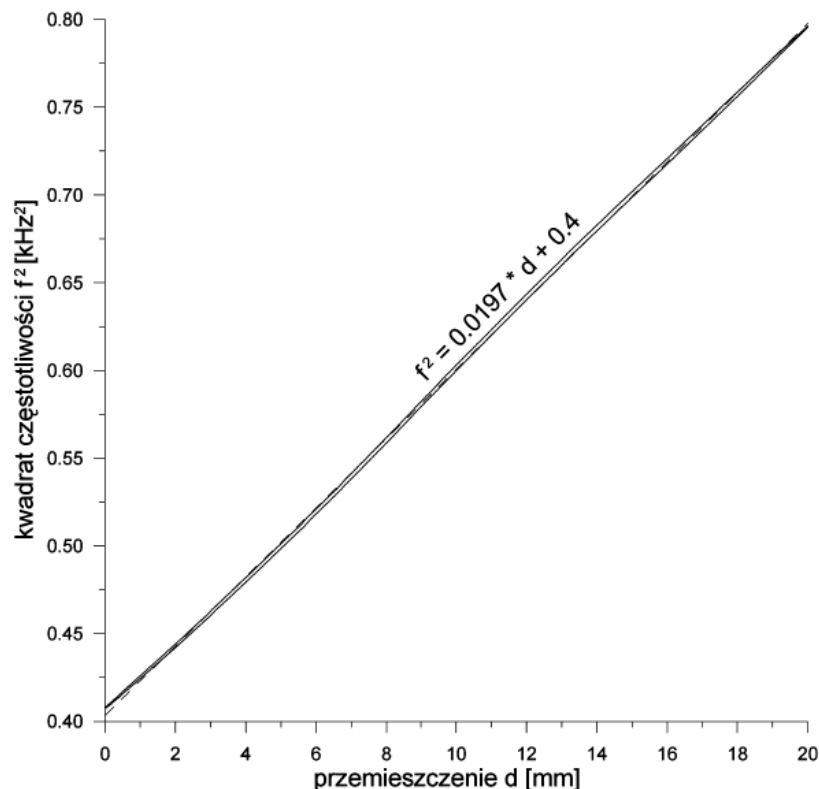
Różni się on od tensometru do betonu jedynie wydłużonymi poza korpus zaciskami struny, zastosowaniem jednostronnych szpilek oraz innym usytuowaniem elektromagnesu (jest obrócony względem osi korpusu o 90°). Przewiduje się montaż tensometru na powierzchni obiektów budowlanych przez nawiercanie w niej otworów i mocowanie w nich szpilek.

Podobną budowę ma tensometr do pomiaru przemieszczeń gruntu, a raczej jego czynna, pomiarowa część (rys. 13). Pracująca na ściskanie sprężyna do wstępnego napinania struny została zastąpiona sprężyną pracującą na rozciąganie, połączoną szeregowo ze struną pomiarową. W ten sposób, w zależności od stałej sprężyny możliwe jest zwiększanie zakresu pomiarowego tensometru nawet do kilku centymetrów. Przewiduje się mocowanie nieprzesuwnej końcówki zacisku struny do jednej z kotwi umieszczonej w gruncie, i łączenie drugiej kotwi z wolnym końcem sprężyny poprzez ciągnąco. Tensometr ten może też znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie wymagany jest pomiar przemieszczeń w zakresie kilku centymetrów.



Rys. 13 Tensometr do pomiaru przemieszczeń gruntu

Do zbadania charakterystyki tensometru użyto maszyny wytrzymałościowej Instron 8500. Jej sterowany elektronicznie siłownik hydrauliczny może zadawać m.in. przemieszczenie zgodnie z wcześniej ustalonym programem. Sterowanie jest realizowane w pętli sprzężenia zwrotnego z wykorzystaniem bardzo dokładnego (nieliniowość, histereza, płynięcie wskazań poniżej 0.02%) indukcyjnego przetwornika przemieszczeń. Rysunek 14 przedstawia zlinearyzowaną charakterystykę tensometru. Wykres obrazuje ponad 2200 wyniki pomiarowe i dwa pełne cykle „do góry i na dół”. Nieliniowość i histereza wskazań nie przekracza 1% a powtarzalność – lepsza niż 0.2%.



Rys. 14. Zlinearyzowana charakterystyka tensometru do pomiarów przemieszczeń gruntu

6. Wnioski

Przedstawione powyżej przyrządy pomiarowe i ich właściwości to wynik wielokrotnych prób różnych konstrukcji z wykorzystaniem różnych materiałów. Zawsze starano się o to, aby koszt wykonania tensometru był jak najniższy nie rezygnując oczywiście z jego dobrych parametrów metrologicznych. Ostateczna obecnie konstrukcja jest prosta, łatwa w wykonaniu i tania ze względu na zastosowane popularne i łatwo dostępne w handlu materiały. Parametry metrologiczne tensometrów są do typowych zastosowań w zupełności zadowalające. Zatem wydaje się, że opisane wyżej przyrządy mogą znaleźć szerokie zastosowanie.

7. Literatura

1. Gustkiewicz J., i in. 1985: *Some Advancements in Soil Strain Measurement Methods with Special Reference to Mining Subsidence*. Mining Science and Technology, Amsterdam, Elsevier, p. 237-135.
2. Kanciruk A. 1994: *Urządzenie do pomiaru wielkości fizycznych przy użyciu przetwornika strunowego*. (w:) Metrologia XXVI Międzyuczelniana Konferencja Metrologów MKM '94 Opole – Jarnołtówek 20-23 wrzesień 1994, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu nr 203, Elektryka, z. 40, t. 1, s. 173-178.
3. Zagajewski T., i in. 1975: *Elektronika przemysłowa*. WNT Warszawa.

Prototypical construction of vibrating-wire transducers

Abstract

This article presents a prototypical construction of vibrating-wire transducers for measuring displacements of soil, building constructions and concrete. In elaborating the design, special attention was paid not only to the expected good metrological parameters of the new device but also to the simplicity of its construction, the use of cheap materials and the low cost of production. It can collaborate with the formerly designed electronic measuring-recording devices. The conducted tests have proved the correctness of the construction foredesign.

Keywords: metrology, electronics, mechanics of rock, land engineering

Recenzent: dr hab. inż. *Andrzej Seruga*, Profesor Politechniki Krakowskiej