

CZUJNIKI DO LABORATORYJNYCH POMIARÓW STANÓW NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ WEWNĄTRZ ELEMENTÓW BETONOWYCH

JANUSZ KASPERKIEWICZ (WARSZAWA)

1. Uwagi ogólne

Zastosowanie dobrego czujnika w pomiarach stanów naprężenia i stanów odkształcenia wewnątrz elementów betonowych pozwoli na doświadczalne rozwiązanie szeregu zagadnień dotyczących betonu i żelbetu lub przynajmniej na poparcie teorii wynikami doświadczeń. Zapewne ze względu na to w ostatnich dwudziestu latach wzrosło zainteresowanie takimi czujnikami. W niniejszej pracy przedstawiono niektóre stosowane typy czujników — przeważnie do pomiaru odkształceń wewnątrz elementów. Stosunkowo prostsze i lepiej znane urządzenia do pomiaru odkształceń na powierzchni zewnętrznej w zasadzie nie będą tu opisywane. W artykule przyjęto punkt widzenia laboratorium wytrzymałościowego, a więc użytkownika aparatury pomiarowej.

W tytule celowo wprowadzono rozróżnienie czujników mierzących odkształcenia i naprężenia. Pomimo że większość czujników zaprojektowana była do pomiaru odkształceń, istnieją jednak i takie, którymi w sposób pośredni mierzyć można właśnie naprężenia. Będą to bądź czujniki hydrauliczne jak np. Glötzla, bądź czujniki oparte na pomiarze zmian odległości, np. Loha czy Carlsona i Pirtza.

Stosowanie czujników do pomiaru odkształceń należy uznać za znacznie bardziej celowe. Mierzona jest wówczas rzeczywista wielkość fizyczna — odległość, a nie wielkość wtórna i wynikająca z rozumowania, jaką jest naprężenie — granica stosunku siły do powierzchni.

Na wstępie należy rozpatrzyć zagadnienie odkształcalności elementu, wewnątrz którego znajduje się czujnik z innego materiału. Materiał idealnego czujnika powinien łączyć się w sposób ciągły z tworzywem badanym, mieć identyczne współczynniki sprężystości, Poissona i rozszerzalności cieplnej we wszystkich kierunkach oraz cechy wytrzymałościowe takie same jak i tworzywo. Na ogół jednak materiał, którym może być miedź, stal czy plastik, różni się znacznie od tworzywa badanego. Zwłaszcza właśnie w przypadku betonu, który ma cechy fizyczne zmienne z czasem i obciążeniem, idealne dobranie materiału czujnika nie jest możliwe. Stosując czujnik, którego wymiary nie są dostatecznie małe, a współczynnik sprężystości znacznie większy od współczynnika sprężystości betonu, trzeba liczyć się z możliwością uzbrojenia elementu badanego. Przy podobnym czujniku o bardzo małym współczynniku sprężystości może nastąpić osłabienie przekroju betonu,

skupienie naprężeń, a zatem również zakłócenie badanego stanu. Zjawiska te występują właśnie w tych punktach, w których odkształcenia są mierzone.

Rozwiązaniem, jakie nasuwa praktyka, jest stosowanie czujników o przekroju poprzecznym niewielkim w stosunku do przekroju poprzecznego elementu badanego i o niewielkim zastępczym współczynniku sprężystości. Graniczne wymiary czujników i wielkości ich zastępczych współczynników sprężystości będą zależą od jakości betonu. Istnieje jednak obawa, że ustalenie tych wielkości na drodze innej niż doświadczalna nie byłoby możliwe. Wracając do powyżej opisanego rozwiązania należy podkreślić, że na ogół posługują się nim nawet ci z producentów urządzeń pomiarowych, którzy starają się dopasować cechy sprężyste tworzywa i czujnika. Na przykład na dobranej bazie o cechach sprężystych zbliżonych do betonu umieszczają tensometr elektrooporowy mający znikome wymiary i $E_{zast} \approx 0$, a zatem nie mający wpływu na odkształcenie bazy. Jest to podobny schemat myślowy, przy czym dochodzi jeden stopień pośrednictwa przy przekazywaniu wielkości odkształceń.

Do badanego elementu należy wprowadzić urządzenie pomiarowe odpowiadające w takim stopniu powyższym warunkom, aby zakłócenie stanu odkształcenia było mniejszego rzędu niż dokładność pomiaru. Stosowanie czujników o znikomych wymiarach pozwoliłoby na zrezygnowanie z obliczania poprawek wynikających z wprowadzenia obcego ciała do betonu. Obliczenie takie, proponowane np. przez Y. C. Loha [5], opiera się na wielu założeniach i nie jest do przyjęcia, jeżeli przedmiotem badań jest właśnie poszukiwanie praw odkształcalności materiału i elementu.

Większość stosowanych czujników służy do pomiaru stanu odkształcenia, chociaż, jak już wspomniano poprzednio, można napotkać również i czujniki do pomiaru naprężeń. Przy zmiennym współczynniku sprężystości, co zachodzi w betonie, idealnym byłby czujnik pozwalający na pomiar naprężeń i odkształceń jednocześnie. Czujnik taki nie został dotychczas skonstruowany, a znane czujniki naprężeń posiadają zasadnicze wady. Stąd nasuwa się wniosek, że przy rozpatrywaniu tworzywa poddanego działaniu sił lub innych oddziaływań trzeba opierać się na pomiarach odkształceń a nie naprężeń.

Na podstawie własnych doświadczeń i opinii publikowanych w wielu pracach zamieszczono poniżej zestawienie cech użytkowych, które powinien posiadać dobry czujnik uniwersalny.

Wymagania te mają różne znaczenie w zależności od charakteru prac, do jakich przeznaczone są czujniki. Z tego względu pożądane cechy dominujące należy określić każdorazowo programując badania.

2. Wymagania stawiane czujnikom

Dobry czujnik powinien

- 1) być długowieczny; nawet w przypadku badań stanów doraźnych obciążenia czujnik musi gwarantować przynajmniej okres jednego roku bezbłędnego działania; cecha ta w odniesieniu do tensometrów elektrooporowych w środowisku takim jak beton wiąże się w sposób zasadniczy z odpornością na działanie wilgoci;

- 2) być uniwersalny (na rozciąganie, ściskanie, stany statyczne i dynamiczne);
- 3) mieć cechy mechaniczne dobrane w uzasadniony sposób;
- 4) mieć wymiary zewnętrzne umożliwiające pomiar w punkcie; w przypadku betonu istnieje jednak ograniczenie polegające na tym, że długość czujnika do pomiaru odkształceń powinna być nie mniejsza niż trzykrotna średnica największego ziarna kruszywa; w przypadku czujnika naprężeń ograniczenie dotyczy minimalnej powierzchni przekroju poprzecznego;
- 5) być odporny mechanicznie;
- 6) mieć właściwą czułość i odpowiedni zakres; w przypadku stosowania polskich tensometrów i mostków T-2 dokładność pomiaru jest rzędu 5×10^{-6} , a zakres wystarcza dla badania wszystkich stanów występujących w betonie aż do zniszczenia;
- 7) odznaczać się prostotą konstrukcji; ma to szczególne znaczenie przy samodzielnym wykonywaniu czujnika w laboratorium nie przystosowanym specjalnie do tego typu prac.

3. Zestawienie czujników spotykanych w literaturze bądź w praktyce

3.1. Klasyfikacja czujników. Poniżej zestawiono niektóre wiadomości o różnych typach czujników do pomiaru stanów deformacji wewnątrz betonu. Wiadomości te zebrano na podstawie dostępnych publikacji i informacji bezpośrednich o urządzeniach jeszcze nie opisanych w literaturze technicznej. Niewątpliwie zebrane tu dane nie obejmują wszystkich istniejących rozwiązań, są jednak charakterystyczne dla aktualnych kierunków prac. Podane nazwy czujników określono wg źródeł, z jakich zaczerpnięto informacje i na ogół nazwy te nie są ogólnie rozpowszechnione.

Czujniki podzielono na zasadnicze grupy według ich konstrukcji. Przed dokładniejszym opisem przedstawiono zastosowany sposób klasyfikacji poszczególnych czujników do różnych grup:

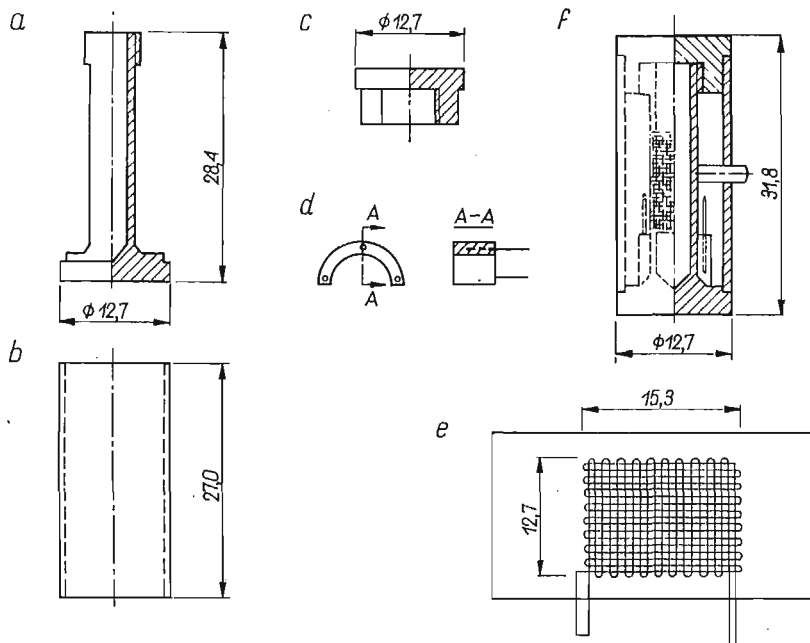
- A. Czujniki wykonane w oparciu o tensometri elektrooporowe (p. 3.2)
 - a) — Czujniki wykonane na szkielecie metalowym (p. 3.2.1)
 - czujnik Y. C. LOHA,
 - czujnik do pomiaru sześciu składowych odkształcenia — IPPT,
 - czujnik G. HONDROSA,
 - czujnik wykonany na Politechnice Śląskiej.
 - b) — Czujniki wykonane przy zastosowaniu materiałów wiążących (p. 3.2.2)
 - czujnik G. MORAVII,
 - czujnik PIMIENOWA,
 - czujnik THOMA i SCHNEEBELIEGO,
 - czujnik MAJCHROWICZA i WESELIĘGO.
 - c) — Inne sposoby wykorzystania tensometri elektrooporowej (p. 3.2.3)
 - czujnik naprężeń CARLSONA i PIRTZA,
 - czujnik powierzchniowy, umieszczony w czasie betonowania
- B. — Czujniki rezonansowe (p. 3.3)
 - czujnik firmy Télémac (Francja),
 - czujnik firmy Galileo (Włochy).

- czujnik firmy Maihak (Niemcy),
- czujniki wykonywane w innych krajach (CSR, Polska).
- C. — Czujniki hydrauliczne (p. 3.4)
- czujnik GLÖTZLA.

W artykule najwięcej uwagi poświęcono czujnikom wykonanym na zasadzie tensometrii elektrooporowej, a to ze względu na fakt, że są one w warunkach krajowych łatwiej dostępne i mają szereg cech kwalifikujących je do stosowania w badaniach laboratoryjnych.

3.2. Czujniki wykonane w oparciu o tensometry elektrooporowe

3.2.1. Czujniki wykonane na szkielecie metalowym. Czujnik Loha. Czujnik ten [5], wykonany w 1951 r. przez Y. C. LOHA, ma budowę stosunkowo skomplikowaną. Wykonany jest ze stali o wysokiej wytrzymałości i składa się z elementów pokazanych na rys. 1. Zasadniczymi częściami są tu: część wewnętrzna — szkielet, rys. 1a, skorupa zewnętrzna — 1b oraz nakrętka — 1c. Na część środkową naklejono wykonany we własnym laboratorium tensometr o układzie drutów przedstawionym na rys. 1e. Taki tenso-



Rys. 1. Czujnik opracowany przez Y. C. LOHA [5]

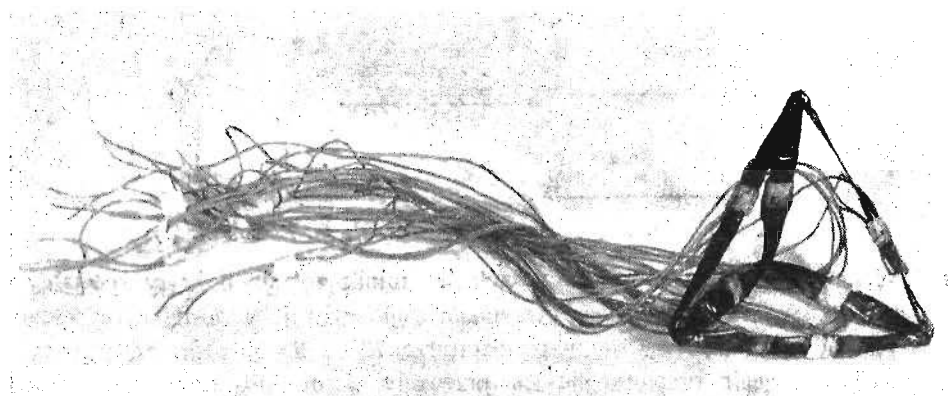
metr pozwala na kompensowanie układu mostka tensometrycznego bez konieczności stosowania drugiego czujnika. W przypadku pokazanym na rysunku druty biegnące pionowo są oporami czynnymi, a biegnące poziomo — kompensacyjnymi. Po naklejeniu tensometru i przymocowaniu drutów do końcówki (1d) nasadzona zostaje skorupa i nakręcona nakrętka. Przez silne dokręcenie tej ostat-

niej osiąga się pewien stan sprężenia stali co zapewnia współpracę części wewnętrznej i zewnętrznej. Zabezpieczenie przeciw wilgoci stanowi warstwa wosku mineralnego.

Opisany czujnik po wykonaniu poddano kolejnym cyklom obciążania i odciążania w celu *wcześniejszego wywołania wszystkich zmian, które mogłyby wystąpić w czasie użytkowania czujnika*. Następnie urządzenie zostało wyskalowane w sposób umożliwiający odczytywanie wielkości działających nań naprężeń. Materiał i przekroje poprzeczne dobrano tak, aby współczynniki sprężystości betonu i czujnika były możliwie równe.

Przeprowadzono szereg badań takiego czujnika umieszczonego w elementach betonowych. Próby wykazały, że czujnik wskazuje prawidłowo składowe naprężeń ściskających przy obciążeniach statycznych i dynamicznych a nieco gorzej stany naprężeń rozciągających. Pomiary można prowadzić w zakresie od -70 do $+635$ kG/cm^2 , a czułość wynosi $\pm 3,5$ kG/cm^2 . Czujnik jest praktycznie odporny na działanie wody. Niewielkie wymiary opisanego modelu czujnika ($1,3 \times 3,2$ cm) powodują, że można go stosować jedynie w przypadku betonów z bardzo drobnym kruszywem.

Czujnik do pomiaru sześciu składowych odkształcenia — IPPT. Urządzenie to, nazywane sondą do betonu [15], zostało zaprojektowane i wykonane w Zakładzie Mechaniki Ośrodków Ciągłych IPPT PAN w Warszawie. Na szkielet z blachy miedzianej, wykonany z prętów o długościach 7 i 10 cm,

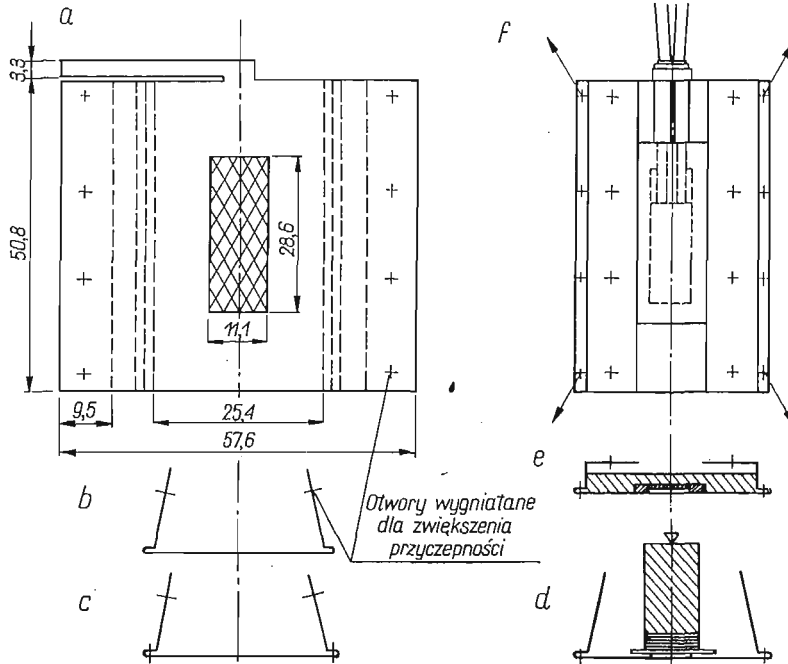


Rys. 2. Sonda do betonów opracowana w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN

połączonych w formie ostrosłupa, naklejono 6 par tensometrów elektrooporowych. Tensometry te następnie zabezpieczono przed wilgocią przez pokrycie specjalną pastą, oblutowanie folią itd. Sam sposób uszczelnienia jest zbliżony do zastosowanego w opisanym poniżej czujniku HONDROSA. Istotną cechą urządzenia jest układ czujników umożliwiający pomiar wszystkich sześciu składowych tensora odkształceń. Gotowa sonda pokazana jest na rys. 2. Zabetonowanie szeregu sond i przeprowadzenie badań wykazało przydatność urządzenia i możliwość uzyskania interesujących rezultatów.

Czujnik G. Hondrosa. Do wykonania czujnika odkształceń wewnątrz betonu G. Hondros [3] wykorzystał folię miedzianą 0,0508 mm, budując w celu

zwiększenia sztywności czujnik o przekroju skrzynkowym. Konstrukcja czujnika jest bardzo prosta, a poszczególne fazy przygotowania pokazano na rys. 3. Po wycięciu odpowiedniego kawałka folii pole zakreskowane (a) zostaje przygotowane pod naklejenie tensometru przez starcie powierzchni papierem ściernym. Powierzchnię tę czyści się następnie za pomocą roztworów amoniaku i alkoholu oraz suszy w promieniach podczerwonych. Po sprawdzeniu i dodatkowym wysuszeniu samego tensometru zostaje on naklejony przy użyciu kleju celuloidowego. Następnie po



Rys. 3. Kolejne fazy wykonania czujnika w/g G. HONDROSA [3]

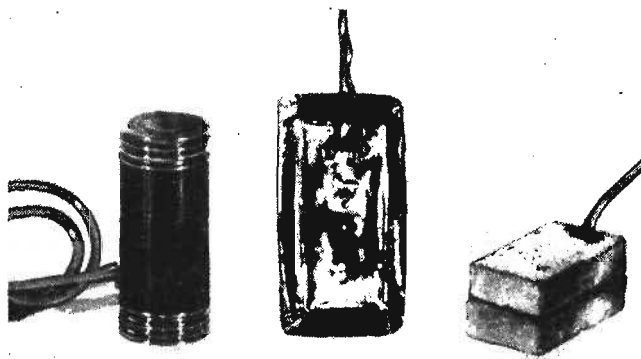
sprawdzeniu połączenia i oporności izolacji czujnik zostaje pokryty specjalnym lakierem określonym jako żywica otrzymana z gliceryny i bezwodnika ftalowego. Pokrycie lakierem odbywa się w temperaturze 70°C. Po powtórnym nałożeniu lakieru i wysuszeniu przylutowuje się przewody w otulinie plastikowej, przy czym zwracano uwagę na zabezpieczenie izolacji złącza, które otrzymuje specjalną warstwę przy ponownym pokrywaniu lakierem. W tej fazie wygniecione zostają w folii okrągłe otwory, których nierówne brzegi zwiększają przyczepność czujnika do betonu. Po wysuszeniu warstwa roztopionego wosku pokrywa zabezpieczenie lakierem do grubości łącznej 4 mm. Następnie folię zgina się, po czym gotowy czujnik może być już umieszczony w formie.

Powyższe stosunkowo dokładne omówienie procesu wykonania zamieszczono dla podkreślenia wagi właściwego zabezpieczenia przeciwwilgociowego.

Izolacyjne właściwości opisywanego pokrycia ochronnego uległy w okresie 1 roku nawet polepszeniu — z $1 \cdot 10^3$ do $5 \cdot 10^3$ megomów. G. HONDROS podał również opisy pomyślnych prób czujnika w betonie rozciągany metodą brazylijską i w zginanym elemencie żelbetowym.

Umieszczanie tensometrów elektrooporowych na szkielecie metalowym wiąże się ze stosunkowo nieskomplikowanymi czynnościami. Ten typ czujnika jest często spotykany; zajmowano się nim m. in. na Politechnice Śląskiej (rys. 4), w Instytucie Techniki Budowlanej [12] i w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie.

3.2.2. Czujniki wykonane przy zastosowaniu materiałów wiążących. Czujnik G. Moravii. Czujnik wykonany przez G. MORAVIA w roku 1955 [7] stanowi przykład czujnika wykonywanego z materiałów wiążących. Jako materiał do wykonania czujnika wybrano araldit, a to ze względu na znaczną stałość wymiarów i dobre własności wiążące. Araldit nie zmienia poza tym własności tensometru. Bryła z tego materiału mechanicznie obrobiona w kształcie równoległociąanu lub cylindra została następnie przecięta wzdłuż płaszczyzny



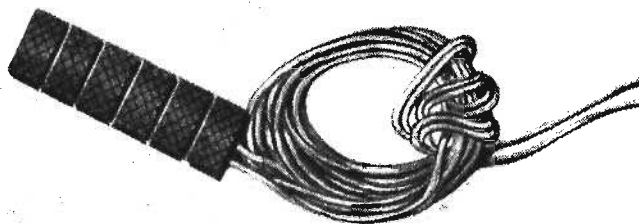
Rys. 4. Czujniki wykonane na Politechnice Śląskiej. Czujnik kapsułkowy, foliowy i betonowy (Katedra Budowy Mostów Politechniki Śląskiej — J. GŁOMB)

środkowej. Na powstałej w ten sposób powierzchni naklejono tensometr i po przylutowaniu przewodów sklejkono obie części bryły jeszcze nie spolimeryzowaną masą aralditu. Następnie na zewnątrz wykonano dodatkowo nacięcia zwiększające przyczepność do betonu. Do umocowania czujnika w formie w czasie betonowania zastosowano żyłkę nylonową.

W celu sprawdzenia tak wykonanego czujnika umieszczono go wewnątrz próbki betonowej i po okresie dojrzewania poddano ścisłaniu, dokonując jednocześnie na zewnętrznej powierzchni kontrolnego pomiaru tensometrami mechanicznymi Huggenbergera. Wyniki pomiarów modułu sprężystości były zbieżne. Próbki obciążano również dynamicznie, a także umieszczano czujnik w ścisłanym i rozciągany obszarze zginanej belki żelbetowej otrzymując wyniki, wskazujące na właściwe funkcjonowanie urządzenia.

Czujnik Pimiienowa. Materiałem do wykonania czujnika jest [9] karbinolowo-cementowa pasta izolacyjna. Oprócz zabezpieczenia przed wilgocią chroni ona również czujnik przed uszkodzeniami mechanicznymi. Poziomo ustawiona forma, składająca się z rusztu i podstawy, wypełniana jest polimerem do po-

łowy wysokości rusztu. Po stwardnieniu masy na jej powierzchnię naklejone zostają tensometry elektrooporowe. Po przylutowaniu przewodów i upływie jednej doby forma zostaje wypełniona masą do wierzchu rusztu. Twardnienie trwa trzy doby, po czym ostrożnie wyjęte z otworów rusztu czujniki są gotowe do użytku. W celu zwiększenia przyczepności wykonywane są na powierzchni bocznej nacięcia o głębokości 0,5–1,0 mm. Czujniki mogą pracować na ściskanie lub rozciąganie, a w razie potrzeby można je łączyć w płaskie lub przestrzenne rozety do pomiarów bardziej złożonych stanów odkształcenia.



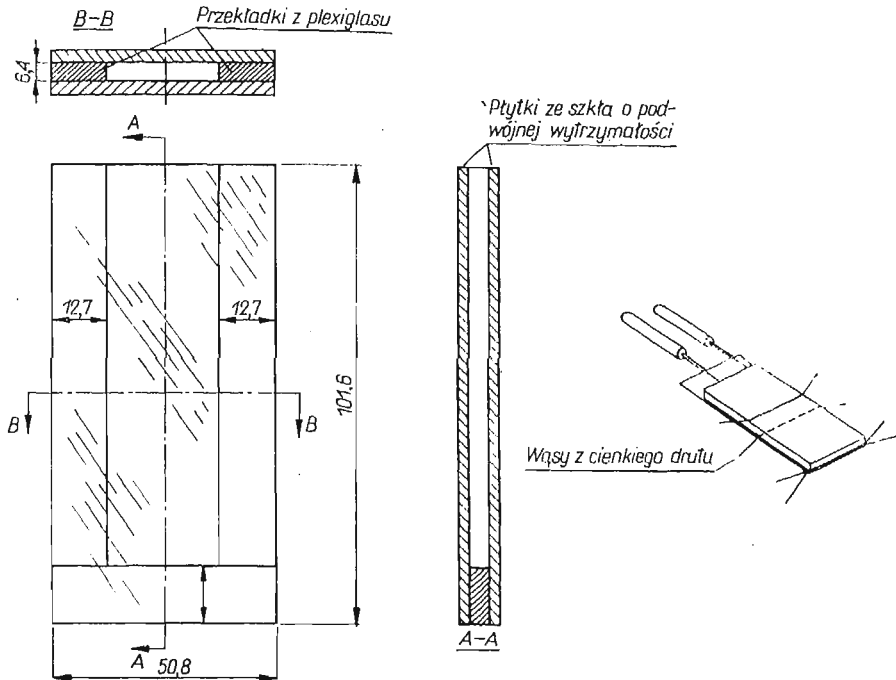
Rys. 5. Czujnik PRMIENOWA. Widoczne są nacięcia mające zwiększyć przyczepność betonu do zewnętrznej powierzchni czujnika [9].

Ważną zaletą przy takim postępowaniu jest możliwość produkowania równocześnie całej serii czujników wykonanych w jednakowych warunkach. W opisywanych badaniach czujniki sprawdzano betonując je w niewielkich próbkach. Następnie sprawdzano rozkład naprężeń w górnej warstwie fundamentu betonowego pod słupem stalowym, przy czym okazało się, że czujniki pracują zadowalająco. Gotowy czujnik pokazany jest na rys. 5.

Czujnik Thomy i Schneebelięgo. O czujniku THOMY i SCHNEEBELIEGO [14] należy wspomnieć ze względu na pewne różnice w procesie wykonania. Do tensometru po przycięciu papierowej podkładki przyklejone zostają wąsy z cienkiego drutu. Po przylutowaniu przewodów o ostatecznej długości tensometr zostaje zawieszony na wspomnianych wążach wewnątrz formy pokazanej na rys. 6. Forma ta zbudowana jest z płytek ze szkła o podwyższonej wytrzymałości oraz z przekładek z plexiglasu. Tak przygotowana forma zostaje podgrzana a następnie wypełniona polimerem o nazwie handlowej Kriston. Kriston posiada dobre własności izolujące i współczynnik sprężystości E równy w przybliżeniu $35\,000\text{ kG/cm}^2$. W krótkim czasie po związaniu masy płytki i przekładki zostają odjęte i czujnik dojrzewa dalej w temperaturze pokojowej.

Badania czujników przeprowadzano po umieszczeniu ich w cylindrach z Kristonu, obciążanych przy dodatkowej kontroli odkształcenia mechanicznymi tensometrami Huggenbergera. Do podobnych doświadczeń wykorzystywano również małe elementy z zaprawy i z betonu. Podstawowe badania prowadzone były po umieszczeniu czujników w betonowej płycie drogowej obciążanej ruchem ciężkich

samochodów ciężarowych, przy czym wielkości odkształceń notowane były na urządzeniu oscyloskopowym.



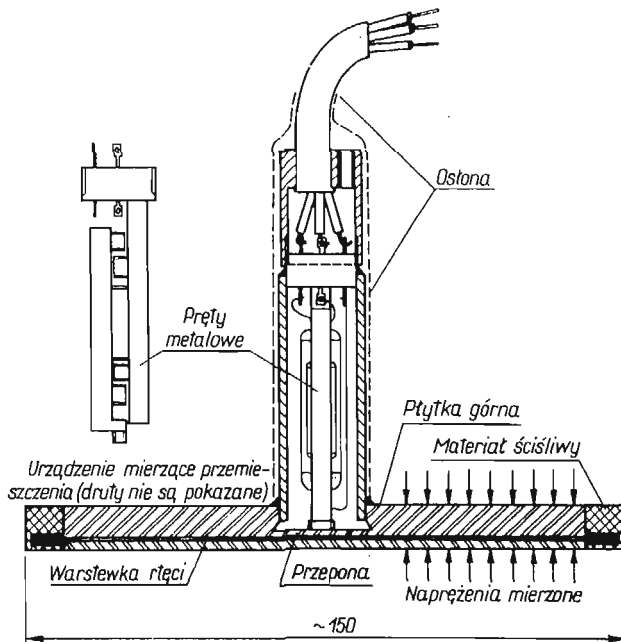
Rys. 6. Forma zastosowana przy wykonaniu czujnika THOMY i SCHNEEBELIEGO. Poniżej tensometr z przyklejonymi wąsami, przygotowany do umieszczenia w formie i zabezpieczenia polimerem [13]

Czujnik Majchrowicza i Weseliego. Istotą sposobu wykonania czujnika jest tu zaimpregnowanie tensometru elektrooporowego tworzywem syntetycznym i po osiągnięciu pewnego usztywnienia — dodatkowe pokrycie go masą plastyczną. Zabezpieczenie takie jest wystarczające do bezpiecznego umieszczenia czujnika w świeżym betonzie. Całe postępowanie jest bardzo nieskomplikowane i nie wymaga w zasadzie posiadania laboratorium. Dokładniejsze informacje można znaleźć w artykule streszczonym w publikacji [6].

Inne czujniki. Poza wymienionymi czujnikami z materiałów wiążących robiono próby czujników betonowych. Zajmowali się nimi J. GŁOMB z Politechniki Śląskiej (rys. 4) oraz MILBAUER [9]. W czujnikach tych beton pełnił głównie rolę zabezpieczenia mechanicznego tensometru. Sklejoną z dwóch połówek kostkę betonu (jak na rys. 4) można było umieszczać w badanej masie bez obawy uszkodzenia nawet przy niedogodnych warunkach wykonania.

3.2.3. Inne sposoby wykorzystania tensometrii elektrooporowej. Czujnik naprężeń Carlsona i Pirtza. Czujnik wykonany jest na zasadzie całkiem odmiennej od poprzednio opisywanych, a przedstawiony został przez R. CARLSONA i D. PIRTZA [1] w 1952 r. Zaprojektowano go jako urządzenie do pomiaru naprężeń. Zasadniczym elementem są tu dwie płytki stalowe przedzielone cienką warstwą rtęci i połączone na brzegach, rys. 7. Do

płytek dołączony jest specjalne urządzenie tensometryczne do pomiaru ciśnienia w rtęci. Urządzenie to mierzy przemieszczenia małej przepony, która stanowi część płytki górnej, za pośrednictwem pomiaru wzajemnego przesunięcia dwóch prętów metalowych. Przepona odkształca się pod wpływem działającego na nią ciśnienia rtęci. W urządzeniu istnieje rodzaj przekładni hydraulicznej — niewielkie zmiany ciśnienia powodują stosunkowo znaczne przemieszczenia wspomnianej przepony. Zastępcza ścisłość czujnika jest zbliżona do ścisłości betonu zapewniając w ten sposób wystarczającą dokładność pomiarów. Cały czujnik ma budowę

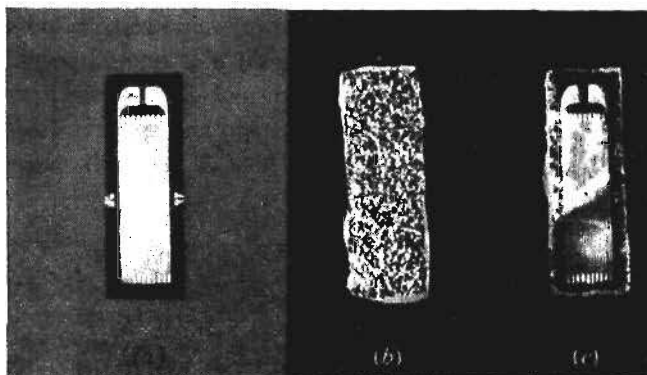


Rys. 7. Czujnik CARLSONA i PIRTZA [1]

na tyle skomplikowaną, że trudno polecać wykonywanie go w laboratoriach wytrzymałościowych. Przedstawiony tu został tylko jako przykład odmiennej konstrukcji. Dokładniejszy opis zarówno uprzednich poszukiwań jak i gotowego czujnika można znaleźć w pracy [1].

Czujnik powierzchniowy umieszczany w czasie betonowania. Dodatkowo należy wspomnieć o szczególnej metodzie wykorzystania tensometrów elektrooporowych. Metoda ta opisana w pracy [8] stanowi jak gdyby etap pośredni pomiędzy naklejaniem czujników na powierzchni zewnętrznej a umieszczaniem ich wewnątrz elementu betonowego. Tensometr elektrooporowy zostaje przygotowany tak jakby naklejono go na cienką warstwę polimeru, chropowatą (posypaną piaskiem) od zewnątrz i gładką od strony tensometru (rys. 8). Czujnik zostaje dalej umieszczony w formie do betonu, przy czym ważne jest, aby przylegał szczelnie do ścianki. Po wypełnieniu formy beton łączy się z chropowatą

powierzchnią polimeru i po wyjęciu elementu na jego ściance znajduje się już przyklejony tensometr. Po przylutowaniu przewodów i zabezpieczeniu tensometru od zewnątrz można dokonywać pomiarów.



Rys. 8. Czujnik powierzchniowy, naklejany metodą od wewnątrz [8]: a—tensometr umieszczony na folii, przygotowany do zabezpieczenia, b—tensometr pokryty żywicą i piaskiem, c—widok z przeciwnej strony przed przymocowaniem do ścianki formy

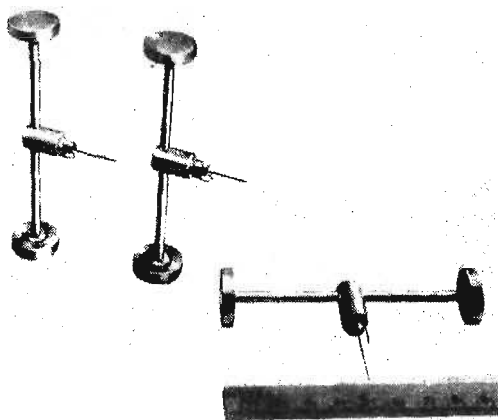
Podstawową zaletą tego sposobu jest uniknięcie powstania w badanym elemencie miejscowych naprężeń związanych z ogrzewaniem i z osuszaniem betonu przed naklejeniem czujnika (ang. errand stresses), co zawsze występuje przy tradycyjnym umieszczaniu tensometrów na powierzchni zewnętrznej.

3.3. Czujniki rezonansowe

Czujniki rezonansowe produkowane są w wielu krajach i różnice konstrukcyjne w ich budowie są nieznaczne. Jako przykład poniżej omówiony będzie czujnik «Télémac» [13].

Czujniki tego typu produkowane są przez firmę francuską Télésures Acoustiques—Télémac. Zasadą działania urządzenia jest proporcjonalność zmian dwóch wielkości — naprężenia struny i częstotliwość jej drgań własnych. Mierząc częstotliwości drgań własnych strun pomiarowej i kompensacyjnej, obciążonej w sposób znany, można określić stan naprężenia, a co za tym idzie odkształcenia tej pierwszej struny, znajdującej się w elemencie badanym. Pobudzenie struny do drgań i odczytywanie częstotliwości następuje na drodze elektromagnetycznej za pomocą urządzenia umieszczonego wewnątrz czujnika. Firma Télémac podobnie jak i inni producenci czujników rezonansowych wykonuje specjalne mostki pomiarowe, za pomocą których można określić stan odkształcenia struny pomiarowej. Praktyczne nastawienie odczytu polega na dobraniu ekstremalnego natężenia dźwięku w głośniku z ewentualną kontrolą wzrokową na wskaźniku lampowym. Produkowane czujniki odkształceń (istnieją oparte na tej samej zasadzie termometry, manometry itp.) mają w zależności od przeznaczenia rozmaite wymiary — od $\varnothing 0,4 \times 10$ cm (rys. 9) do $\varnothing 4,0 \times 30$ cm. Składają się one z metalowej kapsułki, wewnątrz której znajduje się cienka struna stalowa, odizolowana od działania wilgoci. W kapsułce

umieszczono również cewki wzbudzające drgania i połączone przewodami elektrycznymi z mostkiem. Czułość wskazań urządzenia jest rzędu 1 do 5×10^{-6} . Za pomocą czujników rezonansowych można dokonywać pomiarów zarówno statycznych jak i dynamicznych. Są one bardzo odporne na działanie wilgoci i mają tę zasadniczą zaletę, że z ich pomocą można prowadzić porównywalne ze sobą pomiary, oddzielone nawet znacznym odstępem czasu. Nadają się więc one do pomiarów skurczu, pęczania i innych zjawisk długotrwałych jak również do obserwacji stanu odkształcenia tak wolno zmiennego, z jakim się można spotkać np. przy budowie wielkich zapór wodnych. Zasadniczą wadą jest duży koszt i skomplikowana technologia produkcji.



Rys. 9. Przykład czujników typu Télémac [13].

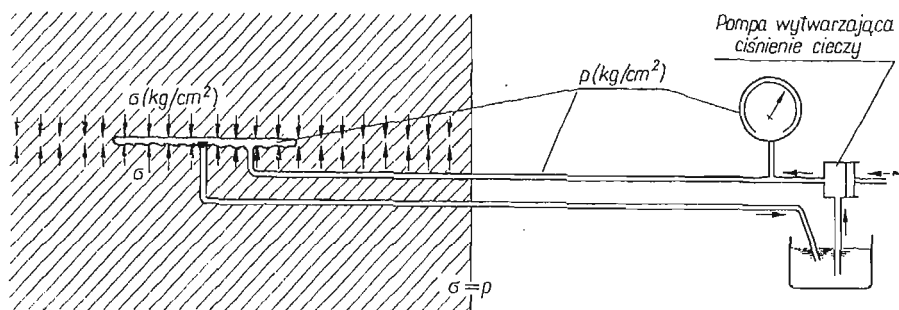
Różnice w poszczególnych rozwiązaniach, wymienionych jako czujniki rezonansowe w p. 3.1., poza technologicznymi polegają na stosowaniu różnych zastępczych współczynników sprężystości. Produkowane są czujniki o współczynniku bądź możliwie bliskim współczynnikowi betonu, bądź możliwie bliskim zeru. Powtarzającą się wadą są znaczne na ogół wymiary urządzeń i, co za tym idzie, trudności prowadzenia dla ograniczonego obszaru pomiarów w różnych kierunkach.

3.4. Czujniki hydrauliczne

Czujniki te służą do pomiaru stanu naprężeń [2]. Do wnętrza betonu wprowadza się elastyczny zbiornik (rys. 10) wypełniany następnie cieczą. Mierzenie zmian ciśnienia w cieczy nie jest skomplikowane, a w efekcie daje pewne informacje o zmianach zachodzących w stanie naprężenia elementu badanego. Odczytane naprężenie jest oczywiście wielkością średnią dla całej powierzchni czujnika. Zasadę działania urządzenia ilustruje rysunek zaczerpnięty z wydawnictwa reklamującego czujniki Glötzla (rys. 10).

Oprócz powyżej opisanych dokonywano prób opracowania urządzeń opierających się na zmianie wraz z odległością takich wielkości, jak oporność indukcyjna czy pojemność. Czujniki tego typu produkowane były z bardzo na ogół wąskim

przeznaczeniem (np. mierzenie nacisku gleby na elementy pług, pomiar niskich ciśnień itp.). Rzadko mogą one znaleźć zastosowanie przy pomiarach wewnątrz elementów z betonu ze względu na koszt produkcji i możliwość tylko jednorazowego wykorzystania.



Rys. 10. Zasada działania hydraulicznego czujnika naprężeń [2].

4. Uwagi o prowadzeniu pomiarów w betonie i wnioski

Najlepszym modelem ciała jest samo ciało. W badaniach praktycznych często nie jest jednak rzeczą możliwą badanie samego ciała. Trzeba posługiwać się systemem analogów — układów mających pewne cechy wspólne z rozważanym. Stąd wynika oczywista konieczność dokonywania badań na próbkach i wyciągania z nich wniosków odnośnie rzeczywistych własności materiału.

Badania na próbkach betonowych dotyczą na ogół zjawisk występujących w sztucznie ustalonych lub przynajmniej ograniczonych warunkach. Wskazane jest ustalenie niezmienności możliwie dużej liczby parametrów doświadczenia. Gdy nie jest to możliwe, należy dokładnie notować przebieg różnych zmian zachodzących w czasie pomiaru, a mogących mieć wpływ na stan deformacji. Przy analizie projektu badań, a zwłaszcza przy rozważaniu układu kompensującego, należy zwrócić uwagę na wszystkie czynniki mogące wpłynąć na zmianę stanu deformacji wewnątrz betonu. Będą to przede wszystkim: struktura betonu, jego wiek, warunki dojrzewania, sposób i wielkość przyłożonego obciążenia, czas i wielokrotność obciążania, temperatura, wilgotność, skurcz i pełzanie. Usiłowania powinny iść w kierunku jak najwłaściwszego wyróżnienia zjawiska badanego.

Brak jest jak dotychczas uniwersalnego czujnika, za pomocą którego można byłoby mierzyć odkształcenia i naprężenia w sposób odpowiadający potrzebom badawczym. Ponieważ odległość jest wielkością, która może być mierzona bezpośrednio, dlatego też do badań należy stosować czujniki odkształceń, a nie usiłować mierzyć naprężenia. Wydaje się, że najsłuszniejszym rozwiązaniem jest stosowanie czujnika odkształceń o możliwie małym współczynniku sprężystości i niewielkich wymiarach poprzecznych. Wymiar podłużny, jak to ogólnie przyjęto, powinien być równy mniej więcej trzykrotnej średnicy największych ziarn kruszywa, które wchodzi w skład badanego betonu.

W materiale tak niejednorodnym jak beton jeden pomiar nie jest ani miarodajny, ani nawet prawdziwy. Wynika stąd konieczność stosowania od razu większej liczby czujników, powtarzania i sprawdzania doświadczeń.

Ponieważ nie zawsze jest możliwe nabycie dobrych czujników produkowanych fabrycznie, a także ponieważ i z innych względów stosowanie ich nie zawsze jest wskazane, zachodzi przeto niejednokrotnie konieczność wykonania czujnika własnymi siłami w laboratorium wytrzymałościowym. Wybór typu czujnika wynika bezpośrednio z charakteru zamierzonych badań i musi być poprzedzony staranną analizą. Przy wykonaniu czujnika z zastosowaniem tensometrów elektrooporowych należy dbać o zachowanie daleko idącej precyzji — zwłaszcza, jeżeli chodzi o zabezpieczenie przeciwwilgociowe. W pracach tego typu nawet drobne niedokładności w wykonaniu mogą bardzo łatwo uniemożliwić kontynuowanie badań.

Przy badaniach betonu, ze względu na zależność wytrzymałości i odkształcalność betonu od wszystkich składowych stanu deformacji, oraz na ich zależności między sobą, wskazane jest prowadzenie jednocześnie pomiaru trzech składowych liniowych i trzech składowych kątowych. Pomijanie niektórych składowych, np. odkształceń poprzecznych w elementach ściskanych czy odkształceń kątowych lub przyjmowanie hipotez, np. założenie płaskich przekrojów, prowadzić może do znacznych błędów i jest niedopuszczalne w badaniach podstawowych. Dlatego też należy albo upewnić się w jakim stopniu na wielkość danej składowej wpływają wielkości pozostałych składowych bądź też bez tej analizy starać się uzyskać obraz wszystkich zmian zachodzących w danym punkcie ciała.

Literatura cytowana w tekście

1. R. CARLSON, D. PIRTZ, *Development of a device for the direct measurement of compressive stress*, American Concr. Inst., Detroit, 3, 24 (1952); Proceedings 49.
2. GLÖTZL, *Ventilgeber für den Bauherrn, die Aufsichtsbehörde und den Statiker*, broszura reklamowa.
3. G. HONDROS, *The protection and manipulation of electrical strain gauges of the bounded wire type for use in concrete, particularly for internal stress measurements*, Mag. Concr. Research, London, 27, 9 (1957), 173–180.
4. A. U. HUGGENBERGER, *Talsperren—Meßtechnik*, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1951.
5. Y. C. LOH, *Internal stress gauges for cementitious materials*, Proc. Soc. Experim. Stress Analysis, Cambridge Mass., 2, 11 (1954), 13–28.
6. J. MAJCHROWICZ, J. WESELI, *Przystosowanie tensometrycznych czujników oporowych do pomiarów wewnętrznych*, Zesz. Nauk. Pol. Śl., Budownictwo z. 14, Gliwice 1964, 137–139.
7. G. MORAVIA, *Misure estensimetriche all'interno di getti di calcestruzzo*, La Ricerca Scientifica, Roma, 8, 25 (1955).
8. K. NEWMAN, L. LACHANCE, R. W. LOVEDAY, *Strain measurements on saturated concrete specimens*, Mag. Concr. Research, London, 45, 15 (1963), 143–150.
9. И. И. ПРИМЕНОВ, *Опыт применения гидроизолированных глубинных датчиков сопротивления для измерения напряжений в бетоне*, Изв. Учебн. Зав., Строительство и Архитектура, нр. 2, Новосибирск 1963, 143–150.

10. Z. ROLIŃSKI, *Zarys elektrycznej tensometrii oporowej*, WNT, Warszawa 1963, 316–319.
11. L. SŁOWAŃSKI, Z. ŚNIADKOWSKI, *O pomiarach naprężeń i sił metodą tensometrii strunowej*, Biul. Inform. Nauk. Techn. ITB, Warszawa, 1/2, 1950, 121–128.
12. Z. ŚNIADKOWSKI, *Measurements of strain and stresses inside cementitious materials*, Proc. Conf. on Experim. Methods of Investigating Stress and Strain in Structures, Praga 1965, 109–117.
13. *Télémessures Acoustiques*, Télémac, dokumentacja ogólna, broszury i prospekty reklamowe.
14. E. C. THOMA, R. E. SCHNEEBELI, *Method for preparing SR-4 strain gauges for embedment in concrete*, J. American Concr. Inst.-Detroit, 4, 24 (1952), Proceedings 49.
15. Z. WASIUTYŃSKI, A. BRANDT, *Sondy do wyznaczania odkształceń w betonie i w gruntach*, Wybrane materiały III Krajowej Konferencji Wytrzymałościowej SIMP—WAT, Wydawnictwo MON, Warszawa 1964.
16. R. ZIMMERMANN, *Pomiry naprężeń i drgań metodami elektrycznymi*, PWN, Warszawa 1959, 447.

Р е з ю м е

ДАТЧИКИ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННОГО И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРИ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В бетоне можно эффективно измерять только лишь деформации. Датчик для измерения деформированного состояния бетона должен удовлетворять многочисленным требованиям, самыми важными из которых являются долговечность и соответствующий подбор механических свойств. Для того, чтобы датчик мог измерять напряженное состояние, вызывая в нем минимальные возмущения — размеры и эквивалентный коэффициент упругости датчика должны быть возможно малыми. С точки зрения лабораторных исследований проводится обзор встречаемых конструкций датчиков для измерения деформаций, включающий также датчики проектированные для измерения напряжений внутри небольших бетонных элементов. Значительная часть конструкций основывается на принципе измерения электрического сопротивления. Рассматриваются датчики изготовленные на металлическом основе а также при использовании связывающих материалов. Обсуждаются примеры других конструкции, между прочим струнные и гидравлические датчики. Кроме того, даются указания, касающиеся проведения самых измерений. Правильно сконструированный датчик при использовании тензометров омического сопротивления является устройством вполне пригодным для измерений мгновенного деформированного состояния в бетонных элементах. В настоящее время такое устройство не пригодно для длительных измерений, в которых пока что можно использовать только лишь струнные датчики.

Summary

GAUGES FOR LABORATORY STRESS AND STRAIN MEASUREMENTS INSIDE CONCRETE ELEMENTS

Investigating the deformation process in concrete block we are able to measure strains only. The gauge destined for measurements of the state of deformation inside a concrete block should satisfy a number of requirements, the most important of which are durability and proper mechanical features. In order to avoid disturbances of measured strains caused by the presence of the gauge, its dimensions and elasticity modulus should be as small as possible. From the point of view of laboratory investigations, given is a review of existing strain gauges including gauges destined for the stress measurements, which can be applied inside small concrete elements. Most

of the gauges is based on the resistance strain-gauges. Described are gauges with metallic skeleton and designed with use of the binding materials. Presented are also examples of other gauges, among them wire-gauges and hydraulic gauges. Given are some remarks concerning checking of gauges and the measuring technique. Well designed gauge with electrical strain-gauges is able to measure the state of strain inside concrete elements. At present such a gauge is inapplicable for long-time measurements for which only wire-gauges can be used.

ZAKŁAD MECHANIKI OŚRODKÓW CIĄGLYCH
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 15 stycznia 1965 r.
