# Błędy w pomiarach odkształcenia wykonywanych w komorze ciśnieniowej czujnikiem indukcyjnym

#### JANUSZ NURKOWSKI

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

#### Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono wyniki testowania wiarygodności pomiaru odkształcenia próbek skał w komorze ciśnieniowej czujnikiem indukcyjnym. Ze względu na konieczność pomiaru bardzo małych przemieszczeń rzędu mikrometra, stosuje się porównawczą metodę pomiaru, wykorzystując czujnik odniesienia zamocowany na materiale o znanych właściwościach. Testom poddano obydwa tory: pomiarowy i odniesienia, na które składają się: czujnik, jego mocowanie do próbki materiału, połączenia, przepusty ciśnieniowe oraz układ elektroniczny generatora LC, z którym współpracują czujniki. Badano jak ciśnienie i temperatura oddziałując na elementy toru wpływa na częstotliwość oscylacji generatora oraz wyznaczono asymetrię tych oddziaływań na tor pomiarowy i odniesienia. Na tej podstawie określono błąd pomiaru odkształcenia. Wykazano, że decydującym czynnikiem zakłócającym pomiar, szczególnie dla ciśnień poniżej 1 MPa, jest zmienna pojemność przepustów ciśnieniowych, natomiast oddziaływanie temperatury na generator nie ma praktycznego wpływu na pomiar. Zmieniono również sposób mocowania czujnika do materiału.

Słowa kluczowe: pomiar odkształceń, wysokie ciśnienie, czujniki indukcyjne, generator LC

#### 1. Wstęp

W laboratoryjnych badaniach właściwości skał, jednym z testów jest obciążenie próbki skały ciśnieniem hydrostatycznym. Narastające ciśnienie powoduje szereg zmian w strukturze próbki, jak np. zaciskanie spękań. Ten ważny dla badacza proces zachodzi już w stosunkowo niewielkim ciśnieniu, na ogół kilkunastu MPa, towarzyszące temu odkształcenia są dla wielu skał na poziomie ułamka promila, co przy ograniczonych rozmiarach próbki do kilku centymetrów oznacza konieczność pomiaru przemieszczenia o kilka mikrometrów. Na wykresie naprężenie – odkształcenie próbki zamykanie spękań przejawia się jako początkowa nieliniowość charakterystyki [1]. Pomiar tak małych wartości odkształcenia nie jest łatwy, a wziąwszy pod uwagę, że czujnik powinien być ponadto odpowiednio mało wrażliwy na zmiany ciśnienia setek a nawet tysięcy MPa i na towarzyszące temu zmiany temperatury około kilkudziesięciu stopni Celsjusza, czynią pomiar skrajnie trudnym.

Stosowanie tensometrów rezystancyjnych do pomiarów deformacji próbek skał w tych warunkach wiąże się z szeregiem niedogodności:

- 1. Gdy próbka jest niejednorodna tensometr rezystancyjny może dać pomiar nie reprezentatywny dla całego materiału, jeśli będzie naklejony na lokalną niejednorodność.
- 2. Naklejenie tensometru na materiał silnie porowaty jest trudne i zmienia jego właściwości mechaniczne (tworzy się kompozyt materiał klej).
- Bardzo trudne jest wykonywanie pomiarów tensometrycznych na próbkach nasączonych cieczą przewodzącą np. wodą, a szczególnie solanką, co ogranicza wiele badań symulujących warunki panujące w górotworze.
- 4. W pomiarach ściśliwości dla skały porowatej lub silnie spękanej ciśnienie hydrostatyczne wgniata ścieżkę oporową tensometru w spękania i pory, niszcząc go.
- 5. Tensometru nie da się odzyskać po pomiarze, co znacząco podnosi koszt badań.
- Tensometr wraz z warstwą kleju reagują na ciśnienie, stąd potrzeba stosowania tensometru kompensacyjnego [2].

Problemów związanych z niejednorodnością, porowatością i przewodnością próbki można uniknąć naklejając tensometr rezystancyjny nie bezpośrednio na próbkę lecz na metalową sprężystą taśmę, która zamocowana jest wahliwie na zaczepach przytwierdzonych do próbki. Powstają jednak wtedy dwa nowe problemy: odkształcenie próbki przenoszone na tensometr jest wielokrotnie zmniejszone, więc spada czułość oraz na zaczepach dochodzi do tarcia więc wystąpienia między innymi histerezy [3].

Ograniczenia te zmusiły do odmiennego sposobu pomiaru, opracowano mianowicie czujnik indukcyjny, który jest jednowarstwową bezrdzeniową cewką. Odkształcenie materiału z przymocowaną za pomocą wsporników cewką powoduje zmianę jej długości. Skutkuje to zmianą indukcyjności tworzącej z pojemnością kondensatora obwód rezonansowy tranzystorowego oscylatora. Mierząc zmiany częstotliwości drgań uzyskuje się informację o odkształceniu próbki [4].

Oczywiście taki sposób pomiaru ma też pewne wady. Zmienne ciśnienie hydrostatyczne cieczy w komorze i skojarzone z tym zmiany temperatury wywołują szereg czynników zakłócających pomiar, do których przede wszystkim należy zaliczyć:

- 1. Zmiany rezystancji czujnika i jego wymiarów,
- 2. Zmiany pojemności montażowych i przepustów elektrycznych,
- 3. Wpływ na system mocujący czujnik do materiału.

Zastosowanie dodatkowego czujnika odniesienia o dużej zgodności parametrów względem czujnika pomiarowego i ich naprzemienne podłączanie za pomocą elektronicznego klucza do jednego generatora, znacznie zredukowało błędy związane z wymienionymi czynnikami. Na podstawie jego wskazań oblicza się odpowiednie poprawki, zakładając jednakowy wpływ ciśnienia i temperatury na oba czujniki, ich doprowadzenia, system mocowania oraz przepusty ciśnieniowe. W praktyce oddziaływania te są jedynie bardzo zbliżone, skąd wynika powstanie błędów w pomiarach. Wprowadzone ostatnio izolatory ceramiczne w systemie mocowania czujnika ograniczyło pojemności montażowe do kilku pikofaradów.

Wydaje się, że największy wpływ ciśnienia będzie na stosunkowo dużą wartość pojemności przepustów wynoszącą około 60 pF, w porównaniu do pojemności obwodu rezonansowego rzędu 1000 pF i na mocowanie czujnika do materiału badanego.

Innym problemem jest zjawisko przepływu prądu o częstotliwości kilku MHz nie tylko przez przewody ale i niestabilny jego przepływ przez poszczególne części składowe komory. Również rozproszone pole magnetyczne czujnika powoduje silne oddziaływanie ze ścianami komory ciśnieniowej. Zjawiska te powodują niestabilne oscylacje generatora.

Mimo wszystko ten sposób pomiaru wykazał w wieloletniej praktyce przewagę nad tensometrami rezystancyjnymi, w przypadkach wymienionych powyżej i wtedy czujniki indukcyjne stosowane są rutynowo. Istnieje jednak pewna nieufność do stosowania ich na szerszą skalę, czemu nie należy się dziwić wziąwszy pod uwagę, że tensometrów rezystancyjnych w warunkach wysokiego ciśnienia używa się od 50 lat (Bridgman) [5] a czujników indukcyjnych od kilku. W pracy doktorskiej z 2001 r. poświęconej tym czujnikom analizowano wiarygodność uzyskiwanych wyników pomiarowych oraz omówiono niektóre przyczyny zakłócające pomiar. Od tego czasu ulepszono sposób mocowania czujnika zapewniającą jego galwaniczną separację od próbki oraz wykryto inne źródła błędów, ponadto problem stabilności generatora przedstawiono pierwotnie w zbytnim uproszczeniu.

Poniżej przedstawiono więc efekty wielostronnego testowania przedstawionego sposobu pomiaru na okoliczność występowania czynników zakłócających pomiar, które dotychczas były zbadane niewystarczająco lub były niezidentyfikowane. Pozwoli to ocenić wiarygodność pomiarów i wyznaczyć kierunki działań zmierzających do poprawy własności pomiarowych czujnika i całej metody.

#### 2. Mocowanie czujnika i ocena błędów pomiaru odkształcenia

Czujnik mocowano do stalowego wspornika na dwa sposoby. Pierwszy polegał na przylutowaniu czujnika bezpośrednio do wspornika w kształcie litery H, w drugim przypadku czujnik przylutowano do śrub M3 wkręconych do wspornika. Przedstawia to rys. 1, na którym po lewej widać czujniki przymocowane do wspornika poprzez łącznik z drutu stalowego i izolator wykonany z rezystora SMD o rezystancji 2 MΩ, a po prawej czujnik zamocowany do śrub. Drugi sposób mocowania był analogiczny jak w pomiarze odkształcenia walcowych próbek skał, podczas których do podstaw próbki są przyklejane stalowe kowadła służące do mocowania gumowych osłon separujących próbkę od cieczy wypełniającej komorę. Po założeniu osłon do kowadeł wkręca się śruby i do nich lutowany jest czujnik. Mocując jeden czujnik do wspornika tylko przez lutowanie a drugiego za pośrednictwem śrub można było ocenić wpływ śrub na jego działanie. Ciśnienie i temperatura oddziałując na połączenie śruby z kowadłem może wywołać jej wygięcie lub przesunięcie w górę lub w dół, zmieniając długość czujnika.

Ocenę wpływu ciśnienia i temperatury na powstawanie błędów pomiaru odkształcenia czujnikiem, dokonano na podstawie wyznaczenia różnicy między obliczonym odkształceniem wspornika mierząc zmiany częstotliwości, a odkształceniem wyliczonym na podstawie znajomości współczynnika ściśliwości stali wziętym z tablic [6]. Założono przy tym liniową zależność ciśnienie – odkształcenie stali w zakresie stosowanych ciśnień, czyli do 400 MPa. Stosowano różne prędkości zmian ciśnienia od 0,1 do 1 MPa/s, co powodowało zmiany temperatury cieczy w komorze od kilku do kilkunastu °C. Długość bazy pomiarowej równała się długości czujnika czyli 34 mm i wynikała z różnicy między długością wspornika a długością łączników. Czułość czujnika wynosiła  $30 \pm 1 \,\mu$ m/kHz.



Rys. 1a. Czujniki przymocowane bezpośrednio do wspornika, podłączone do przepustów ciśnieniowych korka komory aparatu GTA-10



Rys. 1b. Czujnik przylutowany do śruby kowadełka (na górze) i do obejmy poprzez łącznik (na dole)

### 3. Niestabilność oscylacji w ciśnieniu normalnym

Pomiar odkształcenia próbek skał przebiega na ogół w kilku cyklach kompresji i dekompresji i w zależności od szybkości zmian ciśnienia oraz ilości cykli trwa od jednej do kilku godzin. Ważna zatem jest stabilność całego toru pomiarowego: czujnik, generator, miernik częstotliwości, zasilacz, w ciągu kilku godzin lub dłużej. Pomiaru niestabilności oscylacji dokonano w ciśnieniu normalnym zmieniając temperaturę otoczenia w różnym zakresie i z różną szybkością. Pomiary te dokonano w dwóch układach: w pierwszym zmiany temperatury obejmowały tylko czujniki a reszta toru pomiarowego (generator, przełącznik czujników, miernik częstotliwości, zasilacz) pozostawała w stałej temperaturze, w drugim układzie termostatowano czujniki a zmianom temperatury poddano układ elektroniczny generatora. Zmiany częstotliwości rejestrowano gdy do generatora był podłączany przemiennie czujnik pomiarowy i odniesienia, wyznaczając przy tym niewspółbieżność zmian oscylacji między czujnikami.

#### 3.1. Oddziaływanie temperatury na moduł generatora

Poniżej zamieszczono zespół trzech rysunków z wykresami ilustrującymi wpływ zmian temperatury na częstotliwość. Na każdym z nich przedstawiono wykres zmian temperatury, zmiany częstotliwości z pierwszego i drugiego czujnika oraz błędy współbieżności tych zmian i wywołany tym błąd wyliczenia przemieszczenia. Rysunek 2a ilustruje wpływ szybkich zmian temperatury na częstotliwość oscylacji generatora, którego obwód rezonansowy był wyposażony w kondensator kompensacji termicznej. W przypadku rysunku 2b usunięto ten kondensator dopuszczając do prawie dziesięciokrotnego zwiększenia wpływu temperatury na częstotliwość. Wreszcie rysunek 2c przedstawia zmiany częstotliwości rejestrowane w czasie trzech dni, pod wpływem niewielkich, kilkustopniowych zmian temperatury. W pierwszych dwóch przypadkach czujniki były osadzone na wspornikach i umieszczone w naczyniu z naftą o pojemności 1 dcm<sup>3</sup>, wsadzonym do termicznie izolowanego pojemnika, a układ elektroniczny modułu generatora czyli kondensatory obwodu rezonansowego i tranzystory: generacyjny, wtórnika, przełącznika wraz z opornikami i kondensatorami poddane były cyklicznym zmianom temperatury od 10 do 30°C. Taki przedział temperatur z naddatkiem



Rys. 2a. Efekt szybkich zmian temperatury otoczenia na generator z kompensacją termiczną



Rys. 2b. Efekt szybkich zmian temperatury otoczenia na generator bez kompensacji termicznej



Rys. 2c. Wpływ małych i wolnych zmian temperatury w ciągu 2,5 dnia

pokrywa możliwe jej zmiany w pomieszczeniu laboratorium. Nieciągłości niektórych wykresów są wynikiem ograniczonej do 4 Hz rozdzielczości pomiaru częstotliwości. To ograniczenie jest efektem przyjętego okresu zliczania impulsów przez częstościomierz do 125 ms oraz konieczność transmisji i przeliczenia danych z czujników temperatury i ciśnienia na bieżąco, tak aby cały cykl pomiarowy trwał około 1 s.

W przypadku generatora skompensowanego termicznie (rys. 2a) zmiany częstotliwości oscylacji były około 300 Hz dla zmian temperatury od 11 do 28°C, przy częstotliwości wyjściowej rzędu 3000 kHz i odwrotnie proporcjonalne do temperatury. Na rysunkach łatwo zauważyć współbieżność zmian częstotliwości z obu czujników (dolny wykres), różnice nie przekraczają 20 Hz.

Usunięcie kondensatora kompensacyjnego i pozostawienie w obwodzie rezonansowym tylko kondensatorów o zerowym współczynniku termicznym nie spowodowało zmniejszenia współbieżności zmian częstotliwości mimo, że zmiany bezwzględne wzrosły około dziesięciokrotnie i wynosiły od +1500 do –2500 Hz, dla takich samych zmian temperatury (rys. 2b). Dowodzi to słuszności przyjęcia koncepcji użycia półprzewodnikowego przełącznika cewek, który łączy je do tego samego obwodu rezonansowego i tranzystora.

Błąd pomiaru wynikający z niewspółbieżności zmian częstotliwości na poziomie 20 Hz wynosi około 0.6 μm przy szybkości zmian temperatury dochodzącej do 0.1°C/s, w zakresie od 10 do 30°C. Stalowy wspornik o długości 34 mm w ciśnieniu 300 MPa odkształci się o 26.4 μm, stąd względny błąd będzie ±2.3 %. Ponieważ w praktyce temperatura w czasie eksperymentu trwającego około 1 godziny zmienia się co najwyżej o 1 lub 2°C, a skały są bardziej ściśliwe od stali, więc błąd względny pochodzący od wpływu temperatury na elektronikę będzie mniejszy od 1%. Należy zaznaczyć, że analiza ta nie obejmuje błędów pochodzących od zmiennego ciśnienia, jak dzieje się w pomiarach ściśliwości, a tylko błędy spowodowane niestabilnością termiczną i czasową.

Największy wpływ na zmiany częstotliwości ma oddziaływanie temperatury na tranzystor generacyjny bo jest on około  $-10^{-3}$ /°C. Tak duży wpływ temperatury tranzystora na częstotliwość jest spowodowany silnym jego sprzężeniem z obwodem rezonansowym, aby uzyskać oscylacje mimo małej dobroci cewki stalowej wynoszącej około 2. Duża rezystancja czujnika i silne sprzężenie jest niezbędne dla skompensowania termicznego czujnika.

Analizując wykresy niewspółbieżności można stwierdzić, że choć niewielkie, ale są one proporcjonalne do zmian temperatury, więc odpowiedzialny jest za to określony czynnik lub zespół czynników, a nie chaotyczne zmiany częstotliwości będące konsekwencją małej dobroci obwodu rezonansowego. Dotychczas nie udało się jednoznacznie wykazać czy za niewspółbieżność odpowiada różna reakcja tranzystorów przełącznika na temperaturę, przepustów czy też różna wrażliwość czujników, gdyż temperatura cieczy w której zanurzone były czujniki zmieniała się podczas eksperymentu około 0.5°C. Z następnych testów wynika, że przepusty mają w tym pewien udział.

Zmniejszenie asymetrii parametrów obwodu rezonansowego względem temperatury w procesie przełączania czujników można osiągnąć na dwa sposoby:

- 1. Znajdując i usuwając źródło asymetrii
- 2. Dołączając równolegle do obwodu jednego z czujników kondensator korekcyjny o odpowiedniej wartości pojemności i współczynniku termicznych zmian pojemności (po stronie niskiego ciśnienia).

W przypadku pierwszym najbardziej prawdopodobna jest asymetria działania tranzystorów przełączających. Drugi sposób wydaje się bardziej efektywny, ale jego wadą jest to, że w przypadku szybkich zmian temperatury, bezwładność takiego kondensatora może być znacząco inna niż elementu kompensowanego. Z obliczeń wynika, że dla poprawy symetrii trzeba dołączyć kondensator o termicznym współczynniku zmian pojemności  $-150 \times 10^{-6}$  (typ 2) i wartości około 20 pF.

## 3.2. Wpływ temperatury na zespół: czujnik – wspornik-przepust w ciśnieniu normalnym

Podstawową zaletą wysokorezystancyjnego stalowego czujnika jest niewielki wpływ jego temperatury na częstotliwość drgań generatora. Ta cecha umożliwia pomiar odkształceń poniżej procenta przy kilkunastostopniowych zmianach temperatury w komorze ciśnieniowej. Użycie do tego celu czujnika miedzianego jest praktycznie niemożliwe, gdyż wpływ temperatury cewki miedzianej na częstotliwość jest rzędu 10<sup>-4</sup>, natomiast stalowej nie więcej niż 10<sup>-6</sup>. Oddziaływanie temperatury zespołu czujnik-wspornik-przepust na częstotliwość, w ciśnieniu normalnym, zbadano w następujący sposób: oba czujniki na metalowych wspornikach umocowano do korka ciśnieniowego z przepustami i zanurzono w litrowym, izolowanym termicznie naczyniu wypełnionym naftą. Pod powierzchnią cieczy znajdowały się również przepusty elektryczne korka. W naczyniu umieszczono elektryczną grzałkę, którą podgrzewano uprzednio ochłodzoną ciecz, w przedziale temperatur możliwych do zaistnienia podczas badania ściśliwości w komorze ciśnieniowej tj. od około 10 do 30°C. Symulowano w ten sposób zmiany temperatury w komorze, bez zmian ciśnienia. Dzięki izolacji termicznej naczynia temperatura modułu generatora zmieniała się nie więcej niż  $\pm 0.2$ °C.



Rys. 3. Wpływ temperatury zespołu czujnikwspornnik-przepust na częstotliwość

Rysunek 3 przedstawia efekty jednego z wielu wykonanych pomiarów. Kolejno od góry przedstawiono przebieg zmian temperatury, zmiany częstotliwości z jednego i drugiego czujnika, różnicę wskazań obu czujników, wszystkie w funkcji czasu oraz częstotliwość drugiego czujnika w funkcji temperatury. Zmiany częstotliwości w funkcji temperatury czujnika wraz ze wspornikiem miały za każdym razem podobny charakter. W zakresie od około 10 do 20°C zmiany częstotliwości były słabo zauważalne, a w większej temperaturze częstotliwość malała w tempie około 2 Hz/°C, dla pierwszego czujnika i 1 Hz/°C. Fluktuacje częstotliwości około ±8 Hz wokół średniej wynoszącej dla jednego czujnika 2781 kHz i 2777 kHz dla drugiego są spowodowane intensywnym mieszaniem się cieczy, podgrzewanej od dołu. Na efekt ten zwrócono uwagę w opracowaniu [7]. Podczas studzenia, gdy ciecz jest praktycznie nieruchoma oscylacje są bardziej stabilne. Chwilowe zmiany częstotliwości o ±8 Hz dają różnicowe zmiany maksymalnie o ±16 Hz, a co za tym idzie błędy wyliczenia przemieszczenia będą około 0.5 µm. Widać to na dolnym wykresie w postaci czterech poziomów przebiegu zmian częstotliwości i odkształcenia. Nie jest to wielką niedogodnością, gdyż uśrednienie wyników za okres kilku sekund zdecydowanie zmniejszy fluktuacje.

Podsumowując badania stabilności termicznej i czasowej całego toru pomiarowego: czujnika wespół z jego mocowaniem, przepustem i współpracującego z nim układu elektronicznego, można stwierdzić że dzięki małej asymetrii zmian częstotliwości z czujnika pomiarowego i odniesienia rzędu kilkudziesięciu herców, błąd pomiaru przemieszczenia jest mniejszy niż 1 µm, natomiast względny błąd pomiaru odkształcenia będzie tym mniejszy im dłuższa będzie próbka i większa jej ściśliwość. Dla typowych próbek o długości około 40mm oraz zmian temperatur w laboratorium i komorze ciśnieniowej ±10°C, nawet gdy te pomiary trwają wiele dni, można mierzyć odkształcenie z rozdzielczością 0.003%. W praktyce ograniczając wahania temperatury do kilku stopni i czas pomiaru do kilku godzin, można osiągnąć rozdzielczość lepszą niż 0.001%.

Potencjalne możliwości pomiaru odkształceń czujnikiem indukcyjnym są porównywalne do tensometrów rezystancyjnych. Dowodzi tego test w którym dokonano pomiaru deformacji podłużnej walcowej próbki duraluminiowej tensometrami rezystancyjnymi i czujnikami indukcyjnymi w prasie INSTRON, w ciśnieniu normalnym [8]. W eksperymencie tym obydwa czujniki indukcyjne zamocowane na stalowych wspornikach, przyklejonych do walca poprzez izolatory, po przeciwnych stronach w pobliżu podstaw były czujnikami pomiarowymi, czyli brak było czujnika odniesienia. Zrezygnowano z niego gdyż pomiar, bez zmian ciśnienia, trwał stosunkowo krótko, bo około 30 minut, a temperatura otoczenia zmieniała się tylko o kilka dziesiątych stopnia. Mierząc niezależnie odkształcenia po obu stronach próbki możliwa była obserwacja momentu gnącego próbki jako rezultat dopasowania się do kowadeł prasy, który występował w początkowej fazie eksperymentu (dla sił mniejszych niż 25 kN). W szczególności gdy czujnik "indukcyjny 1" rejestrował ściskanie próbki, "indukcyjny 2" pokazał jej rozciąganie. Tensometry rezystancyjne przyklejone do próbki w pobliżu czujników indukcyjnych połączone były szeregowo i dawały sygnał uśredniony, bowiem dysponowano tylko jednym torem pomiarowym.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów w czterech cyklach obciążania i odciążania znajdują się na rys. 4. Pokazują one dobrą zgodność wyników pomiarów wykonanych tensometrami z uśrednionymi wskazaniami czujników indukcyjnych.



Rys. 4. Pomiar odkształceń podłużnych wykonanych czujnikami różnych typów

#### 4. Wpływ przepustów na pomiar w zmiennym ciśnieniu

Aby zbadać wpływ przepustów, czujniki zamontowane na metalowym wsporniku umieszczono poza komorą ciśnieniową i podłączono do przepustów korka komory po stronie niskiego ciśnienia oraz do generatora, poprzez przełącznik cewek. W komorze zalanej naftą pozostawały tylko końcówki lutownicze przepustów. Ponieważ przez przepusty nie płyną prąd, ich oddziaływanie na obwód rezonansowy było czysto pojemnościowe. Izolacje przepustów do korpusu komory uznano za idealna, co potwierdza praktyka. Zmiany pojemności przepustów wywołane wpływem ciśnienia zmieniały częstotliwość oscylacji generatora z przyłączonymi czujnikami. Wykonano kilka testów w zakresie do 300 MPa, po dwa cykle sprężania i rozprężania. Uzyskane wyniki były bardzo powtarzalne. Pojawił się skokowy spadek częstotliwości o około 200 Hz dla ciśnienia poniżej 1 MPa. Rysunek 5 na górze przedstawia zmierzone zmiany częstotliwości z obu czujników w dwóch cyklach obciążania ciśnieniem hydrostatycznym oraz wyliczone zmiany pojemności jednego z przepustów dla obu cykli, a u dołu pokazano jak niewspółbieżność zmian częstotliwości wpłynełaby na pomiar ściśliwości stali, przebieg zmian temperatury nafty oraz wartość niewspółbieżności zmian częstotliwości w pierwszy i drugim cyklu obciążania i odciążania. Krzywa przedstawiająca zależność częstotliwości od ciśnienia w pierwszym cyklu ma maksymalną histerezę około 200Hz, a w drugim znacznie mniejszą bo 100 Hz. Na podstawie zmian częstotliwości, znając pojemność obwodu rezonansowego, wyliczono zmiany pojemności przepustów elektrycznych w funkcji ciśnienia. Są one małe, bo ułamki piko farada, w porównaniu do pojemności przepustu równej 62 pF jest to ułamek procenta. W porównaniu z pojemnością całkowitą obwodu rezonansowego około 1nF zmiany te stanowią  $10^{-4}$ .





Różnice w zmianach częstotliwości wynikłych z oddziaływania ciśnienia na jeden i drugi przepust wynosiły maksymalnie 80 Hz tak w pierwszym jak i drugim cyklu dając błąd pomiaru około 2.5 μm. Nie spowodowało to znaczących błędów w wyznaczeniu ściśliwości stali w postaci nieliniowości bądź histerezy.

Hipotetycznie histerezę na wykresie zależności pojemności przepustu od ciśnienia, można wyjaśnić tak, że odległość przepustu od metalowego gniazda w korpusie korka powraca do stanu pierwotnego po zadziałaniu ciśnienia z pewnym opóźnieniem. Uważa się, że odpowiada za to pyrofilitowa izolacja między gniazdem a przepustem. Schematycznie budowę przepustu przedstawiono na rys. 6. Po kilku godzinach



Rys. 6. Schemat budowy przepustu ciśnieniowego

od poprzedniego eksperymentu, w zespole przepust-izolacja-gniazdo praktycznie nie istnieją naprężenia, a dystans między nimi jest maksymalny i niezmienny. Rozpoczynając sprężanie dystans ten maleje, a pojemność rośnie. Podczas rozprężania dla danego ciśnienia dystans jest nieco mniejszy niż podczas sprężania, gdyż stała czasowa rozładowywania naprężeń przez odkształcanie się izolacji jest porównywalna do czasu trwania doświadczenia, więc pojemność jest większa i pojawia się histereza. Podczas drugiego cyklu sprężania histereza jest mniejsza niż poprzednio, a przede wszystkim nie ma gwałtownego skoku dla ciśnienia mniejszego od 1 MPa, gdyż przepust nie wrócił do poprzedniej pozycji względem gniazda.

Podczas sprężania i rozprężania dochodziło również do zmian temperatury cieczy w komorze, a tym samym do zmian temperatury przepustów. Mogło to również być przyczyną zmian ich pojemności. Należało więc zbadać jak duży jest ten wpływ.

#### 5. Wpływ temperatury na pojemność przepustów

Badanie to wykonano w układzie identycznym jak podczas wyznaczania wpływu ciśnienia na pojemność przepustów, tzn. czujniki umieszczono poza komorą, zachowując ich połączenie z przepustami. Wewnątrz komory umieszczono elektryczną spiralę grzejną, którą podgrzewano naftę o około 6°C, następnie przerywano dopływ prądu i ciecz studziła się w sposób naturalny przez oddawanie ciepła do otoczenia. Aby nie wydłużać czasu studzenia ponad miarę, przerywano eksperyment przed osiągnięciem temperatury początkowej. Tempo zmian temperatury i zakres jej zmian były podobne jak podczas pomiaru ściśliwości.

Rysunek 7 przedstawia wyniki pomiarów zmian częstotliwości z jednego i drugiego czujnika oraz ich niewspółbieżność. Widać że jeden z przepustów dwukrotnie więcej reaguje na temperaturę niż drugi. Przyczynia się to do błędów w porównawczej metodzie pomiaru odkształcenia, gdzie zakłada się identyczność wpływu ciśnienia i temperatury na oba tory pomiarowe. Zależność pojemności przepustów od temperatury w tym zakresie jest niewielka, bo powoduje maksymalne zmiany częstotliwości pierwszego czujnika o około 30 Hz, a drugiego około 90 Hz. Odpowiadające temu maksymalne zmiany pojemności to odpowiednio 0.02 pF i 0,05 pF. Wywołany tym błąd pomiaru będzie około 2 µm, uwzględniając różnicową metodę pomiaru.



Rys.7. Wpływ temperatury przepustów na częstotliwość czujników

Przebieg zmian częstotliwości w funkcji temperatury gdy czujniki są umieszczone poza komorą jest bardzo zbliżony do zmian w sytuacji gdy czujniki są w komorze i poddane działaniu tylko temperatury (patrz rys. 3). Co więcej, wartość niewspółbieżności zmian częstotliwości spowodowany temperaturą jest podobna jak w wyniku działania ciśnienia (rys. 5). Można stąd wnioskować, że pominąwszy początkowy skok częstotliwości dla ciśnień poniżej 1 MPa, za zmiany częstotliwości (pojemności przepustów) odpowiada głównie temperatura.

Termiczne zmiany pojemności przepustów wynikają z dwóch przyczyn:

- Zmian dystansu przepust korpus korka na skutek rozszerzalności cieplnej, głównie izolacji. Ponieważ temperatura przepustów nadąża z opóźnieniem za mierzoną temperaturą cieczy, pojawia się histereza.
- Zmian pojemności części przepustu w stosunku do metalowego korpusu korka, która jest w kontakcie z naftą. Przenikalność dielektryczna nafty zależy od temperatury, która rosnąc zmniejsza przenikalność, więc i pojemność.

Z szacunkowych pomiarów i wyliczeń otrzymano, że pojemność części przepustu będącej w kontakcie z naftą względem metalowego korka ma około 1 pF, po zalaniu naftą pojemność wzrasta do 2 pF ( $\varepsilon_r$  nafty=2), a wtedy wzrost temperatury o 5°C spowoduje spadek pojemności o około 0.013 pF (termiczny współczynnik zmian przenikalności nafty w okolicy 20°C to około 13<sup>-4</sup>/°C [4]). Wynika z tego, że około połowa termicznych zmian pojemności przepustu jest spowodowana oddziaływaniem na przenikalność dielektryczną nafty. Pomiaru pojemności wystającej części przepustu względem masy korka dokonano zalewając przepust i korek naftą, rejestrując spadek częstotliwości spowodowany wzrostem pojemności.

#### 6. Zmiany częstotliwości w początkowej fazie sprężania

Częstotliwość w początkowej fazie pomiaru ściśliwości zmienia się w charakterystyczny, powtarzalny sposób: ciśnienie poniżej 1 MPa, powoduje skokowy spadek częstotliwości o około 200 Hz. Rysunek 8 przedstawia jak zmienia się częstotliwość z obu czujników podczas sprężania nafty do 20 MPa. Eksperyment wykonano w układzie gdy czujnik był zamocowany na stalowym wsporniku, a wspornik przymocowano do korka z przepustami. Zestaw ten wsadzono do komory ciśnieniowej wypełnionej naftą. Rejestrację częstotliwości rozpoczęto po wciśnięciu korka do komory, ale przed zakręceniem śruby blokującej korek. Rysunek 9 przedstawia fragment osłony komory i śrubę blokującą, znajdująca się wewnątrz osłony walcowa komora ma średnicę 50 mm.

Do 180 sekundy sprawdzono stabilność generatora, poczym rozpoczęto wkręcanie śruby blokującej w gwint osłony komory, uzyskując końcowe położenie korka w 220-tej sekundzie. Towarzyszył temu wzrost częstotliwości o 160 Hz. Powodem tego jest oddziaływanie na pole magnetyczne lub elektryczne wydosta-



Rys. 8. Zmiany częstotliwości w początkowej fazie sprężania

jące się przez szczeliny obudowy generatora podczas wkręcania metalowej śruby do osłony generatora, który jest umiejscowiony bezpośrednio przy korku. Oddziaływanie to stabilizuje się po odkręceniu śruby na odległość około 5 mm od obudowy generatora (korka). W 360-tej sekundzie rozpoczęto sprężanie nafty w komorze, w tempie najwolniejszym jaki można było nastawić regulatorem. Powodowało to stopniowe zmniejszenie częstotliwości o 150 Hz, chociaż czujnik ciśnienia rejestrował minimalny wzrost ciśnienia około 0.1 MPa, tj. na granicy swojej rozdzielczości. Monotoniczny spadek częstotliwości trwał do 480 s, w której nastąpiło gwałtowne zmniejszenie częstotliwości o następne 200 Hz i zauważalny wzrost ciśnienia.

Taki nagły skok częstotliwości powtarza się każdorazowo i nie jest związany ze zmianą ustawienia regulatora wydajności pompy. Zmiany częstotliwości sygnału drugiego czujnika (odniesienia) były niemal identyczne, więc stosunkowo duże wahania częstotliwości nie wpływały zasadniczo bład na pomiaru ściśliwości, gdyż jej wartość oscylowała od  $\varepsilon = -0.002$  do +0.003%, dzięki temu że ściśliwość jest obliczana proporcjonalnie do różnicy częstotliwości sygnału z obu czujników. Różnice wskazań obu czujników są niewielkie bo około ± kilkadziesiąt herców, co przedstawia dolny wykres. Gdyby nie stosować czujnika odniesienia, błędy pomiaru ściśliwości były by dziesięciokrotnie większe. Za spadek częstotliwości o kilkaset herców, dla ciśnienia poniżej 1 MPa. odpowiada najprawdopodobniej wzrost pojemności elektrycznej przepustu łączącego czujnik z generatorem, w stosunku do korpusu komory pod wpływem ciśnienia, co wykazano uprzednio.

Aby wykluczyć wszelkie wątpliwości, wykonano eksperyment, w którym jeden czujnik był wewnątrz komory, a drugi połączony z generatorem przez dodatkowy drugi przepust ciśnieniowy w korku był poza komorą ciśnieniową. Użycie drugiego przepustu do wyprowadzenia czujnika na zewnątrz podwoiło



Rys. 9. Fragment osłony komory ze śrubą blokującą korek

pojemność względem masy, więc powinno podwoić również wpływ na częstotliwość. Rysunek 10 przedstawia kolejno od góry przebieg zmian ciśnienia, częstotliwość z czujnika na zewnątrz komory i częstotliwość z czujnika wewnątrz komory oraz temperaturę cieczy (dolny wykres) w funkcji czasu. Charakter zmian częstotliwości obu czujników jest prawie identyczny, z tym że dla czujnika zewnętrznego, połączonego przez dwa przepusty zmiany te były prawie dwa razy większe, zgodnie z przewidywaniem. Oczywisty wniosek z tego, że za zmiany częstotliwości w początkowej fazie sprężania odpowiada oddziaływanie ciśnienia na przepusty a nie na czujnik bądź jego mocowanie. Początkowo łagodne zmiany częstotliwości w setnej sekundzie skokowo maleją o kilkaset herców, mimo że ciśnienie rośnie monotonicznie. Częstotliwość stabilizuje się po przekroczeniu ciśnienia 0.4 MPa i utrzymuje się aż do momentu odkręcenia śruby odpowietrzającej, co zaznaczono linią przerywaną. Przy dekompresji cieczy w komorze, w okolicy 0.2 MPa następuje skokowy wzrost częstotliwości (bez fazy łagodnych zmian, jak podczas sprężania), do wartości początkowej. Podczas eksperymentu temperatura otoczenia była niezmienna. Sprężano ciecz w komorze tylko do 6 MPa, gdyż powyżej wpływ ciśnienia na przepusty jest zdecydowanie mniejszy, a ograniczono tym zmiany temperatury cieczy do 1°C by nie mogła mieć znaczącego wpływu na eksperyment.

Przepusty elektryczne w korku reagują podobnie na ciśnienie, więc użycie czujnika odniesienia w dużym stopniu redukuje błąd wywołany wyżej opisanym zjawiskiem. Na rys. 11 po lewej pokazano wyniki pomiaru ściśliwości stali zanurzonej w cieczy sprężanej do 6 MPa (kółka) i następnie rozprężanej do ciśnienia atmosferycznego (krzyżyki), w sytuacji gdy oba czujniki umieszczono w komorze, jak podczas typowego pomiaru odkształcenia. Czujnik odniesienia był przylutowany za pośrednictwem ceramicznych izolatorów do stalowego wspornika a pomiarowy też przez izolatory do śrub wkręconych w stalowy wspornik. Na wykresie tym zamieszczono również linię prostą przedstawiającą tablicową wartość ściśliwości stali,



Rys. 10. Zmiany częstotliwości z czujnika wewnątrz i zewnątrz komory podczas sprężania

co ułatwia analizę błędu wyznaczenia odkształcenia. Punktowy charakter wykresu wynika z ograniczonej rozdzielczości pomiaru ciśnienia (0.1 MPa) i częstotliwości (4 Hz). Ujemne ciśnienia o niewielkiej wartości 0.1 i 0.2 MPa są powodowane nietrzymaniem zera przez miernik. Widać, że powyżej 0.5 MPa zanika wpływ przepustów i wskazania stabilizują się, fluktuując o wartość ±0.0004 % wynikającą z rozdzielczości pomiaru częstotliwości. Dwa odstające punkty na lewo od prostej dla ciśnienia około 5 i 5.5 MPa pochodzą od chwilowej niestabilności generatora. Gdyby nie używać czujnika odniesienia błędy pomiaru ściśliwości dla ciśnień poniżej 0.5 MPa były by około dziesięciokrotnie większe (rys. 11 po prawej), ze względu na gwałtowny wzrost pojemności przepustów. Dla wyższych ciśnień punkty pomiarowe układają się w linii



Rys. 11. Ściśliwość stali uzyskana na podstawie zmian częstotliwości z czujnika pomiarowego i odniesienia (po lewej) oraz z samego czujnika pomiarowego (po prawej)

prostej niewiele odbiegającej od rzeczywistej ściśliwości (wykres po prawej). Należy zwrócić uwagę na praktyczny brak histerezy przy odciążaniu (rozprężaniu cieczy) zarówno w przypadku użycia czujnika odniesienia jak i pomiaru tylko jednym czujnikiem.

#### 7. Zależność częstotliwość – ciśnienie w ujęciu teoretycznym

Idealny tor pomiarowy składający się z: miernika częstotliwości, generatora, przełącznika, przepustu ciśnieniowego oraz czujnika odkształcenia wraz z połączeniami, powinien reagować tylko na zmiany długości czujnika, ignorując zmiany ciśnienia i temperatury. Jednak zmiany częstotliwości z czujnika poddanego ciśnieniu są wypadkowa wielu czynników, które powodują skomplikowany kształt i histereze charakterystyki odkształcenie-częstotliwość. Głównymi czynnikami są oddziaływanie temperatury na czujnik i ciśnienia na przepusty, mniejszy udział ma spadek rezystancji czujnika pod wpływem ciśnienia, co powoduje taką zmianę warunków pracy tranzystora generującego, że zmniejsza się częstotliwość oscylacji. Silna zależność częstotliwości od rezystancji czujnika jest warunkiem jego małej wrażliwości na temperaturę w porównaniu do czujnika miedzianego. Czujnik wykonano ze stalowego drutu o dużej rezystancji właściwej, stad i duże jej zmiany pod wpływem temperatury, które kompensują zmiany częstotliwości od termicznych zmian średnicy czujnika. Z pomiarów [4] wynika, że przy 300 MPa rezystancja czujnika z  $30.00 \Omega$  zmniejszy się do 29.89 Ω, a to wywoła spadek częstotliwości oscylacji 3000 kHz o 0.2 kHz. Część toru pomiarowego poza komora ciśnieniowa ma znikomy wpływ na częstotliwość. Teoretyczna charakterystyka ciśnienie-częstotliwość uwzględniająca zmniejszenie średnicy zwojów czujnika i zmniejszenie jego długości o wartość równą skróceniu materiału czujnika i badanego materiału na którym jest zamocowany oraz zmniejszenie rezystancji czujnika, pod wpływem ciśnienia zakłada w przybliżeniu wprost proporcjonalne oddziaływanie na częstotliwość. Założenie o liniowości oddziaływań jest usprawiedliwione niewielkimi, bo poniżej procenta zmianami wartości tych wielkości w rozpatrywanym zakresie ciśnień. Natomiast nie można pominąć nieliniowej zależności wpływu ciśnienia na pojemności pasożytnicze czujnika i doprowadzeń. O ile zmniejszenie średnicy zwojów czujnika spowodowane skróceniem drutu nawojowego powoduje wzrost częstotliwości, to skrócenie badanego materiału, wzrost stałej dielektrycznej nafty i spadek rezystancji czujnika wywoła spadek częstotliwości. Można to przedstawić następującym wzorem:

$$\Delta f \approx f \left( p \mathcal{G}_d + p R \gamma_p k_R + \frac{C_p (b p + c p^2)}{2C} \right) - p s l_m \mathcal{G}_m \tag{1}$$

gdzie:

- f częstotliwość w ciśnieniu normalnym, (3000 kHz)
- p ciśnienie, (MPa),
- $\vartheta_d$ ,  $\vartheta_m$  współczynnik ściśliwości liniowej drutu nawojowego i wspornika, (stal: 1.8×10<sup>-6</sup>/MPa),
  - R rezystancja czujnika, (30.00  $\Omega$ ),
  - $\gamma_p$  ciśnieniowy współczynnik zmian rezystancji drutu nawojowego, (1.2×10<sup>-5</sup>/MPa),
  - $k_R$  rezystancyjny współczynnik zmian częstotliwości (55×10<sup>-5</sup>/ $\Omega$ ),
  - $C_P$  pojemność pasożytnicza, (2 pF)
  - C całkowita pojemność obwodu rezonansowego w warunkach normalnych, (1300 pF),
  - b, c współczynniki zależności przenikalności dielektr. od ciśnienia,  $(b = 7 \times 10^{-4}, c = 9.6 \times 10^{-7})$ ,
    - L indukcyjność czujnika, (2 µH),
    - s czułość czujnika, (30 kHz/mm),
    - $l_m$  długość badanego materiału, (34 mm),

(w nawiasach podano parametry czujnika i obwodu rezonansowego użytego w tych badaniach).

Składnik opisujący zależność częstotliwości od pojemności pasożytniczych podano w postaci przybliżonej, gdyż pojemność całkowita jest dużo większa od pasożytniczej:

$$\Delta f = f_p - f = f \sqrt{\frac{C}{C + C(p)}} - f = f \left( \sqrt{\frac{C}{C + C(p)}} - 1 \right) \approx f \left( \frac{-C(p)}{2(C + C(p))} \right) \approx -f \frac{C(p)}{2C} \approx -f \frac{C_p (bp + cp^2)}{2C}$$

Ponieważ czujnik i wspornik do którego był zamocowany wykonany jest ze stali, to przy ciśnieniu 300 MPa otrzymamy odpowiednio zmiany częstotliwości:

+1.6 kHz, zmniejszenie średnicy zwojów,

-0.12 kHz zmiana punktu pracy tranzystora generującego,

-0.35 kHz wzrost stałej dielektrycznej nafty,

(+1,7 kHz zmniejszenie tłumienia obwodu rezonansowego, uwzględniono to w zmianie punktu pracy tranzystora generującego),

-0.53 kHz skrócenie badanego materiału.

W sumie przy 300 MPa częstotliwość wzrośnie o 0.6 kHz, tak wyliczona zmiana częstotliwości dość dobrze zgadza się z obserwowaną w rzeczywistości, co przedstawiają zamieszczone wykresy na rys. 12 dla czujnika zamocowanego do wspornika (bez użycia śrub).

Należy dodatkowo liczyć się z kilku procentowym błędem, gdyż współczynnik ściśliwości ceramicznych izolatorów o długości 3 mm zrównano ze współczynnikiem stali. Tak określona charakterystyka jest pozbawiona histerezy, gdyż uważa się, że podczas odkształcania czujnika i w układzie jego mocowania nie występuje tarcie. Histereza pojawiłaby się, gdyby do równania dołączyć człon określający zmiany częstotliwości wywołane zmianą pojemności pasożytniczych doprowadzeń, która zależy od zmian temperatury podczas sprężania i rozprężania nafty a także człon opisujący zależność pojemności przepustów w gnieździe korka od ciśnienia.

## 8. Wpływ sposobu mocowania czujników na pomiar w ciśnieniu do 300 MPa

Wykonano testy dla dwóch sposobów mocowania czujników do badanego materiału w zakresie do 300 MPa. Pierwszy sposób w którym czujnik odniesienia zamocowany był do stalowego wspornika tylko poprzez izolatory a pomiarowy do wkręconych śrub we wspornik tak jak w istniejącym systemie mocowania podczas pomiaru ściśliwości walcowej próbki skały (rys. 1b) i drugi gdy oba czujniki były zamocowane do wspólnego wspornika (poprzez izolatory) w kształcie odwróconej litery "H" (rys. 1a). Pozwoliło to na rozróżnienie wpływu mocowania od wpływu przepustów na pomiar odkształcenia

Rysunek 12 przedstawia efekty pierwszego sposobu mocowania czujników, tzn. gdy jeden jest mocowany tylko przez lutowanie, a drugi przez dodatkowe śruby. W pierwszy cyklu (wykresy po lewej) zmiany ciśnienia przebiegały w typowy sposób, ze stała szybkościa około 0.3 MPa/s. W drugim cyklu (wykresy po prawej) zwiększono szybkość do 0.8 MPa, aby osiągnąć większe zmiany temperatury cieczy w komorze a przy ciśnieniu 150 i 300 MPa utrzymywano przez pewien czas jego stałą wartość, prowokując tym obniżenie temperatury o kilka °C. Linią grubą zaznaczono efekty sprężania, a cienką rozprężania. Uzyskano w ten sposób informacje o reakcji czujników na temperaturę w tych ciśnieniach. Kolejno od góry są wykresy ściśliwości stali wyliczonej ze wskazań czujników, częstotliwość z czujnika na połączeniu śrubowym, częstotliwość z czujnika na połączeniu lutowanym i zmiany temperatury, wszystkie w funkcji ciśnienia cieczy w komorze. Zmiany częstotliwości są wynikową wszystkich czynników wymieniowych uprzednio i innych nieznanych oraz ściśliwości wspornika, stąd złożony charakter krzywych. Ściśliwość materiału jest wyliczana w ten sposób, że wskazania czujnika pomiarowego koryguje się o wartość błędu wyliczonego ze wskazań czujnika odniesienia, znając jego czułość, ściśliwość wspornika na którym jest zamocowany i aktualne ciśnienie. Zakłada się przy tym że reakcje obu czujników na zmiany ciśnienia i temperatury są takie same. Ponieważ czujniki w opisywanym teście zamocowane były na stali, a ciśnienie i temperatura oddziaływały na nie jednakowo, więc zmiany częstotliwości powinny być identyczne, jednak jak łatwo zauważyć, zmiany te znacznie różniły się. W konsekwencji wyliczona ściśliwość stali była obarczona błędem, co widać na górnych wykresach, na których zaznaczono linią przerywaną poprawną jej wartość. Charakterystyczne w tych wykresach jest bardzo podobny kształt krzywych w pierwszym i drugim cyklu, co świadczy o systematyczności czynnika lub zespołu czynników wpływających na pomiar oraz mniejsza wartość histerezy zmian częstotliwości z obu czujników w drugim cyklu, tak jakby pierwsze spreżenie spowodowało pewne trwałe zmiany w układzie pomiarowym. W następnym teście pozostawiono cały układ pomiarowy bez zmian, lecz przepusty ciśnieniowe łączące czujniki z przełącznikiem cewek generatora zamieniono miejscami, w ten sposób czujnik pomiarowy podłączony został do przepustu, do którego uprzednio był podłączony czujnik odniesienia i odwrotnie. Wyniki tego testu przedstawia rys. 13.



Rys. 12. Ściśliwość stalowego wspornika, częstotliwość i temperatura w funkcji ciśnienia dla czujnika pomiarowego zamocowanego na śrubach (f1), a odniesienia bezpośrednio (f2), w dwóch cyklach sprężania

Widać że jeśli uprzednio wyliczona ściśliwość była większa od poprawnej, to tym razem jest mniejsza, stąd oczywisty wniosek, że przyczyną tego jest różna reakcja czujników lub ich mocowania a nie przepustów. Wykonano zatem kolejny test w którym czujniki zamocowane były w ten sam sposób, na wsporniku H, w czterech cyklach sprężania (linia gruba) i rozprężania (linia cienka), przedstawia to rysunek 14. W cyklu pierwszym widać opisane wcześniej charakterystyczne skoki częstotliwości dla ciśnienia poniżej 1 MPa, czemu odpowiada błąd wyznaczenia odkształcenia w zakresie +0.02 do -0.003%. Powyżej tego ciśnienia zmiany częstotliwości z obu czujników są niemal identyczne, więc wyliczana przez program



Rys. 13. Ściśliwość, częstotliwość i temperatura w funkcji ciśnienia dla czujników zamontowanych odwrotnie niż uprzednio, tzn. pomiarowego zamocowanego bezpośrednio, a odniesienia na śrubach

ściśliwość stali jest poprawna. Od około 70 MPa pojawiają się większe różnice między częstotliwościami i pokazywana ściśliwość jest zaniżona aż do ciśnienia około 180 MPa, w którym krzywa ściśliwości asymptotycznie wraca do poprawnych wartości. Podczas rozprężania (linia cienka) krzywa ściśliwości, z błędem kilku procent, jest zbliżona do prostej o zgodnym z danymi tablicowymi nachyleniu.

W drugim cyklu brak jest gwałtownych początkowych zmian częstotliwości, a ściśliwość jest wyznaczona w miarę poprawnie, zaniżona tylko o kilka procent. Począwszy od ciśnienia 220 MPa krzywa ściśliwości nachyla się coraz bardziej w kierunku większych wartości, odmiennie niż w pierwszym cyklu.



Rys. 14. Dane uzyskane z czujników zamocowanych na wsporniku typu H i umieszczonych w komorze

Niestety przy ciśnieniu 300 MPa należało przerwać sprężanie, a ciekawym byłoby poznanie kształtu krzywej w wyższych ciśnieniach. Podczas rozprężania uzyskano zdecydowanie bardziej prostoliniowy kształt krzywej, podobnie jak w pierwszym cyklu.

Trzeci cykl nie przyniósł zmian w kształcie krzywej ściśliwości, również podczas sprężania przy ciśnieniu około 220 MPa nastąpiła niewielki spadek jej nachylenia.

W czwartym cyklu zwiększono szybkość zmian ciśnienia do kilku MPa/s, aby uzyskać większy wzrost temperatury cieczy w komorze, a przy ciśnieniu 160 i 320 MPa stabilizowano te ciśnienia wywołując spadek temperatury o 8°C, obserwując wpływ na częstotliwość z obu czujników. Wpływ ten był niemal identyczny i wynosił około 20 Hz/°C, więc na krzywej ściśliwości pojawiły się tylko nieznaczne nieciągłości. Histereza wykresu ściśliwości nie zwiększyła się, pomimo prawie trzykrotnie większych zmian temperatury sprężania i rozprężania cieczy w porównaniu do poprzednich cykli.

W kolejnym eksperymencie zamieniono podłączenia czujników do przepustów, nie zmieniając położenia wspornika w komorze. Wykonano dwa cykle sprężania, których wyniki przedstawiono na jednym rys. 15. Punkty pomiarowe drugiego cyklu doskonale pokrywają się z punktami cyklu pierwszego, co dowodzi bardzo dobrej powtarzalności pomiarów. Histereza krzywych jest tego rzędu co w poprzednim cyklu testów, czyli przed zamianą połączeń, ponadto krzywa odciążania jest, jak poprzednio, położona poniżej krzywej obciążania. Również skok wartości odkształcenia w stronę ujemnych wartości dla ciśnienia poniżej 1 MPa pozostał bez zmian. Dowodzi to, że za zjawisko histerezy i jej kształt oraz początkowy skok odkształcenia odpowiada różna reakcja przepustów na ciśnienie, a nie różna reakcja czujników bądź ich mocowania. Gdyby za te efekty odpowiedzialne były czujniki, to krzywa odciążania usytuowana byłaby powyżej krzywej obciążania, a początkowy skok odkształcenia skierowany byłby w stronę wartości dodatnich.

Kolejnym testem był pomiar ściśliwości walca aluminiowego o identycznych wymiarach (średnica 22 mm, wysokość 44 mm) i sposobem mocowania jak próbki skalnej, tzn. z przyklejonymi kowadłami, śrubowymi zaczepami czujnika i sprężynami dociskowymi (rys. 16). Użyto aluminium z dwóch powodów:



Rys. 15. Ściśliwość stali po zamianie przepustów

umożliwiło to ocenę poprawności wyznaczenia czułości czujnika, oraz stalowy walec byłby zbyt ciężki dla sprężyn dociskowych (w trakcie pomiaru próbka jest podwieszona do korka). Wyniki pomiarów w trzech cyklach obciążania i odciążania hydrostatycznego przedstawia rysunek 17. Kolejno od góry znajdują się wykresy obliczonej ściśliwości aluminium (linią przerywaną zaznaczono ściśliwość tablicową), częstotliwości z czujnika odniesienia na wsporniku stalowym, częstotliwości z czujnika pomiarowego oraz temperatury cieczy w komorze. W trzecim cyklu zwiększono szybkość sprężania i rozprężania z 0.4 MPa/s do 1.5 MPa/s aby uzyskać większe zmiany temperatury cieczy, dla ciśnienia 150 i 300 MPa utrzymywano ciśnienie na stałym poziomie, obserwując jak spadek temperatury o około 5°C, wpłynie na pomiar.



Rys. 16. Próbka aluminiowa przygotowana do pomiaru. Skrajne sprężyny
dociskowe, w środku z lewej czujnik pomiarowy, z prawej odniesienia

W pierwszym cyklu (obciążanie do 300 MPa) wyznaczona ściśliwość podczas obciążania była zawyżona w stosunku do wartości tablicowych o około 10% i prawie liniowa (z kilkuprocentowym błędem) względem ciśnienia. Dla odciążania począwszy od ciśnienia 200 MPa pojawiła się narastająca histereza, która od ciśnienia 130 MPa ustabilizowała się do 10% wartości maksymalnej. W drugim cyklu (do 280 MPa) histereza była trudno zauważalna i krzywa ściśliwości o kilkuprocentowej nieliniowości nałożyła się na krzywą powrotu pierwszego cyklu.

Częstotliwość z obu czujników na początku obciążania jak zwykle skokowo zmniejszyła swoją wartość o około 300 Hz, następnie częstotliwość z czujnika pomiarowego zamocowanego na walcu aluminiowym zdecydowanie malała (malała długość czujnika więc rosła jego indukcyjność, co powodowało spadek częstotliwości oscylacji), a z czujnika odniesienia nieznacznie rosła. Efekt spadku częstotliwości z czujnika pomiarowego wystąpił, ponieważ ściśliwość aluminium jest ponad dwukrotnie większa niż stali i przeważył



Rys. 17. Wyniki pomiaru ściśliwości walca aluminiowego o rozmiarach i sposobie mocowania identycznych jak w przypadku próbki skalnej

nad innymi czynnikami zwiększającymi częstotliwość jak zmniejszenie średnicy zwojów czujnika oraz zmiana punktu pracy tranzystora generującego (zmiana rezystancji czujnika w ciśnieniu). Powrót następował po wartościach częstotliwości mniejszych od poprzednich, trwałe jej zmniejszenie po odciążeniu wynosiło dla czujnika odniesienia 200 Hz, a dla czujnika pomiarowego 450 Hz, pomijając początkowy skok. W drugim cyklu maksymalna histereza była mniejsza i wynosiła około 250 Hz dla obu czujników, mniejszy też był końcowy spadek częstotliwości bo około 150 Hz.

W trzecim cyklu (rysunek po prawej) zwiększono szybkość sprężania cieczy tak, że wzrost temperatury był dwukrotnie większy niż uprzednio i wynosił +7°C w stosunku do początkowej w ciśnieniu 150 MPa. Spowodowało to, że odkształcenia podczas dekompresji miały mniejszą wartość niż przy kompresji, odwrotnie niż w cyklu pierwszym.

Należy zauważyć, że stalowy wspornik oraz próbka aluminium o długości 44 mm przy wzroście temperatury o 7°C wydłużą się odpowiednio o 3.5 µm i 7 µm, co spowoduje zaniżenie pomiaru ściśliwości o 0.1 µm, czyli 6% maksymalnego odkształcenia, więc w pomiarach tak małych odkształceń rozszerzalność i bezwładność termiczna badanego materiału jak i układu mocowania czujnika ma duże znaczenie dla uzyskanych wyników. O ile w przypadku metali łatwo jest znaleźć współczynniki rozszerzalności cieplnej i dokonać odpowiedniej korekcji, to w przypadku skał jest to wiele trudniejsze. Równie trudne są poprawki na bezwładność cieplną próbki badanej skały.

#### 9. Zmodyfikowany sposób mocowania zaczepu czujnika do kowadła

W dotychczasowym sposobie zaczepem do mocowania czujnika była śruba o średnicy 3 mm wkręcona w nagwintowany otwór na pobocznicy walcowego kowadła, jak pokazano na rysunku 18 pośrodku. Do tej śruby przylutowany był czujnik lub łącznik czujnika. Zachodziła obawa, że tego rodzaju połączenie nie jest wystarczająco stabilne, gdyż temperatura i ciśnienie mogą powodować naprężenia, które będą odchylać lub przesuwać śrubę, a wymagane jest pozycjonowanie z dokładnością ułamka mikrometra. Zastosowano więc inny sposób mocowania czujnika do kowadła, pokazany na tym samym rysunku, polegający na wykonaniu gniazda w podstawie kowadła, w które wkręcony będzie odpowiednio uformowany zaczep. Na rysunku 18 pokazano ten zaczep, kowadło z wyfrezowanym gniazdem po lewej i zmontowną całość z przylutowanym łącznikiem po prawej. Wydaje się, że takie mocowanie jest o wiele pewniejsze, niestety awaria komory uniemożliwiła przetestowanie tego połączenia.



Rys. 18. Nowy i dotychczasowy sposób mocowania zaczepu czujnika do kowadła

#### 10. Oddziaływanie pola magnetycznego czujnika z komorą

Czujnik umieszczony w stalowej komorze ciśnieniowej można traktować jak cewkę wewnątrz przewodzącego ekranu cylindrycznego. Ekran taki można uznać jako pojedynczy zwarty zwój sprzężony indukcyjnie z cewką. Konsekwencją tego jest spadek dobroci i indukcyjności cewki, tym większy im większe będzie sprzężenie czyli im cewka będzie bliżej ekranu. Jeśli osie cewki i cylindrycznego ekranu pokrywają się, to wpływ ekranu na jej indukcyjności wyraża wzór:

$$L_e = L \left[ 1 - \left(\frac{R}{R_e}\right)^3 \right] * \left[ 1 - \left(\frac{l}{2l_e}\right)^2 \right]$$
(2)

gdzie:

R, l – promień i długość cewki

 $R_e$ ,  $l_e$  – promień i długość ekranu.

Jeśli przyjąć że długość cewki i ekranu jest stała, to modyfikując ostatni wzór częstotliwość będzie zależeć od promienia ekranu według zależności:

$$f = \frac{k}{L \left[ 1 - \left(\frac{R}{R_e}\right)^3 \right]}$$
(3)

gdzie k opisuje pozostałe parametry obwodu rezonansowego.

Czujnik umieszczony jest ekscentrycznie względem osi komory, gdyż współosiowo umieszczona jest próbka (rys. 1b), lecz przybliżanie go do ściany komory można traktować w uproszczeniu jak zmniejszanie średnicy ekranu i zgodnie ze wzorem indukcyjność czujnika zmniejszy się a częstotliwość oscylacji zwiększy. Konsekwencją zależności częstotliwości od położenia cewki w komorze będzie pojawienie się błędów pomiaru odkształcenia jeśli położenie czujnika pomiarowego lub odniesienia będzie niestabilne. Powodem tego mogą być np. drgania mechaniczne pochodzące od pompy i silnika lub naprężenia w systemie mocowania czujników lub próbki wywołane zmianami ciśnienia lub temperatury. Aby ograniczyć ten wpływ, cewka powinna być usytuowana jak najdalej od ścian komory, gdyż oddziaływanie ekranu maleje z trzecią potęgą odległości od cewki.

Promień komory aparatu GTA-10 wynosi 25 mm, zaś typowy promień próbki ma 11 mm, średnica czujnika to 3 mm i musi być odsunięty od próbki przynajmniej o 2 mm, wobec tego maksymalna odległość czujnika od komory to około 10 mm. Zbadano eksperymentalnie jak przemieszczanie czujnika wewnątrz komory prostopadle do jej osi w zakresie od 1 do 10 mm wpłynie na częstotliwość oscylacji. Wyniki zamieszczono na rysunku 19. Cewkę przesuwano co milimetr, a uzyskane punkty pomiarowe aproksymowano krzywą trzeciego stopnia. Dolny wykres przedstawia pochodną zmian częstotliwości względem odległości czujnika od ściany komory. Zgodnie z przewidywaniem największe oddziaływanie na indukcyjność występuje w pobliżu ściany i przy odległości 1mm od niej ma wartość 3 Hz/µm, aby w odległości 10 mm zmaleć do 0.5 Hz/µm. Jeśli przyjąć dopuszczalny błąd pomiaru odkształcenia 0.001%, to dla próbki o długości 44 mm zmiany częstotliwości wywołane niestabilnością położenia czujnika mogą być co najwyżej około 10 Hz, a to dla optymalnego położenia czujnika w odległości 10 mm o ścian komory oznacza dopuszczalne zmiany położenia o 20 µm. Przy większym zbliżeniu czujnika do komory niestabilność położenia może mieć wartość najwyżej kilku mikrometrów, przy założonym błędzie. Ponieważ inny jest sposób mocowania badanej próbki i wspornika z czujnikiem odniesienia, to trudno liczyć na identyczność ich przemieszczania pod wpływem różnych czynników i wzajemną kompensację. Problem właściwego mocowania próbki jest tym bardziej istotny, że po umieszczeniu jej w komorze zwisa w dół, podwieszona do przepustów korka. W związku z tym stosunkowo duży ciężar próbki i stalowych kowadełek, w sumie około 200 g, nie spoczywa na podstawie korka lecz jest przenoszony na sprężyny dociskowe (widoczne na rys. 16).



Rys. 19. Wpływ przemieszczania się czujnika wewnątrz komory na częstotliwość oscylacji

#### 11. Podsumowanie

Tor pomiarowy indukcyjnego czujnika mierzącego odkształcenia próbek skalnych w komorze ciśnieniowej jest dość złożony. Należy podzielić go na część pozostającą w normalnym ciśnieniu, składającą się z miernika częstotliwości, zasilacza, generatora LC, elektronicznego przełącznika czujników i przewodów łączących na zewnątrz komory oraz na część będącą po wpływem ciśnienia kilkuset MPa złożonego z przepustów ciśnieniowych, układu mocowania próbki, wspornika odniesienia, czujników i połączeń elektrycznych w środku komory. Głównymi źródłami błędów pomiaru są zmiany ciśnienia i temperatury działające na tor związany z komorą ciśnieniową, a w szczególności na mocowanie czujnika i przepusty ciśnieniowe oraz w znacznie mniejszym stopniu zmiany temperatury otoczenia oddziałujące na część toru poza komorą. Dzięki porównawczej metodzie pomiaru można było zmniejszyć kilkadziesiąt razy błędy pomiaru eliminując praktycznie błędy części toru pomiarowego pozostającego w niskim ciśnieniu i znacznie ograniczając błędy wysokociśnieniowej części tegoż toru.

Niestabilność czasowa i termiczna całego toru w normalnym ciśnieniu jest niewielka, gdyż nawet duże zmiany temperatury otoczenia  $\pm 10^{\circ}$ C oraz czas trwania pomiaru kilku dni powodują błąd pomiaru przemieszczenia nie większy niż $\pm 0.6 \,\mu$ m. Dla typowych pomiarów, w których temperatura otoczenie zmienia się najwyżej o kilka stopni i trwających około jednej godziny błąd ten zmniejszy się do około  $\pm 0.1 \,\mu$ m.

Zmienne ciśnienie powoduje wielokrotnie większe błędy. Charakterystyczne skokowe zmniejszenie się częstotliwości w początkowej fazie sprężania dla ciśnień około 0.2 MPa może wywołać błąd pomiaru około 1 µm. Powodem tego jest zmiana pojemności przepustów ciśnieniowych nieco inna dla przepustu obsługującego czujnik pomiarowy i odniesienia. Ciśnienie wgniata stożkowy przepust do również stożkowego gniazda, odkształcając sprężyście izolację między nimi. Powoduje to wzrost pojemności przepustu w stosunku do masy komory. Drobne różnice w wykonaniu przepustów powodują nieco różną reakcję na ciśnienie. Gwałtowny skok pojemności na początku sprężania być może jest efektem pokonania tarcia statycznego podczas wgniatania przepustu. W rezultacie pojemność przepustu wynosząca około 60 pF wzrasta o 0.1 pF. Dla większości badanych skał ciśnienie ułamka MPa nie powoduje znaczących zmian w ich strukturze i błąd ten można zaniedbać. Po przekroczeniu ciśnienia 0.3 MPa aż do maksymalnego w komorze aparatu GTA-10, czyli 300 MPa, pojemność przepustów rośnie monotonicznie o około 0.1 pF. Przy odciążaniu występuje histereza w zmianach pojemności o maksymalnej wartości 0.2 pF. W następnych cyklach obciążania histereza zmniejsza się do 0.1 pF. Za powstanie histerezy odpowiada prawdopodobnie zjawisko opóźnionej sprężystości układu przepust-izolacja-korpus. Maksymalny błąd spowodowany asymetrią oddziaływania ciśnienia na przepusty w zakresie od 0.3 do 300 MPa wynosi około 0.7 µm.

Również zmiany temperatury nafty wypełniającej komorę, a które są konsekwencją zmian ciśnienia, powodują zmiany pojemności przepustów Wzrost temperatury zmniejsza przenikalność dielektryczną nafty, więc zmniejsza się pojemność części przepustu wystającej ponad korpus korka, a także powoduje naprężenia w zespole przepust-izolacja-korpus na skutek ich różnej rozszerzalności, co może być przyczyną przemieszczania się przepustu w gnieździe i zmianę pojemności. Temperatura zmienia również przenikalność dielektryczną izolatora. Dla badanych dwóch przepustów różnice w reakcji na temperaturę były przyczyną powstania błędu pomiaru przemieszczenia około 0.4 μm.

Powodem największego zidentyfikowanego błędu był różny sposób mocowania czujnika odniesienia i pomiarowego. Pierwszy jest mocowany do stalowego wspornika w kształcie litery C przez lutowanie, a drugi lutowany jest do śrub wkręconych w pobocznicę walcowego kowadełka przyklejonego do podstawy walcowej próbki. Błąd ten może wynosić maksymalnie do 10 μm. Powodem tego jest prawdopodobnie niestabilność położenia wkręconej śruby w zmiennym ciśnieniu i temperaturze. Jeśli oba czujniki umocowane były w ten sam sposób, tylko przez lutowanie, bez użycia śrub, błąd pomiaru znacznie zmalał do około 1.5 μm.

Pomiary kontrolne na metalowych wspornikach umożliwiło zastosowanie ceramicznych izolatorów w systemie mocowania czujnika. Wykonano je z miniaturowych rezystorów SMD. Ponadto zlikwidowano w ten sposób wpływ pojemności metalowego kowadełka na obwód rezonansowy generatora. Było to powodem powstawania histerezy krzywej ściśliwości rzędu kilkudziesięciu µm.

Wykonano inny sposób mocowania czujnika do kowadełka, polegający na przykręceniu odpowiedniego zaczepu do podstawy kowadełka. Sprawdzenie tego mocowania uniemożliwiła awaria komory ciśnieniowej.

Przyczyną błędów może być też niestabilne mocowanie próbki lub wspornika z czujnikiem odniesienia. Wywołana tym zmiana odległości czujnika względem metalowych ścian komory zmienia indukcyjność czujnika. Im bliżej ściany komory jest czujnik, tym stabilność jego położenia musi być większa. Dla typowej odległości czujnika od ściany komory około 10 mm, aby ograniczyć związany z tym błąd pomiaru do 0.5 μm, odległość ta musi być zachowana z dokładnością do 20 μm. Jeśli czujnik znajdowałby się 3 mm od ściany komory, wymagana stabilność wynosiłaby 6 μm.

Przeprowadzone badania wykazały, że działania zmierzające do zmniejszenia błędu pomiaru należy skupić na:

- 1. Zmianie sposobu mocowania czujnika do kowadła na bardziej stabilny.
- Próbie takiej zmiany parametrów czujnika i generatora, aby nie tracąc na czułości czujnika zwiększyć pojemność stałą obwodu rezonansowego, co pozwoli zmniejszyć wpływ zmiennej pojemności przepustów ciśnieniowych.
- 3. Zmniejszeniu masy kowadeł i poprawienie stateczności mocowania próbki, zmniejszając tym sposobem wpływ metalowych ścian komory na zmianę indukcyjności czujnika.

#### Literatura

- [1] Gustkiewicz J.: Objętościowe deformacje skały i jej porów, Archiwum Górnictwa 1989, Vol. 34.
- [2] Wiśniewski R.: Zastosowanie tensometrii elektrooporowej przy ciśnieniu hydrostatycznym do 1500 at, Pomiary Automatyka Kontrola, 1964, z. 1, (13-16).
- [3] Besuelle P.: DesruesJ.: An internal instrumentation for axial and radial strain in triaxial tests, Geotech Test JGT-JODJ 2001; 24(2): 193-9.
- [4] Nurkowski J.: *Indukcyjna metoda pomiaru odkształceń próbek skalnych pod wysokim ciśnieniem*, Praca doktorska 2001, Biblioteka Instytutu Mechaniki Górotworu PAN.
- [5] Bridgman P.W.: *The physics of high pressure*, London 1949.
- [6] Mizerski W., Nowaczek W.: Tablice fizyczno-astronomiczne, Adamantan W-wa 1995.
- [7] Nurkowski J.: Wybrane dyskretne elementy półprzewodnikowe jako czujniki temperatury cieczy pod wysokim ciśnieniem, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN 2004.
- [8] Nowakowski A., Nurkowski J.: Porównanie wyników pomiaru odkształceń różnymi metodami podczas testu jednoosiowego ściskania, Prace IMG PAN 2003.

#### Some errors in strain measurement made by means of inductive sensor in high pressure cell

#### Abstract

The paper presented results of tests of the impact of temperature and pressure on a sensor, its fixing system to the sample, electrical seals and oscillator. It has been proved that impact of temperature on the oscillator may be ignored when reference sensor is used. The pressure impact on system of sensors fixed to the sample as well as on electrical seals in cell has been found as a main source of errors. A new sensor fixing system has been designed and made, but it has not been tested yet.

Keywords: compressibility measurement, high pressure, inductive sensor, LC oscillator

Recenzent: dr hab. inż. Paweł Ligęza, Instytut Mechaniki Górotworu PAN