

Pomiar zmian długości próbki skalnej w komorze trójosiowej GTA-10

JANUSZ NURKOWSKI

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

Streszczenie

W artykule zaprezentowano wpływ sposobu umieszczenia czujnika odkształcenia osiowego cylindrycznych próbek skalnych na pomiar, podczas eksperymentów w trójosiowej komorze ciśnieniowej urządzenia GTA-10. Wyróżniono dwa sposoby: pomiar pośredni, dotychczas stosowany – gdy czujnik zamontowano na zewnątrz komory, między korpusem urządzenia a tłokiem prasy oraz bezpośredni – gdy czujnik zamontowano wprost na próbce, wewnątrz komory. Czujnik zewnętrzny to liniowa jednowarstwowa cewka z rdzeniem, zmieniająca swoją długość i stanowiąca indukcyjność generatora LC, a czujnik montowany na próbce, odporny na ciśnienie hydrostatyczne w komorze, to podobna cewka lecz bez rdzenia. Oba skracane lub wydłużane sprężyste czujniki zmieniają częstotliwość drgań generatora LC, który znajduje się poza komorą. W metodzie pośredniej oprócz odkształcenia próbki umieszczonej między kowadłami mierzone jest odkształcenie wielu elementów prasy tworzących bazę pomiarową, jak: tłok, kowadełka, korek uszczelniający komorę i nagwintowany czop zamykający komorę. Z pomiaru częstotliwości wyliczane są odkształcenia próbki, po odjęciu odkształcenia reszty bazy pomiarowej, na podstawie znajomości aktualnie działającej siły na tłok. Jednak dużym źródłem niepewności takiego pomiaru jest efekt kasowania luzów mechanicznych zestawu. W efekcie, kasowanie tych luzów powoduje, że zmierzone odkształcenie jest większe od rzeczywistego z charakterystyczną nieliniowością w początkowej fazie obciążania próbki do naprężenia około 40 MPa. Powyżej tego naprężenia czujnik sprzężony z tłokiem wskazuje niemal liniowy wzrost odkształceń próbki skały, do granicy wytrzymałości, jednak większy w porównaniu do pomiaru odkształceń otrzymanych bezpośrednio na próbce. Można to tłumaczyć składową liniową efektu kasowania luzów. Kowadełka i korki są wymienne i wykonane z różną dokładnością, i są w różnym stopniu zdeformowane w poprzednich pomiarach. Ponadto te same elementy mogą być we wzajemnie różnej pozycji, gdyż kowadełka i czop komory obracają się swobodnie podczas montażu zestawu przed pomiarem. Niepewność wyznaczenia odkształcenia badanej próbki metodą pomiaru przemieszczenia tłoka będzie szczególnie znacząca dla próbek skał o małym zakresie odkształceń w funkcji naprężenia, dla skał kruchych i/lub dla małych ciśnień hydrostatycznych działających na próbkę. Wpływ luzów można traktować jako błąd systematyczny, możliwy do przynajmniej częściowej korekcji. Wyznaczono funkcję korygującą, zarówno ze względu na odkształcenie elementów prasy jak i na kasowanie luzów między nimi, uzyskując w miarę zadawalające rezultaty. Pomiar bezpośredni, czujnikiem zamocowanym wprost na próbce (lub do kowadełek, gdy konieczna jest separacja próbki od cieczy wypełniającej komorę), pozbawiony jest tej niepewności. Powinien być on bezwarunkowo stosowany jeśli ważna jest informacja o kształcie krzywej obciążania próbki, szczególnie w początkowej fazie, która może zawierać informacje np. o zamykaniu spękań w próbce, pomimo, że jest bardziej kłopotliwy, gdyż każdorazowo czujnik trzeba montować na próbce, podczas gdy czujnik do tłoka jest zamocowany na stałe.

Słowa kluczowe: mechanika skał, wytrzymałość skał, pomiar przemieszczenia, czujnik przemieszczenia, czujnik indukcyjny

1. Wstęp

W Pracowni Odkształceń Skał realizowane są badania wytrzymałości skał w trójosiowej komorze hydraulicznego urządzenia GTA-10. Pomiaru siły działającej na próbkę dokonuje się pośrednio mierząc ciśnienie pod tłokiem obciążającym próbkę, a pomiaru osiowego odkształcenia cylindrycznej próbki skały również pośrednio, przez pomiar przemieszczenia tłoka prasy.

Podczas wyznaczania odkształcenia próbki przez pomiar przemieszczenia tłoka należy uwzględnić odkształcenie wszystkich elementów prasy przenoszących siłę na próbkę, tworzącą bazę pomiarową. Te ele-

menty to: tłok, kowadełka, korek uszczelniający komorę i blokujący ten korek nagwintowany czop, wkręcany w osłonę komory. Wszystkie one wykonane są ze stali, więc niezbędną poprawkę na ich odkształcenie pod wpływem działającej siły można wyliczyć z dużą dokładnością znając ich wymiary i moduł Younga. Dominującym źródłem niepewności w tym sposobie pomiaru jest efekt kasowania luzów mechanicznych między wymienionymi elementami, wliczając w to również połączenie gwintowane czopa komory. Luzy te tworzą: nierównoległości płaszczyzn współpracujących elementów, ich nierówność (chropowatość) oraz ewentualne zanieczyszczenia między tymi płaszczyznami np. w postaci pozostałości fragmentów uszczelki korka, osłon próbek izolujących je od cieczy wypełniającej komorę oraz drobnych okruchów skał po poprzednich pomiarach. Kasowanie tych luzów przekłada się na pozorny wzrost odkształcenia próbki. Ponadto kowadełka i korki są wymienne i wykonane z różną dokładnością, i są w różnym stopniu zdeformowane w poprzednich licznych pomiarach. Co gorsza, nawet te same elementy mogą być we wzajemnie różnej pozycji, gdyż kowadełka i czop komory obracają się swobodnie podczas montażu zestawu przed pomiarem. Wszystkie wymienione efekty powodują, że próba wprowadzenia korekty ze względu na luzy zestawu pomiarowego jest trudna.

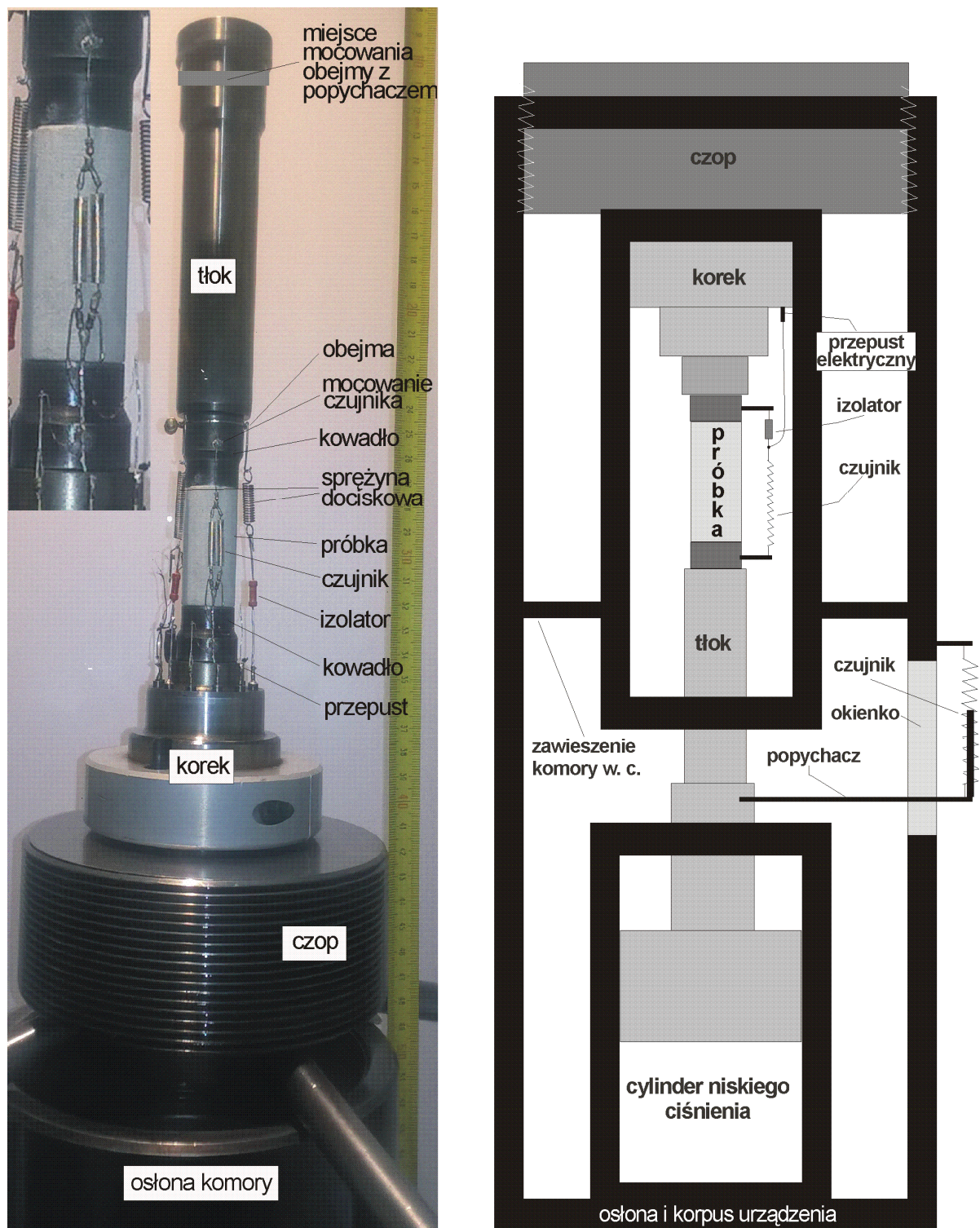
Niepewność wyznaczenia odkształcenia badanej próbki metodą pomiaru przemieszczenia tłoka będzie szczególnie znacząca dla skał o małym zakresie odkształceń liniowych w funkcji naprężenia, a więc dla skał kruchych i/lub dla małych ciśnień hydrostatycznych działających na próbkę.

Aby oszacować wartość niepewności wyznaczenia odkształcenia osiowego badanej próbki w opisanej metodzie, wykonano szereg pomiarów odkształcenia czujnikiem indukcyjnym umocowanym do kowadeł, pomiędzy którymi umieszczono próbkę skały. Pominięto w ten sposób wpływ pozostałych elementów prasy na pomiar. Jego stosowanie okazało się w miarę mało kłopotliwe, a uzyskano znacznie lepszą dokładność pomiaru w porównaniu do poprzedniej metody. W artykule omówiono uzyskane efekty bezpośredniego pomiaru odkształcenia osiowego próbek różnych materiałów czujnikiem indukcyjnym i przedstawiono uproszczoną analizę błędów w metodzie pomiaru przemieszczenia tłoka prasy.

2. Sposoby pomiaru odkształcenia próbki w urządzeniu GTA-10

Dotychczas odkształcenie próbki skały umieszczonej w komorze ciśnieniowej urządzenia GTA-10 wyznaczane było na podstawie pomiaru przemieszczenia tłoka. Tłok z jednej strony wchodzi do wnętrza komory wysokiego ciśnienia, w której umieszczona jest badana próbka materiału, poprzez otwór zaopatrzony w uszczelki, a z drugiej strony wchodzi do wnętrza komory niskiego ciśnienia, którą wypełnia sprężany olej hydrauliczny. Środkowa część tłoka jest dostępna z zewnątrz i w tym obszarze jest zamocowany popychacz, który przez okienko w korpusie urządzenia jest sprzężony z urządzeniami pomiaru przemieszczenia (Rys. 1). Najstarszym przyrządem pomiarowym, przydatnym do dzisiaj, jest mikromierz zegarowy [por. Długosz i in., 1981a, 1981b]. Na potrzeby automatyzacji pomiaru wykonano przyrząd w postaci sprężystych taśm stalowych z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi o wystarczająco dużym zakresie pomiarowym (kilku centymetrów), ale o zbyt małej rozdzielczości [Kanciruk, 2009, s. 28-43]. Zamontowany był on na stałe. Dodatkowo więc używano podobnego, bardziej czułego, ale o mniejszym zakresie pomiarowym, który trzeba było demontować po każdym pomiarze. Korzystano również z czujnika potencjometrycznego, który niestety charakteryzował się dużymi szumami, spowodowanymi najprawdopodobniej tarciami ślizgacza o ścieżkę rezystywną [Nowakowski i in., 2011]. Obecnie, od roku, pomiar przemieszczenia tłoka jest realizowany przez skonstruowany w Pracowni indukcyjny czujnik z rdzeniem ferrytowym [Nurkowski, 2015]. Liniowa cewka tego czujnika stanowi indukcyjną część obwodu rezonansowego. Ruch tłoka jest przenoszony na cewkę, zmieniając jej długość, a tym samym częstotliwość drgań oscylatora. Rdzeń zwiększa czułość czujnika i stabilność oscylatora oraz linearyzuje jego charakterystykę. Czujnik ten pozbawiony jest tarcia i cechuje go kilkudziesięciokrotnie większa czułość w porównaniu do poprzednich czujników, przy dużym zakresie pomiarowym, obejmującym całą amplitudę ruchu tłoka. Kilkumikronowa rozdzielczość czujnika wystarcza do otrzymania gładkiej krzywej wykresu naprężenie-odkształcenie. Niestety zamocowanie czujnika między tłokiem a korpusem prasy powoduje (co opisano we wstępie) znaczną niepewność pomiaru odkształcenia próbki związaną z kasowaniem luzów mechanicznych pomiędzy takimi elementami jak: tłok, kowadełka, korek uszczelniający komorę i blokujący ten korek nagwintowany czop, wkręcany w osłonę komory. Luzy te mają zmienną wartość, gdyż korek i kowadła są wymienne, o różnym stopniu zużycia i różnie ze sobą współpracują.

W tabeli 1 przedstawiono obliczone odkształcenie stalowych elementów prasy wchodzących w skład bazy pomiarowej, znając ich wymiary przy założeniu współczynnika sprężystości stali 210 GPa.



Rys. 1. Fotografia zestawu gotowego do pomiaru wytrzymałości próbki w pozycji odwróconej (po lewej) i uproszczony schemat urządzenia GTA-10 z próbką wewnątrz komory (po prawej)

Tab. 1.

| Element prasy | Przemieszczenie pod wpływem siły |
|-----------------|----------------------------------|
| tłok | 0,62 mm/kN |
| kowadła, szt. 2 | 0,56 mm/kN |
| korpus | 0,21 mm/kN |
| korek | 0,14 mm/kN |
| czop | 0,02 mm/kN |
| suma | 1,55 mm/kN |

Widać, że dominujący efekt powodują kowadła i tłok. Najmniejsza poprawka ze względu na odkształcenie przypada na czop, ale ponieważ jest on wkręcany w korpus, gwint może wносить duży wkład w luzy zestawu. Sumując wkład wymienionych elementów otrzymamy 1,55 mm/kN. Odkształcenie próbki ε_p zawierające poprawkę na przemieszczenie stali w bazie pomiarowej (bez uwzględnienia luzów) określi zależność:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta l_t - \Delta l_z}{l_p} = \frac{\Delta l_t - 1.55 \cdot F_t}{l_p}, \quad \mu\text{m}, \text{ kN}$$

gdzie:

- l_p – długość próbki podana w mm,
- Δl_t – przemieszczenie tłoka zmierzone czujnikiem zewnętrznym,
- Δl_z – przemieszczenie elementów stalowych bazy pomiarowej w mm pod działaniem siły,
- F_t – siła przekazywana przez tłok na próbkę, w kN.

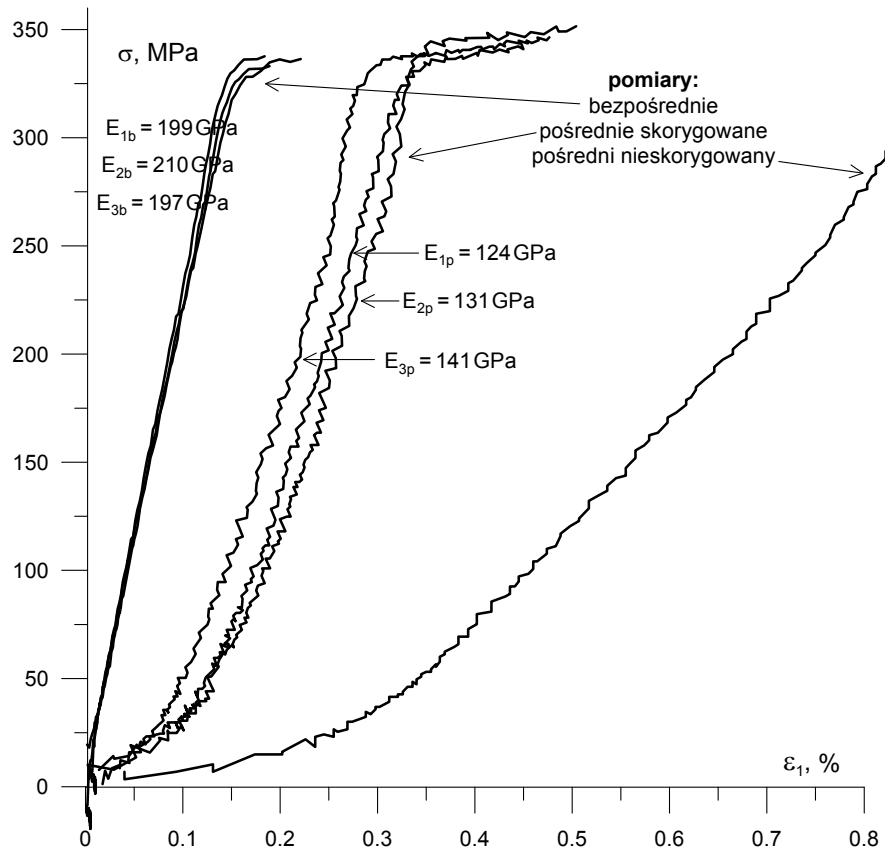
Ze względu na wymienione trudności zdecydowano się na pomiar odkształcenia próbki we wnętrzu komory, eliminując w ten sposób z bazy pomiarowej korek, czop, tłok i obudowę urządzenia. Ponieważ wnętrze komory w trakcie pomiaru na ogół wypełnia ciecz (nafta) pod ciśnieniem kilkuset MPa, która symuluje ciśnienie we wnętrzu górotworu, czujnik musi być odporny na takie warunki [Nurkowski, 2007]. W tym celu zastosowano analogiczny indukcyjny czujnik jak do pomiaru przemieszczenia tłoka, lecz bez rdzenia. Rdzeń mógłby powodować błędy pomiaru związane ze zmiennym ciśnieniem i temperaturą podczas sprężania i rozprężania cieczy wewnątrz komory oraz utrudniał by montaż czujnika. Czujnik składa się z dwóch cewek elektrycznie połączonych szeregowo, aby zwiększyć ich indukcyjność, a mechanicznie równolegle, poprzez izolatory wykonane z rezystorów o dużej rezystancji. Równoległe mechaniczne połączenie zwiększa czułość czujnika, przez skrócenie jego długości. Czujnik przylutowano do kowadeł między którymi znajduje się badana próbka. Wynika to z konieczności izolowania próbki od cieczy wypełniającej komorę przez naciągnięcie na próbkę i fragment kowadeł, przylegających do próbki, osłon lateksowych oraz koszulki termokurczliwej. Luzy między podstawami walcowej próbki a kowadłami można praktycznie wyeliminować przez sklejenie zestawu żywicą epoksydową.

3. Testy wykonane na próbce stalowej

Pomiary wykonano na próbce stalowej, wklejonej do kowadeł żywicą epoksydową, aby wiernie odwzorować sposób wytrzymałościowych testów skał. W trakcie pomiaru jednocześnie rejestrowano odkształcenie mierzone dwoma sposobami – bezpośrednio na kowadłach i z przemieszczenia tłoka oraz ciśnienie pod tłokiem, z którego program wyliczał na bieżąco naprężenie odciążanej próbki. Użyto próbki stalowej, o wymiarach podobnych jak typowa próbka skały, celem zweryfikowania poprawności wskazań czujnika wewnątrz komory, gdyż zależność naprężenie-odkształcenie dla stali musi być liniowa do granicy wytrzymałości, a nachylenie tej prostej zgodne z modułem Young'a ($E = 190$ do 210 GPa). Wykonano 3 cykle obciążania i odciążania próbki bez wyciągania próbki z komory. Efekty pomiaru widać na rysunku 2. Kolejno od lewej znajdują się krzywe: z pomiaru bezpośredniego (czujnik zamocowany do kowadełek), z pomiaru pośredniego (przemieszczenia tłoka) i skorygowanego o sprężyste odkształcenie stalowych elementów bazy pomiarowej oraz ostatnia z prawej jako przykład nieskorygowanego pomiaru na tłoku w pierwszym cyklu.

Bezpośredni pomiar odkształcenia cechuje się powtarzalnością, z rozrzutem otrzymanego współczynnika sprężystości równym 4%. Jego wartość jest zgodna z danymi tablicowymi. Zarejestrowane odkształcenia są liniowe aż do granicy sprężystości (wsp. determinacji aproksymacji liniowej $R^2 = 0.996$). Stąd wniosek, że wskazania czujnika są poprawne.

Pośredni pomiar odkształcenia, pomimo korekcji wykazał współczynnik sprężystości o około 35% niższy od rzeczywistego, dla zakresu w miarę liniowego, powyżej 70 MPa. W kolejnych cyklach zmierzony wsp. sprężystości wzrastał, czyli był bliższy wartości poprawnej, tak jakby niedopasowania poszczególnych elementów malały. Liniowość krzywych jest kiepska z tendencją do wzrastania nachylenia w miarę obciążania. W zakresie do około 70 MPa nieliniowość jest bardzo duża, w zasadzie podobna dla każdego cyklu, z nachyleniem bliskim zera na początku obciążania. Jest to efekt kasowania luzów zestawu.



Rys. 2. Wynik testu wytrzymałościowego próbki stalowej w 3 cyklach obciążania. Pomiar odkształcenia próbki met. pośrednią (przesunięcie tłoka) i bezpośrednią (czujnik na kowadłach)

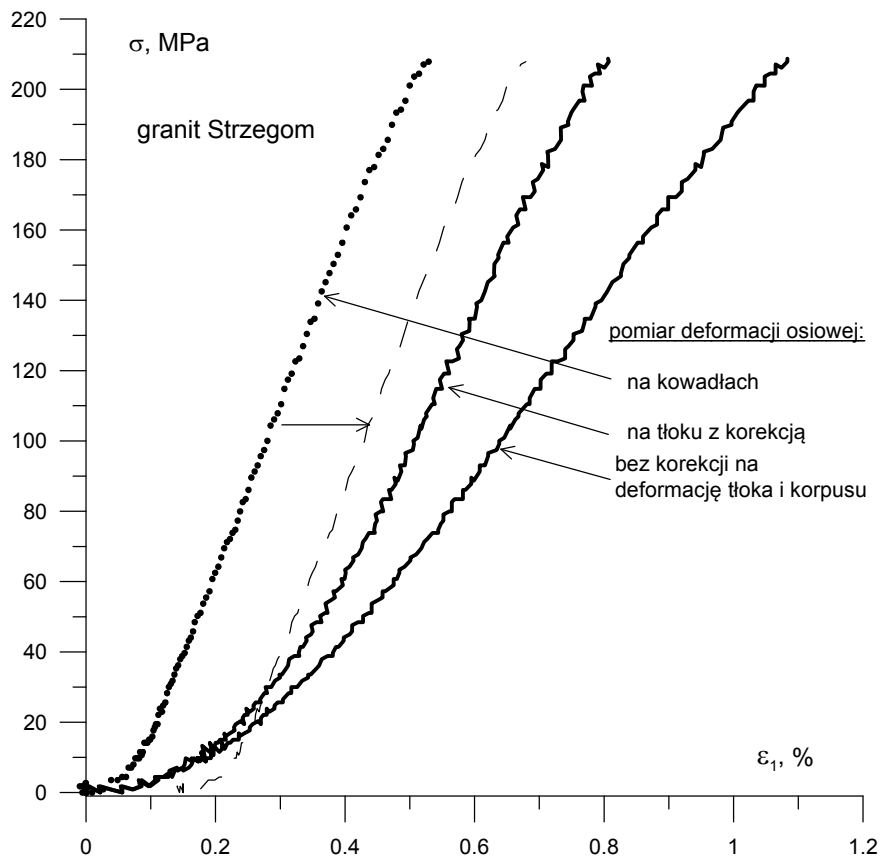
4. Testy wytrzymałościowe próbek skał

Rysunek 3 przedstawia wyniki wytrzymałościowego testu granitu w warunkach jednoosiowych, czyli bez ciśnienia hydrostatycznego. Kolejno od lewej krzywe reprezentują pomiar odkształcenia:

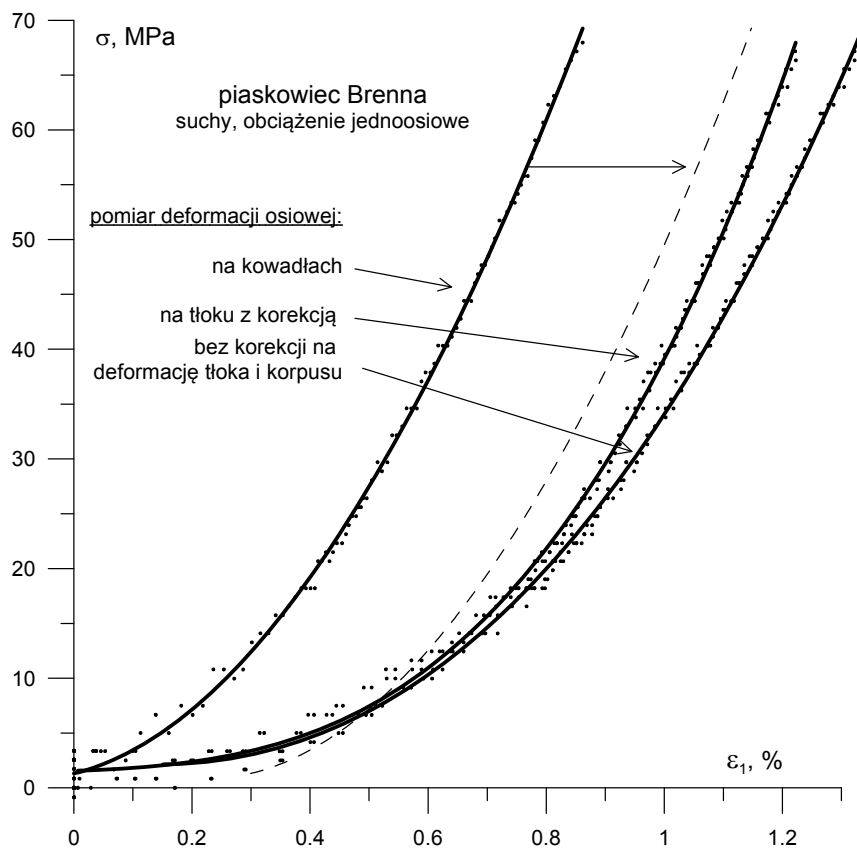
- bezpośrednio czujnikiem zamocowanym na kowadłach między którymi znajdowała się niewklejona próbka granitu (linia punktowana),
- ta sama krzywa (linia przerywana) przesunięta w prawo dla lepszego porównania jej nachylenia z następną krzywą,
- pomiar pośredni, poprzez pomiar przesunięcia tłoka z korekcją na odkształcenie korka, czopu, tłoka i korpusu urządzenia pod wpływem siły obciążającej, bez uwzględnienia luzów między tymi elementami,
- nieskorygowany pomiar przesunięcia tłoka.

Wnioski wynikające z przedstawionego testu są następujące:

1. Korekcja na odkształcenie korka, czopu, tłoka i korpusu urządzenia pod wpływem siły działającej na tłok jest niewystarczająca. Krzywa mimo korekcji ma mniejsze nachylenie niż krzywa odkształcenia z pomiaru bezpośredniego. Tak duża różnica w nachyleniu nie może być rezultatem nieprecyzyjnego wzorcowania czujników ani też błędnego wyliczenia odkształcenia wymienionych elementów tworzących bazę pomiarową.
2. Początkowy, do naprężenia 50 MPa, fragment krzywej otrzymanej z pomiaru pośredniego ma znacznie większy zakres nieliniowości spowodowanej kasowaniem luzów. Może to być fałszywie interpretowane jako np. istnienie spekań w badanym materiale, zamykających się aż do prawie połowy całkowitych odkształceń w trakcie obciążania. W pomiarach bezpośrednich niewielki fragment krzywej do 0,05% odkształceń związany jest z kasowaniem luzów między kowadłami a próbką.
3. Rzeczywiste odkształcenie na granicy wytrzymałości zmierzone bezpośrednio jest o 60% mniejsze niż skorygowana wartość z pomiaru przesunięcia tłoka, co właściwie dyskredytuje pośrednią metodę pomiaru.



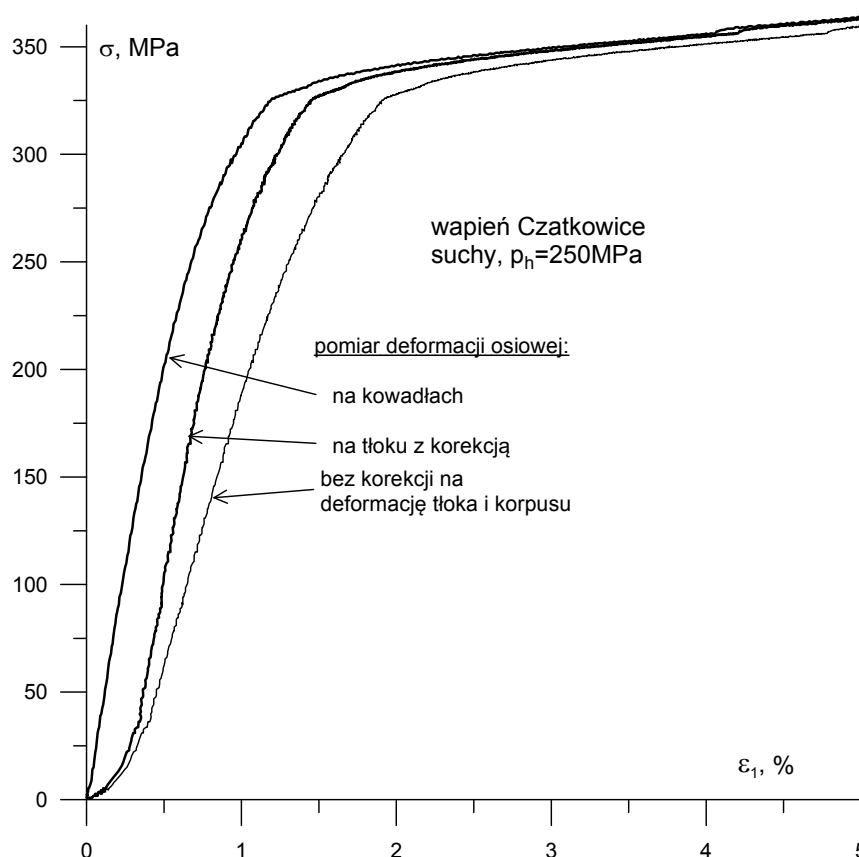
Rys. 3. Wynik jednoosiowego wytrzymałościowego testu granitu. Pomiar odkształcenia próbki met. pośrednią (przemieszczenie tłoka) i bezpośrednią (na kowadłach)



Rys. 4. Wynik wytrzymałościowego jednoosiowego testu piaskowca. Pomiar odkształcenia próbki met. pośrednią (przemieszczenie tłoka) i bezpośrednią (na kowadłach)

Na rysunku nr 4 zamieszczono efekty wytrzymałościowego jednoosiowego testu piaskowca z Brennej. Kolejno od lewej: krzywa z pomiaru bezpośredniego odkształcenia na kowadłach, ta sama krzywa przesunięta dla porównania z krzywą przy pomiarze odkształcenia na tłoku z korekcją na odkształcenie elementów stalowych bazy pomiarowej oraz ostatnia – pomiar na tłoku bez tej korekcji. W tym przypadku obie metody pomiaru wykazały początkową nieliniowość zależności odkształcenie-naprężenie, aż do około 30% maksymalnego naprężenia próbki, lecz dla bezpośredniego pomiaru na kowadłach jest ona mniejsza, podobnie jak odkształcenie na granicy wytrzymałości jest około 40% mniejsze niż ze skorygowanego pomiaru na tłoku.

Kolejnym przedstawionym testem jest pomiar wytrzymałości wapienia w trójosiowym stanie naprężenia przy ciśnieniu hydrostatycznym 250 MPa. Tak duże ciśnienie, powyżej granicy przejścia ze stanu kruchego do plastycznego, umożliwiło osiągnięcie dużych, bo kilkunastoprocentowych odkształceń, które na rysunku 5 ograniczono do 5%. Widać na nim podobne zależności jak omówione poprzednio z tym, że ciśnienie hydrostatyczne zamknęło na tyle pory próbki, że brak jest początkowej krzywizny w pomiarze bezpośrednim. Widoczna jest ona w pomiarze pośrednim i jest efektem dopasowania elementów prasy.

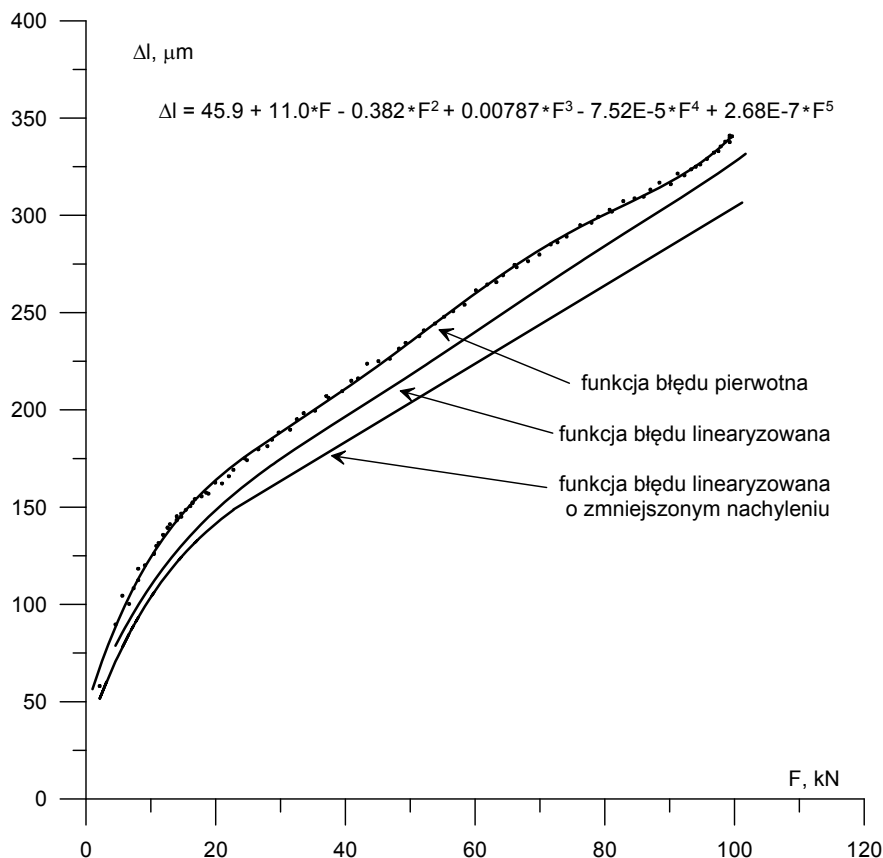


Rys. 5. Wyniki trójosiowego testu wytrzymałościowego wapienia. Pomiar odkształcenia próbki met. pośrednią (przemieszczenie tłoka) i bezpośrednią (na kowadłach)

5. Próba korekcji efektu kasowania luzów

Analizując uzyskane wyniki pomiarów można zaryzykować twierdzenie, że udział efektu kasowania luzów elementów prasy, biorących udział w pomiarze przemieszczenia tłoka, jest w dużym stopniu powtarzalny. Zjawisko to można traktować jako błąd systematyczny, możliwy do przynajmniej częściowej korekcji. Przyjmując jako wzorcowy, pomiar wytrzymałości stali czujnikiem umieszczonym wprost na próbce stalowej (bezpośrednio), wyznaczono funkcję korygującą, która określa różnicę między pomiarem przemieszczenia tłoka a przemieszczeniem próbki zmierzonym bezpośrednio, w zależności od siły działającej na tłok. Posłużono się wartościami bezwzględными, czyli siłą i przemieszczeniem a nie naprężeniem i odkształceniem, gdyż testy wykonywane są na próbkach skał o różnej średnicy i długości. W trakcie testu wytrzymałości mierzone jest ciśnienie działające na tłok, skąd wyliczana jest siła, a z niej funkcja korygująca wyznacza

poprawkę na zmierzone przemieszczenie tłoka prasy. W efekcie otrzymuje się skorygowane odkształcenie badanej próbki zarówno ze względu na odkształcenie odpowiednich elementów prasy jak i na kasowanie luzów między nimi. Na rysunku 6 pokazano krzywą korekcji aproksymowaną wielomianem 5 stopnia. Tak wysoki stopień jest konieczny dla odtworzenia początkowego etapu obciążania, cechującego się małym nachyleniem w dużym zakresie odkształceń i następującym dużym nachyleniem. Funkcja ta, zwana następnie pierwotną, powyżej 30 kN powinna być liniowa, lecz wyższe składowe wielomianu powodują wężykowanie. Zlinearyzowano ją więc w tym zakresie. Następnie stwierdzono, że korekcja w zakresie liniowym jest nieco nadmierna, więc zmniejszono nachylenie funkcji.

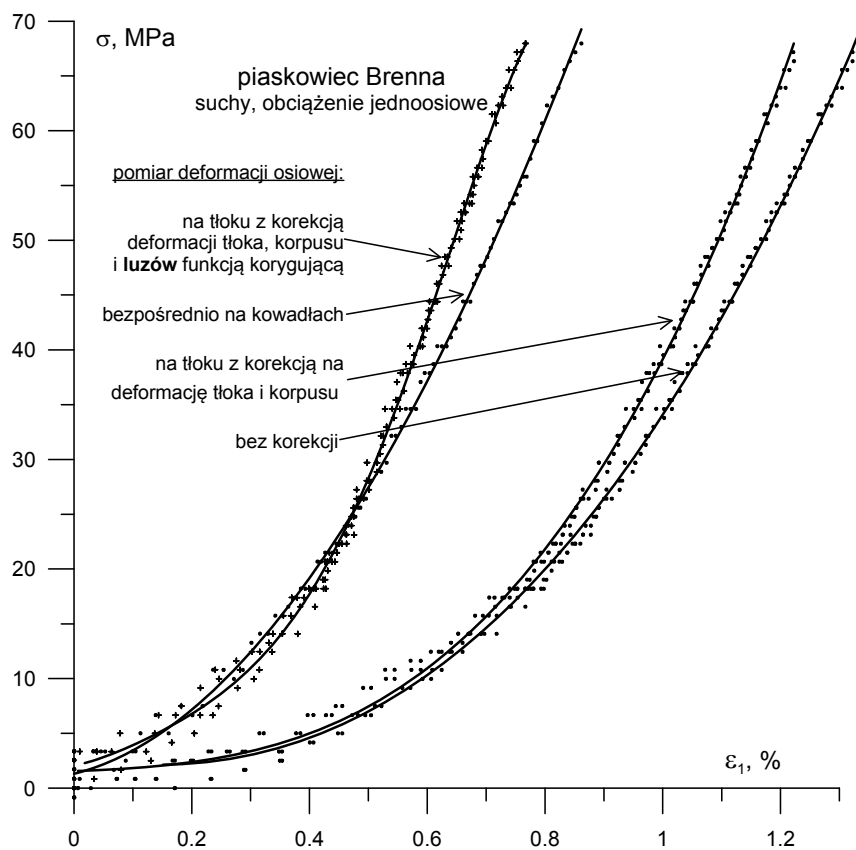


Rys. 6. Funkcja korygująca pomiar odkształcenia badanej próbki ze względu na odkształcenie elementów prasy i na kasowanie luzów między nimi

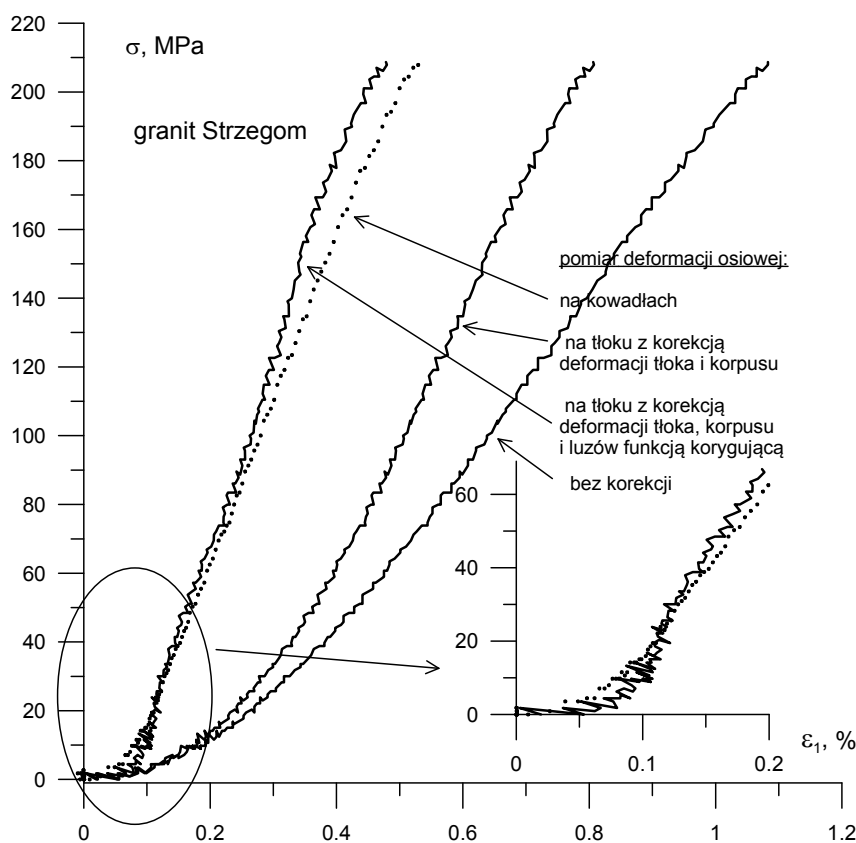
Na kolejnych dwóch rysunkach (7 i 8) pokazano efekty korekcji odkształceń otrzymanej prezentowaną funkcją pierwotną, dla skał o małej wytrzymałości (piaskowiec) i dużej (granit). Można stwierdzić, że korekcja taką funkcją dla granitu i piaskowca jest w miarę poprawna, w każdym razie nieporównanie lepsza niż korekcja tylko na sprężyste odkształcenie stalowych elementów prasy, która była stosowana dotychczas. Trzeba jednak podkreślić, że korekta funkcją uwzględniającą luzy jest wyborem mniejszego zła, gdyż nie uwzględni ona ewentualnych zanieczyszczeń na powierzchniach oraz korzystanie z nietypowych (np. lekko uszkodzonych) elementów. W pełni wiarygodny pomiar odkształceń można uzyskać tylko czujnikiem zamocowanym wprost na próbce.

Zarówno dla granitu jak i piaskowca widać nadmierną kompensację, która jednak zaczyna się od różnych wartości naprężenia (siły): dla piaskowca od 30 MPa, a dla granitu od 90 MPa (siły są proporcjonalne do naprężenia, gdyż próbki miały podobną średnicę). Różna jest też wartość przekompensowania na granicy wytrzymałości: dla granitu 24 mm przy naprężeniu 230 MPa, a dla piaskowca 44 mm przy tylko 70 MPa. Świadczy to o niedoskonałości takiej metody kompensacji.

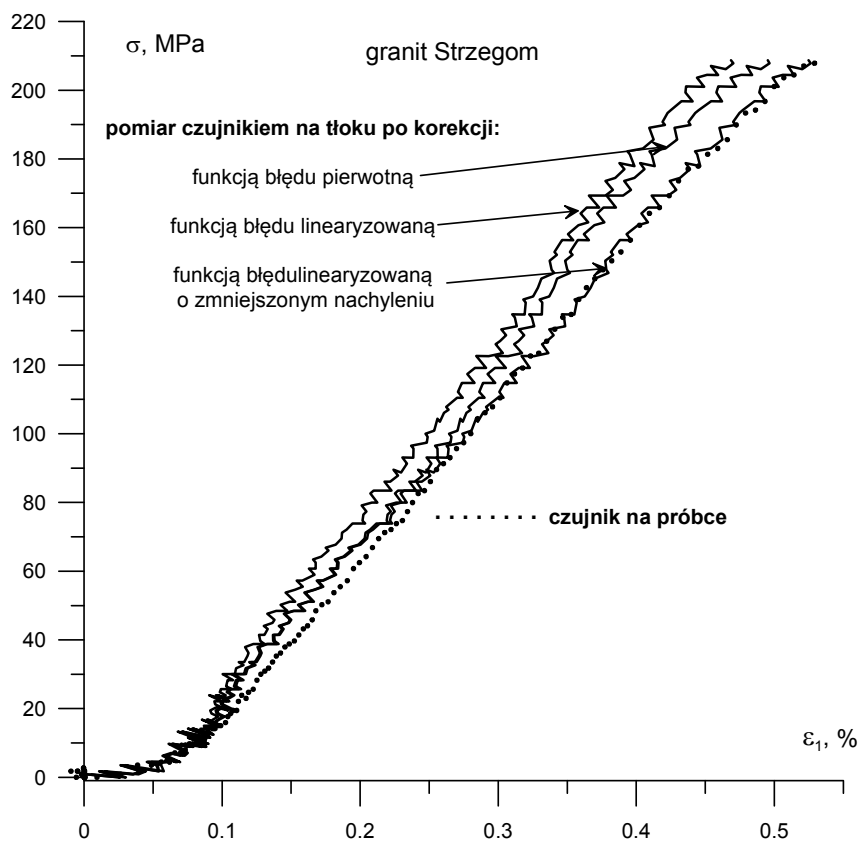
Efekty zastosowania do kompensacji funkcji pierwotnej, zlinearyzowanej i zlinearyzowanej o zmniejszonym nachyleniu pokazano na rysunku 9. Ta ostatnia funkcja bardzo dobrze odtwarza zarówno początkową nieliniowość, zmierzoną czujnikiem zamocowanym na próbce, jak i następujący liniowy odcinek, z nieco nadmierną kompensacją w zakresie od 20 do 80 MPa.



Rys. 7. Korekcja pomiaru odkształceń funkcją opisującą odkształcenie elementów prasy i kasowanie luzów między nimi w pomiarze piaskowca



Rys. 8. Korekcja pomiaru odkształceń funkcją opisującą odkształcenie elementów prasy i kasowanie luzów między nimi w pomiarze granitu



Rys. 9. Pomiar odkształcenia granitu skorygowany funkcją pierwotną, zlinearyzowaną oraz o zmniejszonym nachyleniu. Punkty reprezentują pomiar bezpośredni

Zastosowanie zlinearyzowanego wielomianu o mniejszym nachyleniu do korekcji odkształcenia piaskowca nie dało spodziewanych rezultatów. Przekompensowanie funkcją pierwotną było zbyt duże, by funkcja o mniejszym nachyleniu, odpowiednia dla granitu, mogła efektywnie korygować pomiar na tłoku prasy w przypadku piaskowca.

6. Podsumowanie

Konfrontacja dwóch sposobów pomiaru odkształceń próbki w komorze ciśnieniowej – czyli pomiar bezpośredni za pomocą czujnika umieszczonego wprost na próbce, bądź do pomocniczych kowadeł, między którymi umieszczona jest próbka i pomiar pośredni za pomocą czujnika, sprzężonego z tłokiem na zewnątrz komory – bez wątpienia eliminuje metodę pośrednią, jako niewiarygodną. Wadą pośredniego sposobu jest to, że między między tłokiem, badaną próbką i korpusem urządzenia, istnieją luzy wynikające ze skończonej dokładności ich wykonania oraz z ewentualnych zanieczyszczeń na płaszczyznach stykowych tych elementów. W efekcie, w początkowym zakresie obciążania pomiar pośredni wykazuje fałszywie dużą nieliniowość i nadmierne odkształcenia wynikające z kasowania tych luzów. Kształt tej nieliniowości sugeruje proces zamykania spękań.

Wad tych pozbawiony jest pomiar czujnikiem wprost na próbce i tylko taki powinien być stosowany, gdy informacja o przebiegu odkształceń jest istotna. Czujnik na próbce trzeba montować każdorazowo, co jest kłopotliwe, natomiast czujnik z tłokiem sprzężony jest na stałe i jego użycie nie wymaga żadnych dodatkowych czynności. W ostateczności można odkształcenia mierzone na tłoku korygować funkcją, proponowaną w tym opracowaniu, opisującą sumacyjne odkształcenie elementów prasy i kasowanie luzów między nimi, godząc się na niepewność rzędu kilkudziesięciu mikrometrów na granicy wytrzymałości.

Praca została wykonana w roku 2017 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Długosz M., Gustkiewicz J., Wysocki A., 1981a: *Apparatus for investigation of rocks in a triaxial state of stress. Part I. Characteristics of the apparatus and of the investigation method.* Archiwum Górnictwa, t. XXVI, z. 1, str. 17-28.
- Kanciruk A., 2009: *Urządzenia do pomiarów wielkości mechanicznych i temperatury przy użyciu przetworników rezystancyjnych i przykłady ich zastosowania.* Inst. Mech. Górniczo-PAN, Kraków, 165 str. 28-43.
- Nowakowski A., Nurkowski J., Lizak Z., 2011: *Wpływ prędkości obciążania na wartości pewnych stałych materiałowych uzyskiwanych w teście konwencjonalnego trójosiowego ściskania.* Prace Inst. Mechanik Górniczo-PAN, Tom 13, Nr 1-4, s. 45-60.
- Nurkowski J., 2007: *The coreless inductive sensor for strain measurement of rock samples in a pressure cell- some advantages and disadvantages in relation to the electrical resistance strain gauges.* Arch. Min. Sci., Vol. 52 iss. 3, p. 311-330.
- Nurkowski J., 2015: *Zmodyfikowany indukcyjny czujnik przemieszczania w pomiarze ruchu tłoka prasy GTA-10.* Prace Instytutu Mechaniki Górniczo-PAN, vol. 17, no. 1-2, s. 65-74.

Measurement of changes in the length of the rock sample in the GTA-10 triaxial chamber

Abstract

This article describes two methods for measuring axial strains of rock samples in a three-axial pressure chamber of a GTA-10 device. The first is an indirect measurement, previously used, when the sensor is mounted outside the chamber between the machine body and the press piston and direct method – when sensor is mounted on sample of rock, inside the chamber. Because the chamber contains a pressure fluid up to 400 MPa, the internal sensor must be resistant to such pressure. The internal sensor is a linear single-layer coil (without a core) that can change its length. It is an inductive component of the LC generator, located outside the chamber. The recorded oscillation frequency is proportional to the change of the coil length. The external sensor operates on a similar principle, but in the center of the coil is a ferromagnetic core. In the indirect method, the measurement includes the sum of the displacement of the sample and the displacement of a plurality of press elements forming the measuring base such as the piston, the anvils between which the sample is, the plug with the electrical seals, the threaded closure of chamber and the part of the body chamber. These elements are made with limited accuracy and during force loading of the sample, adjust to each other in a difficult-to-predict manner. This causes a large uncertainty in the measurement, and as a result, the changes in the length measurement of hard rocks like granite is practically impossible. In direct measurement, when a sensor is attached directly to the sample, there isn't this uncertainty. This method should be used if information about the shape of the sample load curve is important, although it is more troublesome because the sensor needs to be mounted on the sample each time, while the sensor to the piston is attached permanently. The displacement measured on the piston can be corrected by the function proposed in this study, which is the sum of the deformation of the elements of the press and the clearance between them, with the uncertainty of the order of several dozen micrometers at the strength limit.

Keywords: rocks mechanics, rocks strength, measurement of displacement, displacement sensor, inductive sensors