

# Wpływ prędkości obciążania na wartości pewnych stałych materiałowych uzyskiwanych w teście konwencjonalnego trójosiowego ściskania

ANDRZEJ NOWAKOWSKI, JANUSZ NURKOWSKI, ZBIGNIEW LIZAK

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

## Streszczenie

Artykuł zawiera omówienie wyników czterech serii testów trójosiowych wykonanych na zmodernizowanym urządzeniu GTA-10. Badano próbki z piaskowca „Tumlin” w stanie powietrznie suchym oraz w stanie pełnego nasączenia naftą. Testy wykonano dla dwóch prędkości przesuwu tłoka: „wysokiej” –  $100 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  i „niskiej” –  $1 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ . Potwierdzono poprawność działania wykonanego układu stabilizacji prędkości, doprecyzowano zakres prędkości w jakim układ działa poprawnie i przeprowadzono badania wpływu jakości poszczególnych elementów układu na sposób jego pracy.

Uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych potwierdziły fakt wzrostu różnicowej granicy wytrzymałości  $\sigma_1 - \sigma_3$  ze wzrostem prędkości obciążania próbki. Porównanie wyników uzyskanych dla próbek powietrznie-suchych i nasączonych naftą pozwoliło stwierdzić znaczące spadki  $\sigma_1 - \sigma_3$  dla próbek nasączonych naftą i ciśnieniami wyższymi od ciśnienia zamykania spękań. Wykorzystując prawo ciśnienia efektywnego Terzaghiego oszacowano wartości ciśnien porowych indukowanych w próbce ciśnieniem okólnym, które a następnie wykorzystano do obliczenia tzw. współczynnika Skemptona  $B$ .

**Słowa kluczowe:** trójosiowe ściskanie, stabilizacja prędkości deformacji, regulator PID, różnicowa granica wytrzymałości, płyn porowy, ciśnienie okólne, ciśnienie zamykania spękań, ciśnienie porowe, współczynnik Skemptona

## 1. Wstęp

Prowadzone dotychczas w Pracowni Odkształceń Skał IMG badania koncentrowały się na określeniu właściwości mechanicznych skały w warunkach konwencjonalnego trójosiowego stanu naprężenia dla ustabilizowanych wartości ciśnien okólnego i porowego. Nie było natomiast możliwości uwzględnienia w tych badaniach istotnego parametru, jakim jest prędkość deformacji. W 2010 roku zakończona została w pracowni modernizacja układu sterowania komory trójosiowej GTA-10, dzięki której urządzenie to wyposażone zostało w układ kontroli i stabilizacji prędkości deformacji badanej próbki. W związku z tym na rok 2011 zaplanowano wykonanie serii badań zmierzających do odpowiedzi na pytanie, jakie – w warunkach konwencjonalnego trójosiowego stanu naprężenia – zachodzą zależności między wytrzymałością a ciągliwością skały a jej prędkością deformacji.

Zasadniczym celem tych badań było testowanie zmodernizowanej komory GTA-10. Przyjmując za Kwaśniewskim (1986), że w warunkach testu konwencjonalnego trójosiowego ściskania wytrzymałość skały wraz ze wzrostem prędkości jej deformacji powinna rosnąć a ciągliwość maleć, zdecydowano się wykonać kilka serii testów trójosiowych dla różnych prędkości przesuwu tłoka  $v$ .

## 2. Materiał do badań i przyjęta metodyka

Jako materiał, z którego wykonano próbki do badań, wybrano czerwony piaskowiec pochodzący z kamieniołomu w Tumlinie w Górach Świętokrzyskich (dalej zwany piaskowcem „Tumlin”). Szczegółowy opis petrograficzny tej skały znaleźć można m.in. w pracach Nowakowskiego i in. (2003) oraz Gustkiewicza i in. (2004). Wycięte do badań próbki miały kształt walców o średnicy  $d = 22,5 \pm 0,2$  mm i wysokości  $h = 45,0 \pm 1,0$  mm.

Obserwacje prowadzone trakcie eksperymentów miały umożliwić weryfikację poprawności działania zmodernizowanego urządzenia GTA-10 poprzez:

- a) ocenę jakości działania układu automatycznej regulacji prędkości przesuwu tłoka urządzenia GTA-10,
- b) sprawdzenie zgodności uzyskanych wyników badań wytrzymałościowych wynikami analogicznych badań zamieszczonymi w literaturze.

Zaplanowane badania postanowiono wykonać dla próbek znajdujących się w stanie powietrznie-suchym oraz próbek nasączonych w pełni płynem porowym, przy czym jako medium porowe wybrano fizykochemicznie obojętną i praktycznie nieściśliwą w porównaniu z powietrzem ciecz – naftę. Eksperymenty wykonane na próbkach nasyconych naftą były tzw. testami niedrenowanymi, czyli testami, w których płyn porowy nie ma możliwości wypłynięcia poza przestrzeń porową próbki. Konsekwencje takiego skonfigurowania eksperymentów zostaną omówione w trakcie dyskusji wyników badań (rozdz. 5).

Eksperymenty prowadzono dla dwóch prędkości przesuwu tłoka: „niskiej” – równej  $1 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  i „wysokiej” – równej  $100 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ . Przy zakładanej wysokości próbki rzędu 45 mm prędkości te odpowiadają prędkościom odkształceń rzędu  $2,2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  oraz  $2,2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ . Prędkości te są dla obecnej konfiguracji stanowiska badawczego prędkościami granicznymi – odpowiednio: minimalną i maksymalną – co zostanie wyjaśnione i skomentowane w dalszej części niniejszego opracowania.

## 3. Ocena jakości działania układu automatycznej regulacji przesuwu tłoka w aparacie GTA-10

Przedstawione w niniejszym opracowaniu badania próbek skalnych w klasycznym trójosiowym stanie naprężenia wykonano na hydraulicznym urządzeniu GTA-10 wyprodukowanym w 1978 roku w ówczesnym Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Techniki Wysokich Ciśnień UNIPRESS – PAN<sup>1</sup> wg projektu Jerzego Gustkiewicza i Aleksandra Wysokiego (por. Gustkiewicz i Nowakowski, 2004). Zasadniczą częścią urządzenia jest komora wysokiego ciśnienia (do 450MPa), w której porusza się tłok napędzany olejową pompą nurnikową. W wykonaniu fabrycznym regulacja prędkości przesuwu tłoka odbywała się ręcznie, za pomocą pokrętła. Wkręcając lub wykręcając pokrętło zmieniany był wydatek pompy, a więc ciśnienie oleju w układzie hydraulicznym. Sprężony olej kierowany jest za pomocą układu zaworów do systemu przemieszczania tłoka w komorze. Część tłoka pomiędzy komorą ciśnieniową a układem napędzającym go jest dostępna z zewnątrz i właśnie w tym fragmencie zamocowana jest dźwignia, która atakuje popychacz wskazówkowego mikromierza. Mikromierz umożliwia ustalenie pozycji tłoka oraz jej zmian, co pozwala na przybliżone oszacowanie prędkości jego przemieszczania. Obecnie popychacz ten sprężony jest również z tensometrycznym przetwornikiem przemieszczenia współpracującym z zaprojektowanym i wykonanym w Pracowni urządzeniem pomiarowo-rejestrującym SGM1-C zawierającym czterokanałowy przetwornik A/C i rejestrator danych (por. Kanciruk, 2009, s. 28-43). Urządzenie to rejestrowało i pokazywało na wyświetlaczu położenie tłoka, ciśnienie hydrostatyczne w komorze, ciśnienie napędzające tłok oraz wskazania czujnika odkształceń obwodowych badanej cylindrycznej próbki umieszczonej w komorze.

Podczas deformacji badanej próbki siła działająca na tłok rośnie a prędkość jego przesuwu znacząco maleje. W efekcie konieczne było ręczne zwiększenie wydatku pompy, aby – przynajmniej w przybliżeniu – utrzymać stałą prędkość ruchu tłoka od początku eksperymentu. Działanie to było szczególnie istotne w początkowej fazie testu, gdy różnica między oporami ruchu tłoka nieobciążonego oraz obciążonego oporem próbki była bardzo duża. W pozostałej (przeważającej) części testu, nie mając precyzyjnej informacji o prędkości przesuwu tłoka (a co za tym idzie o prędkości deformacji próbki), wydatku pompy pokrętłem praktycznie nie regulowano. W efekcie prędkość ruchu tłoka (czyli prędkość deformacji próbki) nie była ani znana, ani – tym bardziej – kontrolowana.

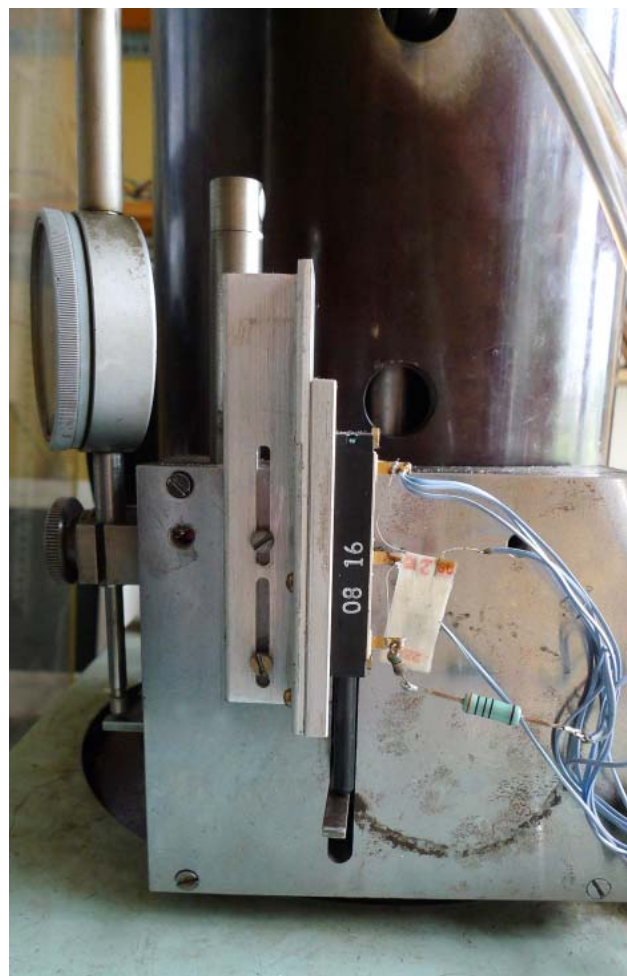
<sup>1</sup> Obecnie Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk

W związku z tą sytuacją podjęto w 2009 r. decyzję o wykonaniu – we współpracy z Politechniką Krakowską – oprzyrządowania i oprogramowania umożliwiającego automatyczną regulację i stabilizację prędkości przesuwu tłoka urządzenia GTA-10. Realizacji podjął się – w ramach pracy magisterskiej – student V roku Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej p. Marcin NOWAK. Promotorem pracy został dr inż. Andrzej ENGLÓT z Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, a jej opiekunem i konsultantem ze strony IMG PAN dr inż. Janusz NURKOWSKI. W ramach pracy wykonano na bazie silnika krokowego układ mechaniczny sterujący wydatkiem pompy urządzenia GTA-10. Silnik ten kierowany jest sygnałem elektrycznym pochodzącym z regulatora PID, który z kolei obsługiwany jest przez program komputerowy rejestrujący – za pośrednictwem przetwornika A/C – i przetwarzający informacje z przetwornika przemieszczenia tłoka. Program ten zainstalowany jest na komputerze klasy PC. Układ elektroniczny sterujący pracą silnika krokowego wykonano w formie karty komputerowej a sam silnik krokowy zamontowano na urządzeniu GTA-10 w pobliżu pokrętki regulacyjnego (patrz rys. 1).

Wykonana automatyka pozwala na stabilizację prędkości przesuwu tłoka od około  $1 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  do około  $100 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ . Zakres możliwych prędkości ograniczony jest „od dołu” dokładnością i rozdzielczością czujnika przemieszczenia a „od góry” przede wszystkim bezwładnością układu hydraulicznego, a także maksymalną szybkością działania przetwornika A/C i silnika krokowego. Aby osiągnąć minimalną prędkość przesuwu tłoka na poziomie  $1 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  wymieniono tensometryczny czujnik przemieszczenia na bardziej precyzyjny i o większym zakresie pomiarowym czujnik potencjometryczny. Wymagało to wykonania nowego układu mocującego czujnik (rys. 2).



Rys. 1. Układ wykonawczy automatyki prasy;  
u góry z lewej silnik krokowy,  
u dołu z prawej pokrętło regulujące wydatek pompy  
sprzężone paskiem z silnikiem



Rys. 2. Czujniki przemieszczenia tłoka: z lewej mechaniczny,  
pośrodku (czarny) potencjometryczny zamocowany  
przesuwnie do korpusu prasy;  
u dołu widoczny popychacz atakujący trzpień czujnika

Przykładowe efekty działania wykonanej automatyki przedstawiono na rys. 3. Rysunek zawiera wybrane wyniki zarejestrowane podczas dwóch testów klasycznego trójosiowego ściskania wykonanych na próbkach piaskowca „Tumlin”. Pokazano na nim następujące zależności:

- i) zależność między naprężeniem różnicowym w próbce  $\sigma_1 - \sigma_3$  a odkształceniem podłużnym próbki  $\varepsilon_1$  – rysunek pierwszy od góry,
- ii) zależność między prędkością ruchu tłoka  $v$  a odkształceniem podłużnym próbki  $\varepsilon_1$  – rysunki drugi i trzeci od góry,
- iii) zależność między liczbą kroków silnika regulacyjnego niezbędną do utrzymania zadanej prędkości  $v$  a odkształceniem podłużnym próbki  $\varepsilon_1$  – rysunek pierwszy od dołu.

Krzywe w kolorze czarnym odpowiadają eksperymentowi, w którym układ regulacji prędkości przesuwu tłoka był cały czas włączony, krzywe w kolorze szarym eksperymentowi, w którym układ ten wyłączono. Początkową prędkość przesuwu tłoka ustawiono na poziomie  $10 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ .

Na wykresie zależności między naprężeniem różnicowym a odkształceniem podłużnym (por. wyżej – pkt i)) zamieszczono dwie krzywe: dla działającej (krzywa „czarna”) oraz niedziałającej (krzywa „szara”) automatyki. Początkowy płaski fragment każdej z krzywych odpowiada sytuacji, w której tłok prasy przesuwają się w komorze bez kontaktu z próbką. Widoczne na wykresie niezerowe naprężenia są efektem rejestracji przez układ pomiarowy wartości siły tarcia tłoka o uszczelki komory ciśnieniowej i cylindra napędowego. W tym czasie następuje wstępne ustawienie i stabilizacja zakładanej prędkości przesuwu tłoka. Od momentu kontaktu tłoka z próbką rozpoczyna się właściwy eksperyment trójosiowego ściskania. Opór stawiany przez próbkę powoduje, że siła nacisku tłoka rośnie a jego prędkość spada. Utrzymanie zadanej początkowo prędkości przesuwu tłoka wymaga zwiększenia wydatku pompy, który jest realizowany przez automatykę prasy. Jeżeli następnie w wyniku zniszczenia próbki siła na tłoku spada a tłok prasy przyspiesza następuje procedura odwrotna, więc automatyka zmniejsza wydatki pompy, celem spowolnienia tłoka prasy. Po zakończeniu eksperymentu wyniki koryguje się tak, aby skasować część odpowiadającą uzyskaniu kontaktu tłoka z próbką, odejmując początkowe naprężenie i odkształcenie.

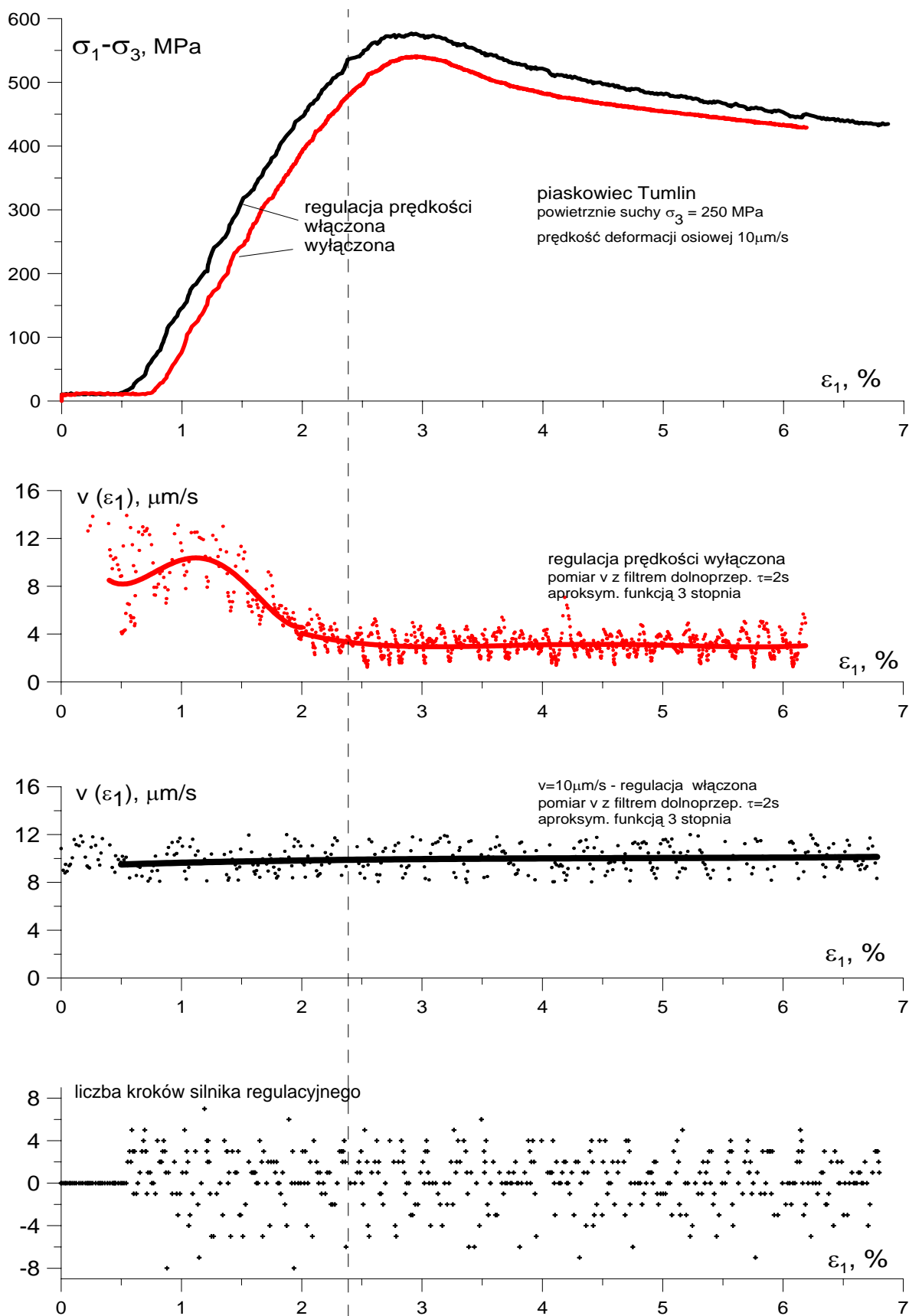
Na drugim od góry wykresie pokazano obliczone prędkości chwilowe ruchu tłoka podczas eksperymentu, w którym automatyka regulacji prędkości była wyłączona. Wyniki aproksymowano wielomianem trzeciego stopnia. Początkowe „zafalowanie” wartości  $v$  (dobrze widoczne na krzywej aproksymującej), które ma miejsce po osiągnięciu kontaktu tłoka z próbką, zostało skorygowane ręcznie tak, aby osiągnąć żadaną prędkość  $10 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ . Po tej korekcie wydatku pompy nie regulowano. W efekcie narastający opór próbki spowodował niemal monotoniczny spadek prędkości deformacji do około  $4 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ , a po przekroczeniu wytrzymałości próbki prędkość deformacji ustaliła się na średniej prędkości około  $3 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ , czyli ok. 30% wartości zadanej.

Na kolejnym wykresie (trzecim od góry), pokazano chwilowe prędkości przesuwu tłoka dla eksperymentu z włączoną automatyką regulacji prędkości. Wyniki również aproksymowano wielomianem trzeciego stopnia. Widać, że układ automatycznej regulacji prędkości przez cały czas trwania testu utrzymywał średnią prędkość tłoka na zadanym poziomie  $10 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ . Przebieg procesu regulacji tej prędkości widoczny jest na wykresie poniżej (wykres pierwszy od dołu), gdzie przedstawiono o ile kroków obracał się silnik sprzężony z regulatorem tak, aby ustabilizować prędkość. Dla badanej próbki piaskowca i zadanej wartości  $v = 10 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  amplituda obrotów silnika wynosiła  $\pm 8$  kroków.

Przy większych prędkościach maksymalna ilość kroków wykonanych jednorazowo wzrasta a przy mniejszych maleje. Odczytu położenia tłoka i wysyłki nastaw do silnika dokonywano co 0,65s.

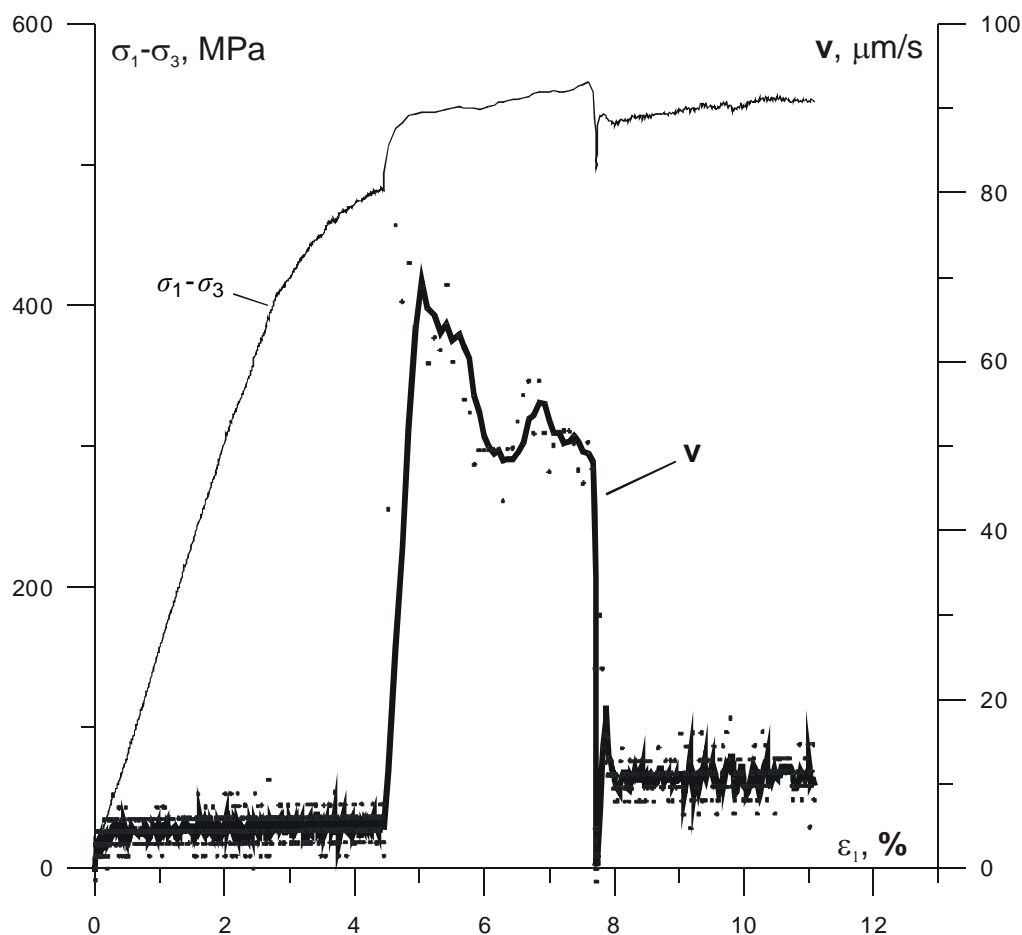
Z porównania pokazanych na rys. 3 krzywych zależności między naprężeniem różnicowym a odkształceniem podłużnym wynika, że – dla zadanej wstępnie prędkości deformacji równej  $10 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  – wytrzymałość próbki ściskanej w warunkach wyłączonego układu stabilizacji prędkości przesuwu tłoka była mniejsza niż kiedy układ ten był włączony. Składają się na to dwa czynniki:

1. Przy wyłączonej automatyce rzeczywista średnia prędkość deformacji była znacząco mniejsza (średnio  $5 \mu\text{m/s}$ ) od zakładanej. W efekcie eksperyment z wyłączoną automatyką był po prostu eksperymentem wolniejszym. Jak wiadomo z literatury, wartości wytrzymałości spadają ze spadkiem prędkości obciążania.
2. Korekta wyliczonego naprężenia ze względu na tarcie uszczelki tłoków zaniża wyliczone wartości naprężeń. Nie ma bowiem bieżącej informacji o wartości tej siły tarcia podczas deformacji próbki. Z konieczności więc zakładano dotychczas, że siła ta jest stała i równa sile przed uzyskaniem kontaktu tłoka z próbką. W rezultacie rzeczywista wartość siły obciążającej próbkę jest zaniżona, przy spadku prędkości obciążania.



Rys. 3. Przykładowe wyniki eksperymentów wykonanych przy włączonej i wyłączonej automatyce sterującej; piaskowiec „Tumlin”, stan powietrznie-suchy;  $\sigma_3 = 250$  MPa

Efekt zależności wielkości naprężeń w próbce od prędkości jej deformacji (a zatem od prędkości przesuwu tłoka  $v$ ) potwierdza eksperyment, którego wynik pokazano na rys. 4. Po legał on na tym, że wykonując test trójosiowy przez pierwsze 4,5% deformacji próbki utrzymywano prędkość przesuwu tłoka na poziomie rzędu  $5 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  by następnie zwiększyć ją skokowo do wartości rzędu  $70 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ , po czym – gdy deformacja próbki przekroczyła 7,5% – obniżyć wartość  $v$  do poziomu rzędu  $10 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ . Rys. 4 pokazuje, jak w chwili skokowej zmiany prędkości przesuwu tłoka następowała w próbce skokowa zmiana wartości naprężeń różnicowych.



Rys. 4. Skutki skokowej zmiany prędkości przesuwu tłoka; piaskowiec „Tumlin”, stan powietrznie-suchy;  $\sigma_3 = 250 \text{ MPa}$

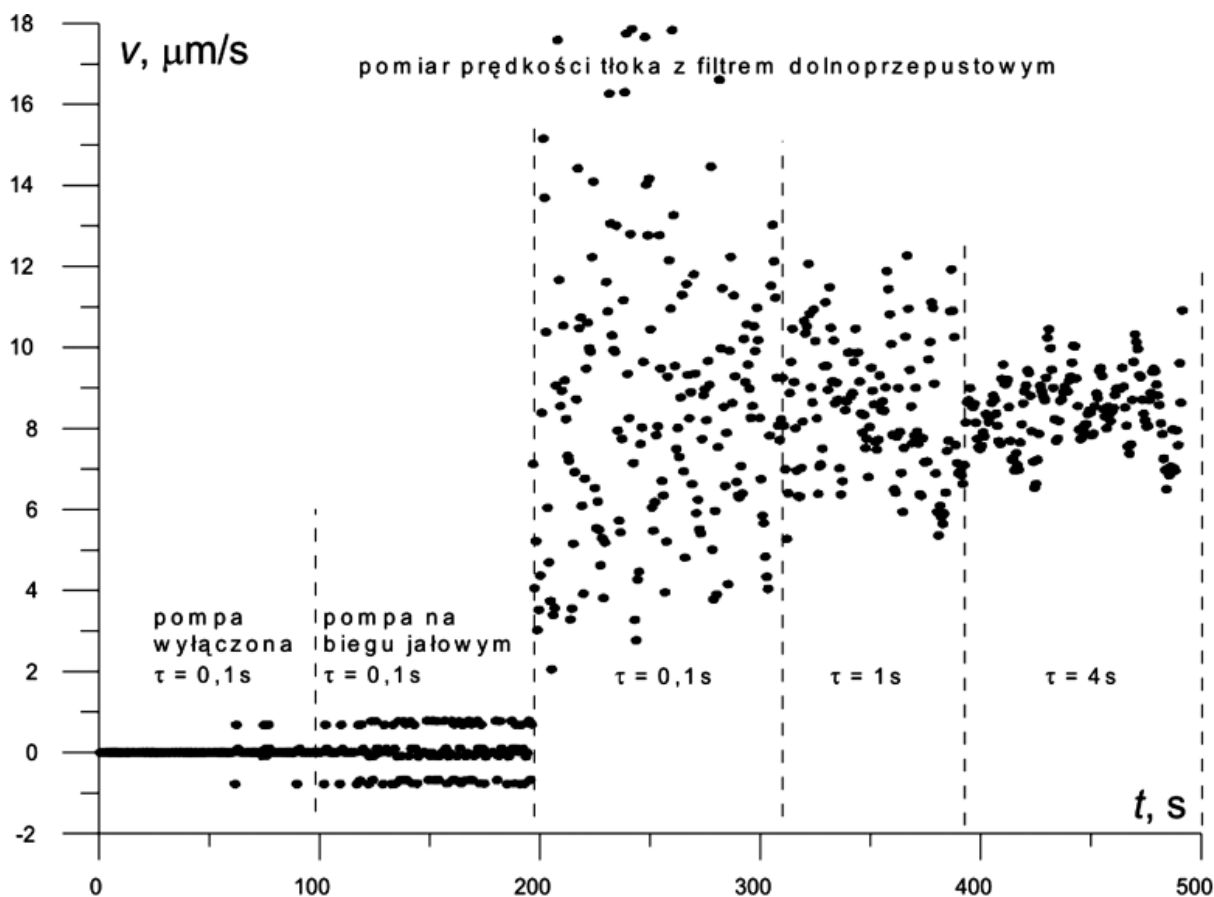
Wracając do wykresów pokazanych na rys. 3 omówić jeszcze należy znaczący rozrzut wartości rejestrowanej prędkości, obserwowany zarówno w przypadku działającej jak i wyłączanej automatyki. Przyczyn tego rozrzutu może być kilka, a główne z nich wydają się następujące:

- prędkość wyliczana jest jako pochodna wskazań potencjometrycznego czujnika przemieszczenia po czasie, a operacja taka wzmacnia szumy,
- układ przesuwu tłoka jest obciążony tarciem o uszczelki (8 sztuk) a ślizgacz potencjometru tarciem o ścieżkę rezystywną,
- drżania wywołane działaniem silnika i pompy przenoszone na czujnik,
- zakłócenia elektryczne działających w pobliżu urządzeń,
- ewentualne pulsacje ciśnienia oleju pod siłownikiem tłoka deformującego próbkę.

Zespół tych czynników ogranicza sensowną stabilizację małych prędkości do około  $5 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ .

Aby umożliwić osiągnięcie prędkości niższych niż  $5 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  zastosowano filtrację pomiarów z czujnika przemieszczenia filtrem dolnoprzepustowym o regulowanej stałej czasowej. Najbardziej optymalna okazała się stała czasowa 2 s, zbliżona do czasu reakcji pompy na zmianę nastawy regulatora wydatku pompy. Poniżej, na rys. 5, przedstawiono test pomiaru szybkości przesuwu tłoka w różnych okolicznościach.

Początkowo wartość stałej czasowej ustawiono na  $\tau = 0,1$  s i przez 100 s silnik pompy był wyłączony – na wykresie widać nieliczne szumy o małej amplitudzie. Przez następne 100 s – dla niezmięnionej wartości stałej  $\tau$  – włączono silnik przy ustawieniu zaworów hydrauliki na bieg jałowy (bez przemieszczania tłoka) – widoczny jest wzrost liczby szumów spowodowanych drganiami pochodzącymi od pracy silnika pompy, ale amplituda tych szumów pozostaje niewielka. Od 200 s włączono przesuw tłoka z zadaną prędkością  $10 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ , przy czym filtracja sygnału nadal pozostawała praktycznie wyłączona ( $\tau = 0,1$  s) – widać gwałtowny wzrost szumów o amplitudzie od 2 do  $18 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ . Począwszy od 300 s trwania testu zwiększono wartość stałej czasowej filtru dolnoprzepustowego do  $\tau = 1$  s, a od 400 s do  $\tau = 4$  s. W efekcie amplituda szumów zmalała odpowiednio najpierw do  $7 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  a na końcu do  $4 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ . Warto w tym momencie dodać, że krzywe pokazane na rys. 3 zostały uzyskane dla stałej czasowej filtru  $\tau = 2$  s.



Rys. 5. Wyniki testu pomiaru prędkości przesuwu tłoka dla różnych stałych czasowych filtru dolnoprzepustowego

Należy zauważyć, że zwiększanie stałej czasowej filtru dolnoprzepustowego oprócz korzystnego zmniejszenia szumów rejestrowanej prędkości zwiększa bezwładność działania automatyki. Czy w takim razie można coś poprawić w układzie prasa-automatyka? Wydaje się, że niewiele. Tarcia na uszczelkach tłoka ani drgań urządzenia realnie zmniejszyć się nie da. Można spekulować nad zastąpieniem czujnika odkształceń czujnikiem prędkości, wyeliminowany byłby wtedy proces różniczkowania. Możliwości są ograniczone praktycznie do czujnika elektrodynamicznego, opartego na przemieszczającej się w polu magnetycznym cewce. Niestety istniejące czujniki mają ograniczony zakres przemieszczenia i najmniejszych mierzonych prędkości. W czujnikach takich sygnałem wyjściowym jest siła elektromotoryczna o wartości określonej wzorem:  $e = kBv$ , gdzie  $k$  określa parametry uzwojenia,  $B$  indukcję pola magnetycznego w szczelinie w której porusza się cewka, a  $v$  to prędkość przemieszczania się cewki w polu magnetycznym. Na przykład czujnik PR9267 firmy Philips ma zakres przemieszczenia suwaka 2mm, minimalną mierzoną prędkość  $50 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ , a czułość  $30 \mu\text{V} \times (\mu\text{m} \times \text{s}^{-1})^{-1}$ . Każdy z tych istotnych parametrów jest niewystarczający dla zastosowania w omawianej automatyce. Wydaje się zatem, iż nie jest możliwym osiągnięcie w istniejących warunkach stabilizacji prędkości przesuwu tłoka niższej niż  $1 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ .

## 4. Wyniki badań wytrzymałościowych

Jak wspomniano wyżej (rozdz. 2) eksperymenty klasycznego, trójosiowego ściskania wykonano dla dwóch prędkości przesuwu tłoka:

- $1 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  – dalej oznaczanej jako prędkość „niska”, oraz
- $100 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  – dalej oznaczanej jako prędkość „wysoka”.

Eksperymenty wykonano dla ciśnień okólnych  $\sigma_3 = 50, 100, 150, 200, 250, 300$  i  $350$  MPa, przy czym dla obu przyjętych prędkości wykonano badania dla próbek w stanie powietrznie-suchym oraz w stanie nasączonym naftą.

### 4.1. Wpływ prędkości przesuwu tłoka na wartość różnicowej granicy wytrzymałości próbki

Zestawienie wartości różnicowej granicy wytrzymałości  $R_{\sigma_1-\sigma_3}$  uzyskane dla różnych wartości ciśnień okólnych  $\sigma_3$  oraz „niskiej” i „wysokiej” prędkości przesuwu tłoka pokazano w tabelach 1 i 2 a odpowiednie zależności zilustrowano na rys. 6 i 7. Pokazane na rys. 6 i 7 krzywe dowodzą, że dla piaskowca badanego testem konwencjonalnego trójosiowego ściskania różnicowa granica wytrzymałości rośnie wraz ze wzrostem prędkości ruchu tłoka. Przyrost ten wydaje się być nieco wyższy w przypadku próbek nasączonych naftą niż w przypadku próbek znajdujących się w stanie powietrznie suchym.

Tab. 1. Zestawienie wartości różnicowej granicy wytrzymałości  $R_{\sigma_1-\sigma_3}$  uzyskanych dla różnych wartości ciśnienia okólnego  $\sigma_3$  w stanie powietrznie-suchym

		[MPa]						
		50	100	150	200	250	300	350
$R_{\sigma_1-\sigma_3}$ [MPa]	Prędkość	241	316	406	452	502	492	601
	Prędkość	292	355	438	512	559	617	669

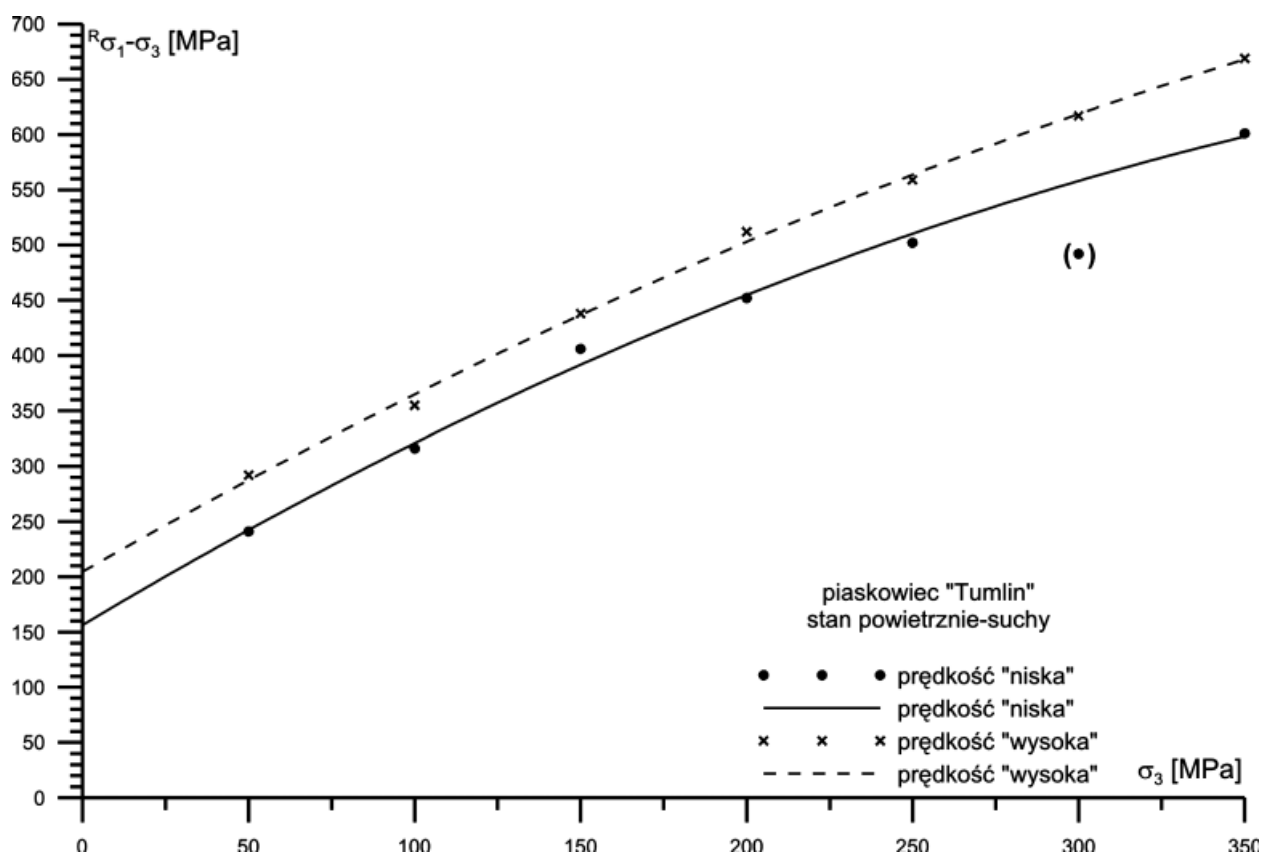
Tab. 2. Zestawienie wartości różnicowej granicy wytrzymałości  $R_{\sigma_1-\sigma_3}$  uzyskanych dla różnych wartości ciśnienia okólnego  $\sigma_3$  w stanie nasączonym naftą

		[MPa]						
		50	100	150	200	250	300	350
$R_{\sigma_1-\sigma_3}$ [MPa]	Prędkość „niska”	237	297	386	423	423	457	490
	Prędkość „wysoka”	289	372	427	474	488	525	584

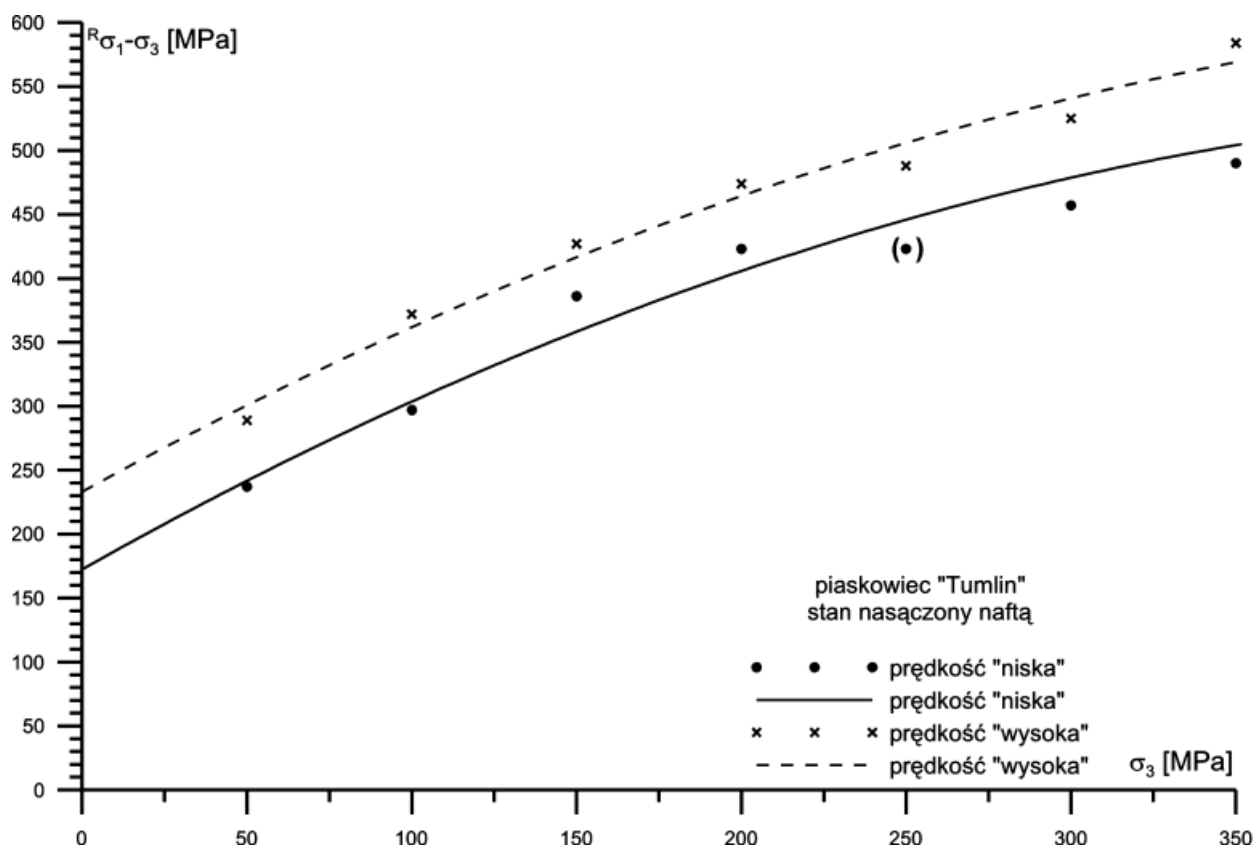
### 4.2. Różnice w zachowaniu próbki w stanie powietrznie-suchym i próbki nasączonej naftą

O ile badanie wpływu prędkości deformacji próbki na wartość różnicowej granicy wytrzymałości potwierdziło powszechnie znany fakt wzrostu wartości tej granicy ze wzrostem prędkości deformacji, o tyle porównanie wartości  $R_{\sigma_1-\sigma_3}$  uzyskanych dla tej samej prędkości deformacji w przypadku próbek powietrznie-suchych oraz nasączonych naftą prowadzi do dość zaskakujących rezultatów. Na rys. 8 pokazano wyniki odpowiednich eksperymentów wykonanych przy prędkości „niskiej”. Porównanie odpowiednich wartości różnicowej granicy wytrzymałości pokazuje, że – dla danej prędkości deformacji próbki – fakt jej nasączenia cieczą w zasadzie nie wpływa na wartość  $R_{\sigma_1-\sigma_3}$  dla ciśnień okólnych  $\sigma_3$  nie większych niż ok. 125 MPa. Dla  $\sigma_3 > 125$  MPa wartości różnicowej granicy wytrzymałości próbek w stanie powietrznie-suchym są znacząco większe niż odpowiadające im wartości dla próbek nasączonych naftą, przy czym różnica ta rośnie wraz z wartością ciśnienia okólnego  $\sigma_3$ , osiągając wartość ok. 220 MPa dla ciśnienia okólnego równego 350 MPa.

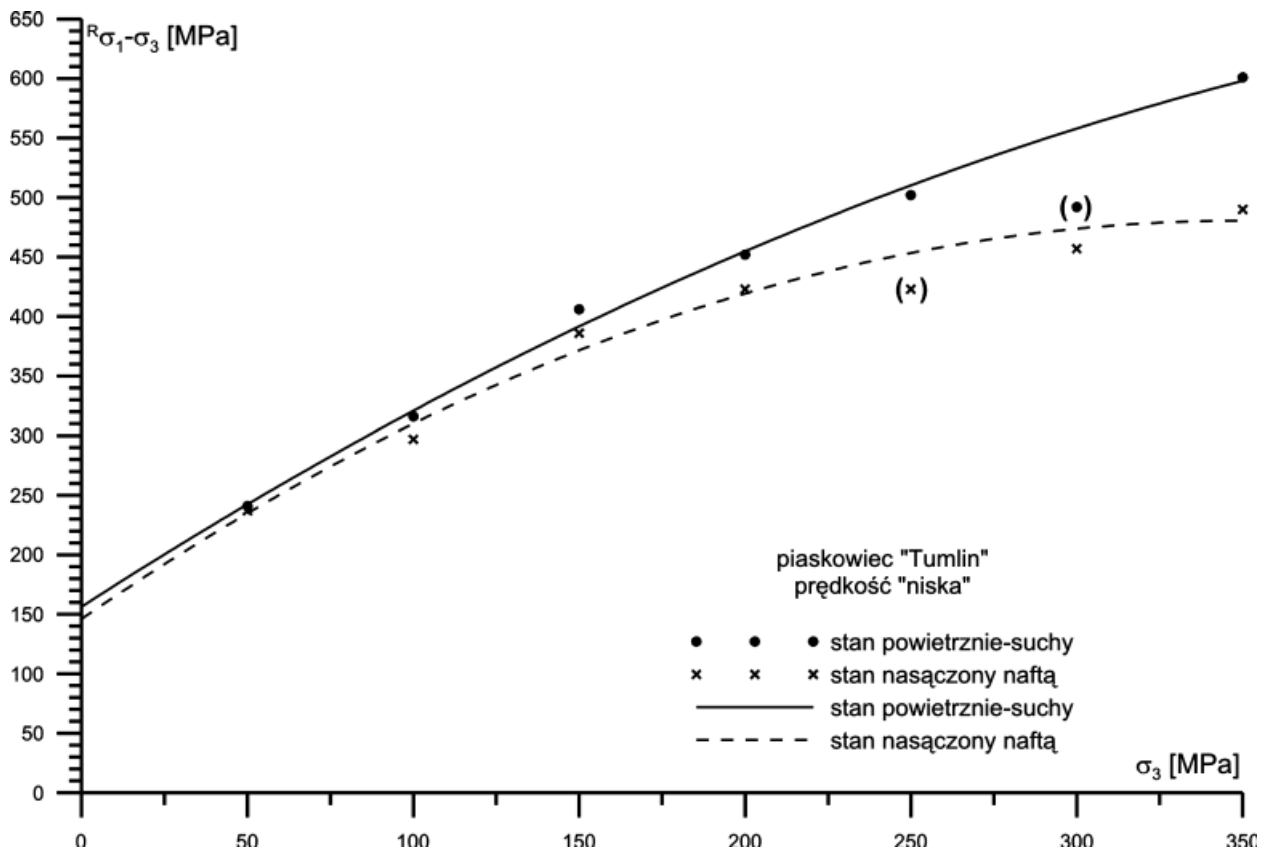
Podobny efekt daje się zaobserwować dla – pokazanych na rys. 9 – wyników eksperymentów wykonanych dla prędkości „wysokiej”. Tutaj też krzywe odpowiadające stanom: powietrznie-suchemu oraz nasączonemu naftą praktycznie pokrywają się do ciśnienia okólnego 125 MPa by następnie „rozejść się” identycznie jak dla prędkości „niskiej”. Na końcu zakresu pomiarowego ( $\sigma_3 = 350$  MPa) różnica w wartościach różnicowej granicy wytrzymałości wynosi 230 MPa.



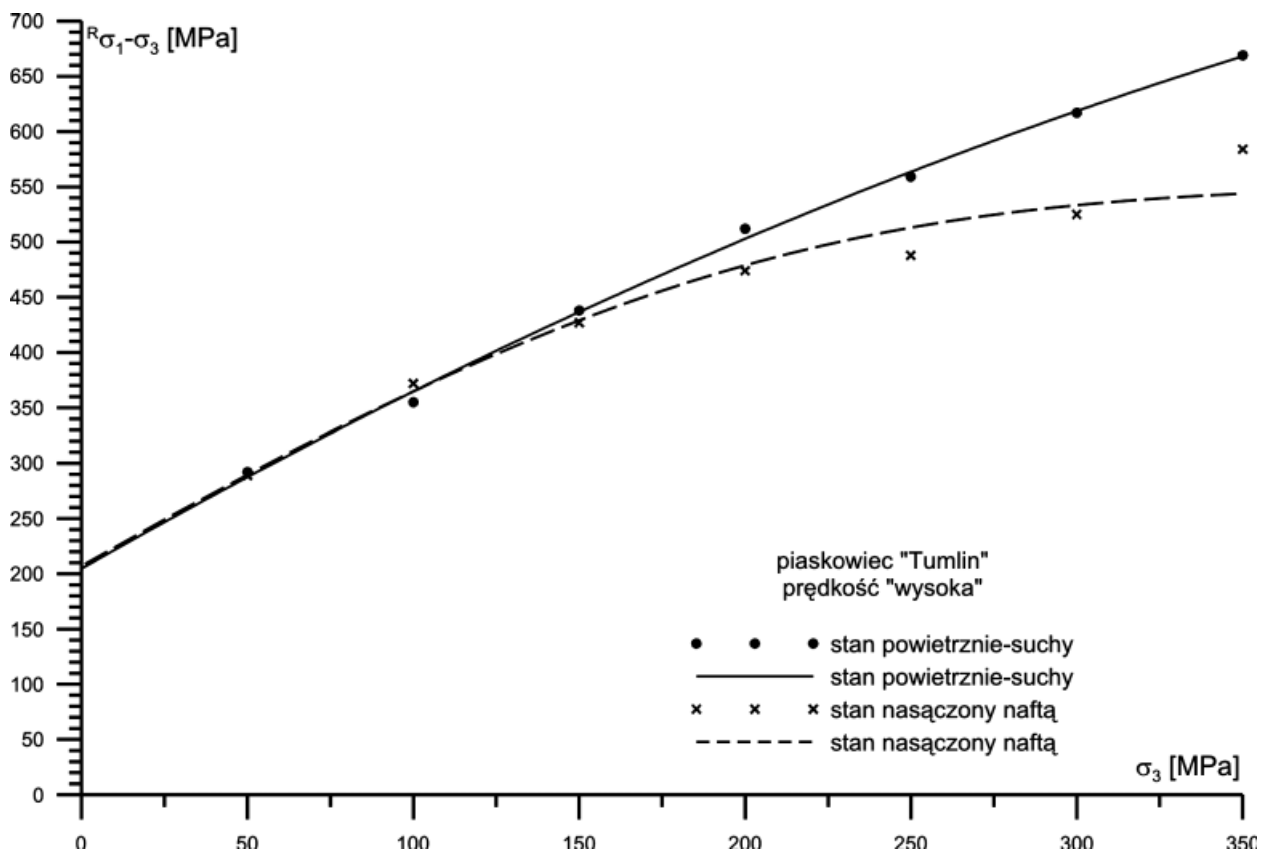
Rys. 6. Różnicowa granica wytrzymałości  $R_{\sigma_1-\sigma_3}$  jako funkcja ciśnienia okólnego  $\sigma_3$ ; piaskowiec „Tumlin”, stan powietrznie-suchy



Rys. 7. Różnicowa granica wytrzymałości  $R_{\sigma_1-\sigma_3}$  jako funkcja ciśnienia okólnego  $\sigma_3$ ; piaskowiec „Tumlin”, stan nasączony naftą



Rys. 8. Różnicowa granica wytrzymałości  $R_{\sigma_1 - \sigma_3}$  jako funkcja ciśnienia okólnego  $\sigma_3$ ; piaskowiec „Tumlin”, prędkość deformacji próbki „niska”



Rys. 9. Różnicowa granica wytrzymałości  $R_{\sigma_1 - \sigma_3}$  jako funkcja ciśnienia okólnego  $\sigma_3$ ; piaskowiec „Tumlin”; prędkość deformacji próbki „wysoka”

## 5. Dyskusja uzyskanych wyników

Jak już wspomniano wyżej fakt wzrostu wytrzymałości próbki wraz ze wzrostem prędkości jej obciążania nie jest niczym zaskakującym. Efekt ten jest znany od wielu lat i był obserwowany zarówno w eksperymencie jednoosiowego ściskania (por. np. Vutukuri i in., 1974 – s. 44-49), jak i w eksperymencie konwencjonalnego trójosiowego ściskania (por. Kwaśniewski, 1986). Warto natomiast skupić się nad zaobserwowanymi różnicami w zachowaniu materiału powietrznie-suchego i nasączonego naftą.

Analiza krzywych pokazanych na rys. 8 i 9 upoważnia do postawienia dwóch podstawowych pytań:

- A) Dlaczego – dla ciśnień okólnych równych 150 MPa i wyższych – różnicowa granica wytrzymałości uzyskana dla próbek nasączonych naftą jest niższa niż dla próbek powietrznie-suchych?
- B) Dlaczego ciśnieniem okólnym rozgraniczającym te dwa różne typy zachowań jest ciśnienie 125 MPa?

Poszukując odpowiedzi na pytanie A) należy zacząć od stwierdzenia, że ciśnienie okólne, którym obciąża się próbkę w początkowej fazie testu konwencjonalnego trójosiowego ściskania, działa analogicznie jak w przypadku eksperymentu ściśliwości. Wywołuje ono spadek całkowitej objętości próbki będący przede wszystkim skutkiem deformacji przestrzeni porowej skały (por. np. Walsh i Grosenbaugh, 1979). Jeżeli przestrzeń ta wypełniona jest ściśliwym gazem to spadek jej objętości nie indukuje znaczącego wzrostu ciśnienia porowego *ergo* sposób mechanicznego oddziaływania tego ciśnienia na właściwości próbki pozostaje bez zmian. Inaczej przedstawia się sprawa, gdy płynem porowym jest nieściśliwa ciecz a rozważany eksperyment jest – jak w tym przypadku – testem niedrenowanym. W takim przypadku nawet niewielki spadek objętości przestrzeni porowej próbki może wydrukować w cieczy porowej ciśnienie porowe o znaczącej wartości. O efekcie tym pisze Skempton (1954) wprowadzając w swojej pracy tzw. współczynnik Skemptona  $B$ , zdefiniowany następująco:

$$B = \frac{\Delta p_{p,ind}}{\Delta \sigma_3} \quad (1)$$

w którym:  $p_{p,ind}$  – ciśnienie porowe wydrukowane deformacją porów,  $\sigma_3$  – ciśnienie okólne. Interesująca dyskusję na temat związków między wartością współczynnika  $B$  a innymi parametrami charakteryzującymi test ściśliwości znaleźć można u Jaegera i in. (2007 – s. 175-178). Jeżeli zatem przyjąć, że – w sensie formalnym – dla próbek w stanie powietrznie-suchym mamy w trakcie eksperymentu  $p_{p,ind} = 0$ , to dla próbek nasączonych naftą z prawdopodobieństwem granicznym z pewnością możemy powiedzieć, że  $p_{p,ind} \neq 0$ .

Wyindukowane w przestrzeni porowej próbki ciśnienie porowe  $p_{p,ind}$  działa, w sensie mechanicznym, niejako „odwrotnie” niż ciśnienie okólne  $\sigma_3$ . Zauważył to już i szczegółowo opisał Gustkiewicz (1990). Tenże Autor pokazał również, że jeżeli ciśnienie porowe w próbce skalnej jest różne od zera a płyn porowy jest płynem inertnym, to wartość różnicowej granicy wytrzymałości próbki jest w istocie rosnącą funkcją pewnego ciśnienia  $'\sigma_3$ , zdefiniowanego jako różnica ciśnień okólnego i porowego:

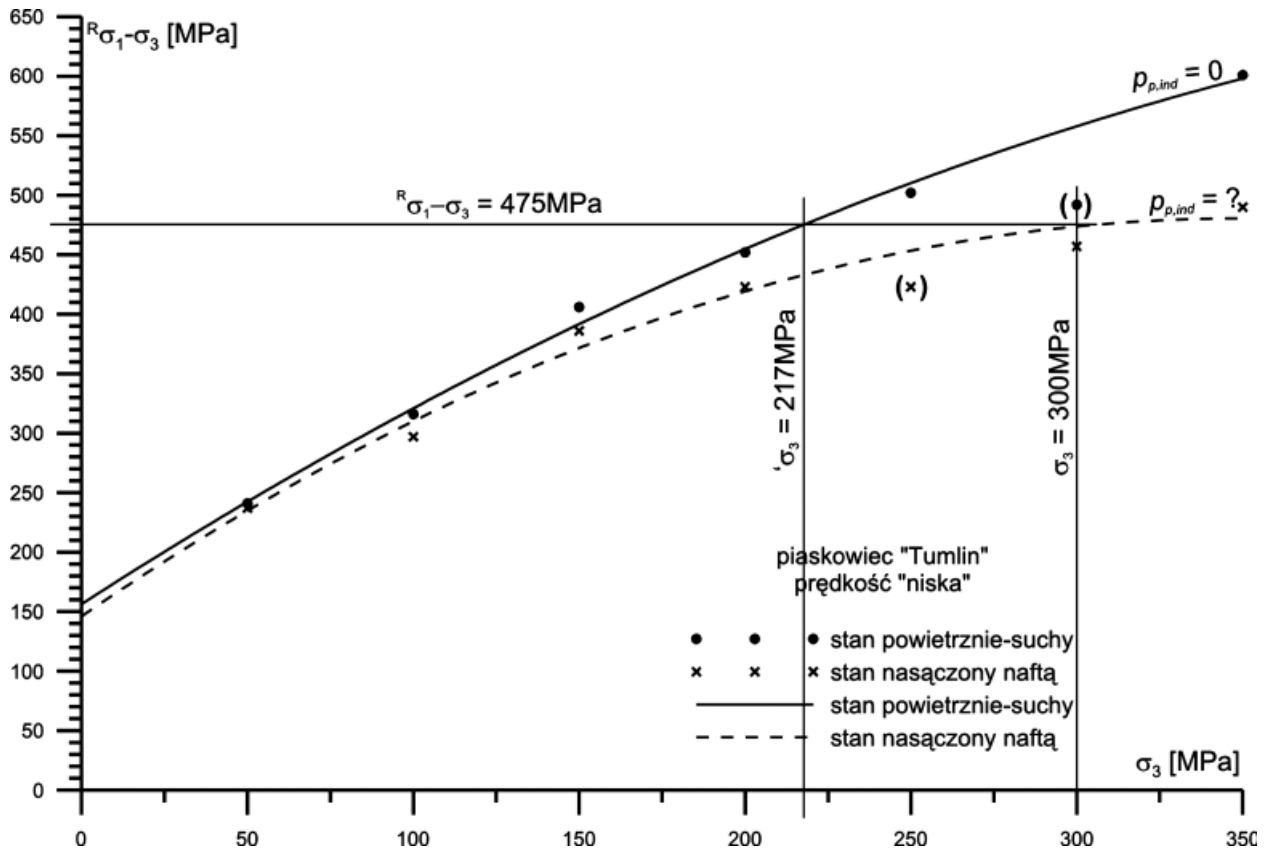
$$'\sigma_3 = \sigma_3 - p_p \quad (2)$$

Należy w tym momencie zauważyć, iż związek (2) jest sformułowanym przez Karla von Terzagiego dla gruntów prawem ciśnienia efektywnego (Terzaghi, 1923), a samo ciśnienie  $'\sigma_3$  zdefiniowanym przez tegoż Autora ciśnieniem efektywnym.

Jeżeli teraz mamy do czynienia z próbką nasączoną cieczą (naftą), to jej granica wytrzymałości musi być funkcją nie tyle ciśnienia  $\sigma_3$  ile zdefiniowanego wzorem (2) ciśnienia  $'\sigma_3$ , przy czym obecne w tym wzorze ciśnienie  $p_p$  nie jest ciśnieniem zadany, lecz ciśnieniem indukowanym deformacją objętościową próbki pod wpływem ciśnienia okólnego. Rodzi się w tym momencie pytanie, czy – a jeżeli tak to w jaki sposób – można oszacować wartość wydrukowanego ciśnienia  $p_{p,ind}$ ?

Pierwszy, najprostszy sposób tego oszacowania polega na pomiarze wprost. Takiego pomiaru dokonali np. w laboratorium w Grenoble Denis Fabre i Jerzy Gustkiewicz (Fabre i Gustkiewicz, 1997). Badali oni testem ściśliwości polskie i francuskie wapień i piaskowce, wyznaczając na podstawie wyników eksperymentów odpowiednie moduły ściśliwości, współczynniki Biota i współczynniki Skemptona. Ten sposób nie był jednak dostępny dla autorów niniejszego opracowania z uwagi na brak odpowiedniej aparatury.

Inny sposób podejścia do problemu daje równanie (2). Jego wykorzystanie wymaga przyjęcia założenia, że jeżeli wartości różnicowej granicy wytrzymałości są równe to równe są także wartości ciśnień efektywnych. W stanie powietrznie-suchym  $p_p = 0$  a zatem  $'\sigma_3 = \sigma_3$ , natomiast w stanie nasączonym cieczą  $p_{p,ind} \neq 0$  i  $'\sigma_3 = \sigma_3 - p_{p,ind}$ . Popatrzmy teraz na rys. 10 i przeanalizujemy wynik dla próbki nasączonej naftą przy ciśnieniu  $\sigma_3 = 300$  MPa.



Rys. 10. Wyznaczenie indukowanego ciśnienia porowego  $p_{p,ind}$  na podstawie krzywych zależności między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem okólnym dla  $\sigma_3 = 300$  MPa; piaskowiec „Tumlin”, prędkość deformacji próbki „niska”

Jak pokazuje rys. 10, jeśli  $\sigma_3 = 300$  MPa to dla próbki nasączonej naftą (krzywa przerywana)  $R_{\sigma_1 - \sigma_3} = 475$  MPa. Taką wartość różnicowej granicy wytrzymałości uzyskuje w stanie powietrznie suchym (krzywa ciągła) próbka ściskana przy ciśnieniu okólnym równym 217 MPa. Naszym ciśnieniem efektywnym, zastępującym parę  $\sigma_3 = 300$  MPa i  $p_{p,ind} = ? \neq 0$ , jest zatem ciśnienie efektywne  $'\sigma_3 = 217$  MPa. Podstawiając te wartości do (2) otrzymujemy:

$$217 \text{ MPa} = 300 \text{ MPa} - p_{p,ind} \quad (3)$$

$$p_{p,ind} = 83 \text{ MPa}$$

a następnie wykorzystując (1)

$$B = \frac{83 \text{ MPa}}{300 \text{ MPa}} \approx 0,28 \quad (4)$$

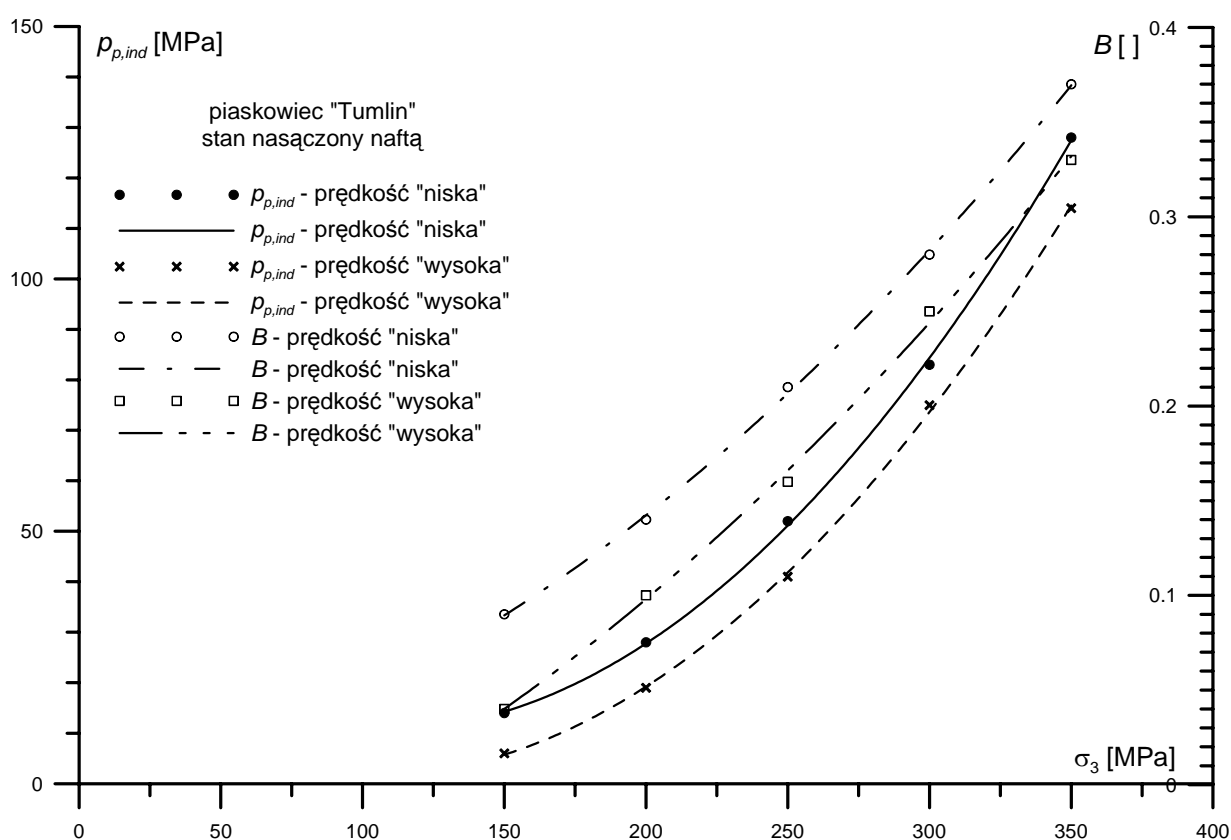
Poniżej, w tab. 3 i 4, zestawiono wyliczone na podstawie powyższej procedury wartości porowych ciśnień indukowanych oraz współczynników Skemptona dla wykonanych testów trójosiowych, a na rys. 11 pokazano zależność wartości indukowanego ciśnienia porowego oraz współczynnika Skemptona od ciśnienia okólnego. Widoczne na rys. 11 krzywe pokazują, że wartości porowych ciśnień indukowanych (a co za tym idzie wartości współczynników Skemptona) rosną wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego, przy czym wzrost ten jest mniejszy dla prędkości przesuwu tłoka (prędkości deformacji próbki) określanej jako „wysoka”.

Tab. 3. Ciśnienie okólne ( $\sigma_3$ ), ciśnienie efektywne ( $'\sigma_3$ ), wydukowane ciśnienie porowe ( $p_{p,ind}$ ) oraz współczynnik Skempton ( $B$ ) dla wykonanych testów trójosiowych; piaskowiec „Tumlin”, prędkość przesuwu tłoka „niska”

$\sigma_3$ [MPa]	50	100	150	200	250	300	350
$'\sigma_3$ [MPa]	50	100	136	172	198	217	222
$p_{p,ind}$ [MPa]	0	0	14	28	52	83	128
$B$	0,00	0,00	0,09	0,14	0,21	0,28	0,37

Tab. 4. Ciśnienie okólne ( $\sigma_3$ ), ciśnienie efektywne ( $'\sigma_3$ ), wydukowane ciśnienie porowe ( $p_{p,ind}$ ) oraz współczynnik Skempton ( $B$ ) dla wykonanych testów trójosiowych; piaskowiec „Tumlin”, prędkość przesuwu tłoka „wysoka”

$\sigma_3$ [MPa]	50	100	150	200	250	300	350
$'\sigma_3$ [MPa]	50	100	144	181	209	225	236
$p_{p,ind}$ [MPa]	0	0	6	19	41	75	114
$B$	0,00	0,00	0,04	0,10	0,16	0,25	0,33

Rys. 11. Zależność między indukowanym ciśnieniem porowym  $p_{p,ind}$  oraz współczynnikiem Skemptona  $B$  a ciśnieniem okólnym  $\sigma_3$ ; piaskowiec „Tumlin” nasączony naftą, prędkości przesuwu tłoka: „niska” i „wysoka”

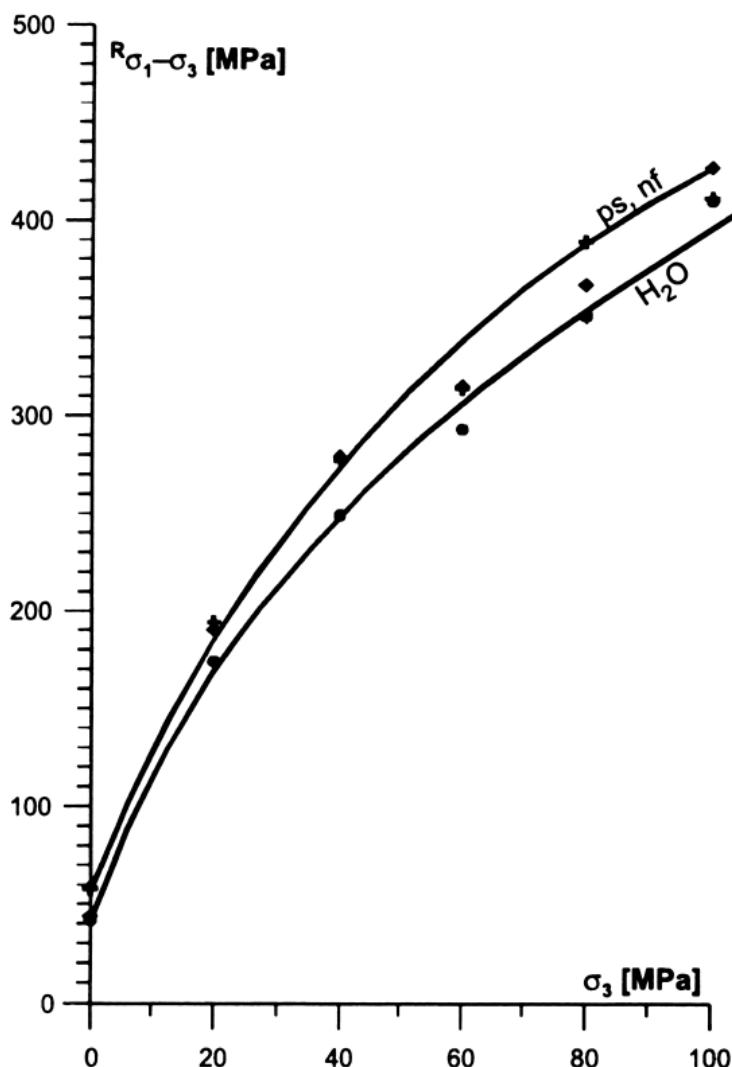
Biorąc pod uwagę opisany powyżej mechanizm redukcji różnicowej granicy wytrzymałości w wyniku indukcji ciśnienia porowego, sformułowane na początku niniejszego rozdziału (pytanie B)), należy nieco doprecyzować. W tej chwili powinno ono brzmieć następująco: dlaczego dla ciśnień okólnych niższych od 125 MPa indukcja ciśnienia porowego nie następuje?

Odpowiedzi na tak sformułowane pytanie dostarcza przebieg testu ściśliwości. Już w 1965 r. J.B. Walsh analizując krzywą zależności między ciśnieniem hydrostatycznym powietrznie-suchej próbki skalnej a zmianą jej objętości zauważył, że początkowy fragment tej zależności jest nieliniowy (skierowany wypukłością w dół) i związał go z procesem zamykania spękań (Walsh, 1965). Ciśnienie hydrostatyczne, dla którego odcinek ten się kończy i krzywa ściśliwości przechodzi w odcinek prostoliniowy nazywamy ciśnieniem zamykania spękań i często oznaczamy  $p_0$  (por. np. Gustkiewicz, 1989). Jeżeli teraz wyobrazimy sobie, że

spękania w badanej próbce są wypełnione cieczą porową tylko częściowo, to można przyjąć, że indukcja ciśnienia porowego nie będzie możliwa tak długo, jak długo cała sieć wolnych od cieczy porowej spękań nie zostanie zamknięta. A zatem dla ciśnień hydrostatycznych poniżej  $p_0$  będzie cały czas  $p_{p,ind} = 0$ .

Analizując krzywe ścisłości uzyskane dla piaskowca „Tułmin” Jerzy Gustkiewicz ustalił (por. Gustkiewicz, 2000), że dla tej skały  $p_0 \approx 125$  MPa. Kontynuując zaprezentowane powyżej rozumowanie stwierdzić zatem można, że dla  $\sigma_3 < p_0 \approx 125$  MPa będzie cały czas  $p_{p,ind} = 0$ . Potwierdzają to krzywe pokazane na rys. 8 i 9 ( $R_{\sigma_1-\sigma_3}$  dla próbek w stanie powietrznie-suchym takie samo jak dla próbek nasączonych naftą), potwierdzają też wyniki analizy tych krzywych zawarte w tab. 3 i 4, które zestawiono na rys. 11.

Interesującym uzupełnieniem omówionych powyżej wyników jest rezultat przedstawiony na rys. 12. Na rysunku tym zestawione są wyniki testów trójosiowego ściskania piaskowca „Tułmin” dla próbek w stanie powietrznie-suchym (krzywa oznaczona ps), nasączonych naftą (nf) oraz nasączonych wodą ( $H_2O$ ). Zakres stosowanych ciśnień okólnych był w tym przypadku znacznie mniejszy niż w omawianych wyżej badaniach i wynosił  $0 \leq \sigma_3 \leq 100$  MPa. W trakcie tych badań urządzenie GTA-10 nie było jeszcze wyposażone w układ stabilizacji prędkości przesuwu tłoka. Po kazane na rys. 12 krzywe potwierdzają, iż dla ciśnień okólnych  $0 \leq \sigma_3 \leq 100$  MPa nasączenie naftą nie wpływa na wartość różnicowej granicy wytrzymałości.



Rys. 12. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości próbki a ciśnieniem okólnym; piaskowiec „Tułmin” (Gustkiewicz i in., 2003)

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania dowiodły, że układ stabilizacji prędkości przesuwu tłoka, w który wyposażono urządzenie GTA-10, działa poprawnie i pozwala na prowadzenie eksperymentów z prędkościami od  $1 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$  do  $100 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ . Ustalono, że prędkości te są dla obecnej konfiguracji stanowiska badawczego prędkościami granicznymi – odpowiednio: minimalną i maksymalną – co zostało wyjaśnione i skomentowane rozdz. 3 niniejszego opracowania. Opisane w rozdz. 4.1 wyniki badania zależności między różnicową granicą wytrzymałości próbki a prędkością przesuwu tłoka prasy potwierdzają stabilną pracę testowanego układu.

Analiza różnic w zachowaniu próbek powietrznie-suchych oraz nasączonych naftą pokazała, że w przypadku próbek nasączonych naftą, dla ciśnień okólnych wyższych niż ciśnienie zamykania spękań, różnicowa granica wytrzymałości ma wartości znacząco niższe niż dla próbek w stanie powietrznie suchym, przy czym różnica ta rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego. Autorzy uznali, iż ten spadek wartości  $^R\sigma_1 - \sigma_3$  wiązać należy z faktem powstania w przestrzeni porowej skały tzw. indukowanego ciśnienia porowego  $p_{p,ind}$ , oraz zaproponowali (rozdz. 5) metodę wyznaczania wartości  $p_{p,ind}$  w oparciu o znane prawo ciśnienia efektywnego Terzagiego.

Znajomość wartości  $p_{p,ind}$  dla odpowiednich wartości  $\sigma_3$  pozwoliła wyznaczyć wartości tzw. współczynnika Skemptona dla poszczególnych poziomów ciśnienia okólnego. Odpowiednie liczby zestawiono w tab. 3 i 4. Wynika z nich, że dla ciśnień okólnych spełniających warunek

$$125 \text{ MPa} < \sigma_3 \leq 350 \text{ MPa} \quad (5)$$

współczynniki Skemptona dla prędkości przesuwu tłoka „niskiej” i „wysokiej” spełniają warunki odpowiednio:

$$0 < B \leq 0,37 \quad (6a)$$

$$0 < B \leq 0,33 \quad (6b)$$

Dla porównania należy stwierdzić, że wspomniani już Fabre i Gustkiewicz (1997) podają, iż pomierzona przez nich dla piaskowców wartość współczynnika Skemptona wahała się między 0,25 a 0,46, co dość dobrze zgadza się z pokazanymi w rozdz. 5 niniejszej pracy wynikami.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

- Fabre D., Gustkiewicz J., 1997: *Poroelastic Properties of Limestones and Sandstones under Hydrostatic Conditions*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34, No. 1, pp. 122-134.
- Gustkiewicz J., 1989: *Synoptic view of mechanical behaviour of rocks under triaxial compression*, in: Rock at Great Dept, V. Maury & D. Fourmaintraux (eds.), Vol. 1, pp. 3-10, Balkema, Rotterdam.
- Gustkiewicz J., 1990: *Deformacje i wytrzymałość skał w trójosiowym stanie naprężenia z uwzględnieniem płynów porowych*, w: „Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe”, praca zbiorowa, J. Litwiniszyn (red.), Wyd. AGH, Kraków, t. I, s. 97-136.
- Gustkiewicz J., 2000: *Zbadanie stanu deformacji wybranych skał na granicy wytrzymałości w trójosiowym stanie naprężenia*, w: Wpływ naprężeń, ciśnienia porowego oraz sorpcji płynów na deformacje i pękanie skał. Sprawozdanie z działalności statutowej Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN za rok 2000 (niepubl.).
- Gustkiewicz J., Nowakowski A., Lizak Z., 2003: *Zmiany niektórych właściwości mechanicznych piaskowca pod wpływem sorbujących i niesorbujących płynów porowych pod ciśnieniem*, Prace IMG PAN, t. 5, nr 3-4, s. 367-375.
- Gustkiewicz J., Nowakowski A., 2004: *Deformacje i pękanie skał w warunkach laboratoryjnych*. Arch. Min. Sci., t. 49, Special Issue, s. 9-50.
- Gustkiewicz J., Nowakowski A., Nurkowski J., Stanisławski L., Lizak Z., 2004: *Kształtowanie się ciśnienia efektywnego w klasycznym, trójosiowym stanie naprężenia, na podstawie wyników pękania i deformacji wybranych skał*. Prace IMG PAN, t. VI, s. 3-17.
- Jaeger, J., C., Cook, N., G., W., Zimmerman, R., W., 2007: *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4<sup>th</sup> Edition, Blackwell Publishing, USA-UK-Australia, 475 p.

- Kanciruk A., 2009: *Urządzenia do pomiarów wielkości mechanicznych i temperatury przy użyciu przetworników rezystancyjnych i przykłady ich zastosowania*. Inst. Mech. Górotworu PAN, Kraków, 165 s.
- Kwaśniewski M., 1986: *Wpływ stanu naprężenia, temperatury i prędkości odkształcania na mechaniczne właściwości skał*. Arch. Górn., t. 31, z. 2, s. 383-415.
- Nowakowski A., Młynarczuk M., Ratajczak T., Gustkiewicz J., 2003: *Wpływ warunków termicznych na zmianę niektórych właściwości fizycznych i strukturalnych wybranych skał*, Prace IMG PAN. Rozprawy, Monografie, nr 5, 104 s.
- Skempton A., W., 1954: *The pore pressure coefficients A and B*, Géotechnique, Vol. 4, pp. 143-147.
- Terzaghi, von, K., 1923: *Die Berechnung der Durchlässigkeit des Tonen aus dem Verlauf der Spannungs-erscheinungen*. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien Math.-Naturwiss. Kl., Abt. 2A, 132, 105.
- Vutukuri V., S., Lama R., D., Saluja S., S., 1974: *Handbook on Mechanical Properties of Rocks – Testing Techniques and Results – Volume I*, Trans Tech Publications, Claustahl, Germany, 280 p.
- Walsh J., B., 1965: *The Effect of Cracks on the Compressibility of Rock*, J. Geoph. Res., Vol. 70.
- Walsh J., B., Grosenbaugh M., A., 1979: *A New Model for Analyzing the Effect of Fractures on Compressibility*, J. Geoph. Res., Vol. 84, No. B7, pp. 3532-3536.

### **The impact of crosshead speed on the values of selected material constants obtained in the course of the conventional triaxial compression test**

#### **Abstract**

The article discusses the results of the four series of triaxial tests performed on an upgraded GTA-10 device. The subject of the analysis were samples of the "Tumlin" sandstone, both in air-dry condition and fully saturated with kerosene. The tests were performed for two velocities of piston slide: the "high" one, i.e.  $100 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ , and the "low" one, i.e.  $1 \mu\text{m} \times \text{s}^{-1}$ . Proper functioning of the developed speed stabilization system was confirmed; a precise speed range necessary for the proper functioning of the system was established; finally, the influence of the quality of particular elements of the system upon its functioning was examined.

The obtained results confirmed an increase of differential stress limit  $^R\sigma_1 - \sigma_3$ , coupled with an increase in crosshead speed. Comparison of the results obtained for air-dry samples and samples saturated with kerosene revealed significant decreases of  $^R\sigma_1 - \sigma_3$  for the kerosene-saturated samples, as well as decreases in confining pressures greater than the crack closing pressure. The application of the Terzaghi effective stress principle made it possible to estimate the values of the pore pressures induced in the sample by means of the confining pressure. These values were subsequently used in calculating the co-called Skempton coefficient  $B$ .

**Keywords:** triaxial compression, stabilizing deformation speed, PID controller, differential stress limit, pore fluid, confining pressure, crack closing pressure, pore pressure, Skempton coefficient