

Robert Klisowski*, Andrzej Szumiński*

CZYNNIK SPRĘŻENIA ZWROTNEGO SYSTEMU STEROWANIA MASZYNĄ WYTRZYMAŁOŚCIOWĄ A WYNIKI BADAŃ CHARAKTERYSTYK POZNISZCZENIOWYCH PRÓBEK BETONU

1. Wprowadzenie

W kontroli procesu obciążania próbki w serwohydraulicznych maszynach wytrzymałościowych z zamkniętą pętlą regulacji (tzw. *closed-loop control*) każda z mierzonych za pomocą odpowiedniego przetwornika wielkości może zostać użyta jako sygnał sprzężenia zwrotnego. Kontroler cyfrowy, porównując sygnał sprzężenia zwrotnego z wartością zadaną, określa wartość błędu — tzw. uchyb, który po przetworzeniu przez regulator PID służy do sterowania serwozaworem kontrolującym ruch tłoka maszyny w taki sposób, aby w efekcie zredukować błąd do minimum.

Maszyny tego typu umożliwiają realizację praktycznie dowolnego schematu obciążania próbki, zapewniając równocześnie dużą sztywność globalną i szybką reakcję układu hydraulicznego. Dzięki temu możliwe jest tworzenie własnych procedur badawczych poprzez łączenie różnych trybów sterowania oraz dokonywanie zmian parametrów w trakcie realizacji testu.

W badaniach pozniszczeniowych dobór czynnika sprzężenia zwrotnego i w konsekwencji sposobu sterowania maszyną jest szczególnie istotny, gdyż błędy popełnione w tym zakresie mogą prowadzić do uzyskiwania błędnych wyników, a niejednokrotnie wręcz uniemożliwić prawidłowe wykonanie badań.

Badania laboratoryjne próbek betonu przeprowadzone przy zastosowaniu różnych sposobów sterowania pracą maszyny wytrzymałościowej pozwoliły określić wpływ czynnika sprzężenia zwrotnego zastosowanego do kontroli procesu obciążania próbki na uzyskane parametry pozniszczeniowe badanych próbek.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

2. Sposoby sterowania pracą maszyny wytrzymałościowej

W klasycznych maszynach wytrzymałościowych obciążenie próbki realizuje się najczęściej według dwóch schematów wynikających z cech konstrukcyjnych maszyny:

- 1) statycznego systemu sterowania (sterowanie siłą),
- 2) kinematycznego systemu sterowania (sterowanie przemieszczeniem płyt maszyny).

W maszynach serwohydraulicznych proces obciążania próbki zależy głównie od przyjętego czynnika sprzężenia zwrotnego i najczęściej jest realizowany według przedstawionych poniżej sposobów [1, 2].

2.1. Sterowanie prędkością przyrostu siły osiowej

Sygnal sprzężenia zwrotnego w tym trybie sterowania pracą maszyny pochodzi z przetwornika siły (dynamometru) umieszczonego w siłowniku maszyny lub bezpośrednio przy próbce. W przybliżeniu odpowiada to schematowi obciążania w klasycznej maszynie ze sterowaniem statycznym. Kontrola procesu obciążania w tym trybie możliwa jest jedynie do wartości obciążenia krytycznego. Po osiągnięciu siły niszczącej następuje niekontrolowane zniszczenie próbki podobne do zniszczenia w konwencjonalnej maszynie miękkiej. Taki tryb sterowania może być w pełni przydatny do badań w zakresie sprężystym, lecz nie daje żadnego obrazu zachowania się materiału w części pokrytycznej.

2.2. Sterowanie prędkością podłużnego odkształcenia próbki

W tym trybie sterowania sygnałem sprzężenia zwrotnego jest wynik pomiaru przemieszczeń osiowych próbki pochodzący z zewnętrznego ekstensometru zamontowanego na próbce. Najczęściej badanie przeprowadza się przy stałej prędkości odkształceń osiowych badanej próbki. W przypadku, gdy sygnał sprzężenia zwrotnego pochodzi z wewnętrznego przetwornika mierzącego przemieszczenie tłoka maszyny, obciążanie próbki przebiega podobnie jak w klasycznej maszynie ze sterowaniem kinematycznym. Omówiony sposób sterowania pozwala na kontrolę procesu niszczenia materiałów klasy I (według klasyfikacji zaproponowanej przez Wawersika [3]).

2.3. Sterowanie prędkością obwodowego odkształcenia próbki

Taki tryb sterowania zachodzi wówczas, gdy do kontroli procesu obciążania służy sygnał sprzężenia zwrotnego pochodzący z przetwornika przemieszczeń obwodowych umocowanego na badanej próbce. Po przekroczeniu obciążenia niszczącego gwałtowny rozwój spękań jest powstrzymywany przez zwolnienie ruchu tłoka, jego zatrzymanie lub cofnięcie i odciążenie tak, aby zachować zadaną wartość zmian odkształceń obwodowych. W tym trybie sterowania możliwa jest pełna kontrola przebiegu niszczenia materiałów zarówno klasy I, jak i II według Wawersika.

W serwohydraulicznych maszynach wytrzymałościowych do kontroli procesu obciążania można również wykorzystać czynnik sprzężenia zwrotnego, będący dowolną kombinacją sygnałów pochodzących z kilku różnych urządzeń pomiarowych. Badania charakterystyk pozniszczeniowych wykonywano również metodą, w której jako sygnał sterujący zastosowano kombinację liniową naprężeń i odkształceń próbki [4].

3. Badania laboratoryjne

Badania pozniszczeniowych charakterystyk próbek przeprowadzono w laboratorium Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH na stanowisku wyposażonym w sztywną maszynę wytrzymałościową MTS-815. Ponieważ obowiązująca obecnie metodyka określania własności mechanicznych betonu nie obejmuje badań pozniszczeniowych [5], zarówno parametry procedur badawczych, jak i parametry badanych próbek przyjmowano zgodnie z zaleceniami ISRM dotyczącymi badań własności pozniszczeniowych skał [6].

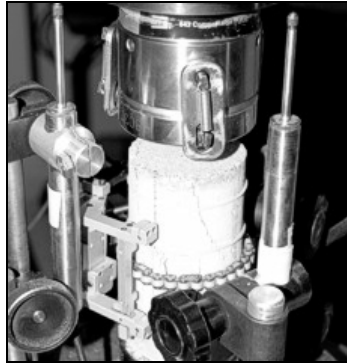
Badania przeprowadzono na próbkach w kształcie walców o wysokości $h = 110$ mm i średnicy $d = 55$ mm, wykonanych z zaprawy przygotowanej zgodnie z polską normą PN-B-19701, z wykorzystaniem cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R, piaseku normowego i wody, przy stosunku wody do cementu wynoszącym 0,5.

Badania laboratoryjne przeprowadzono przy zastosowaniu trzech sposobów sterowania pracą maszyny wytrzymałościowej zależnych od wybranego sygnału sprzężenia zwrotnego:

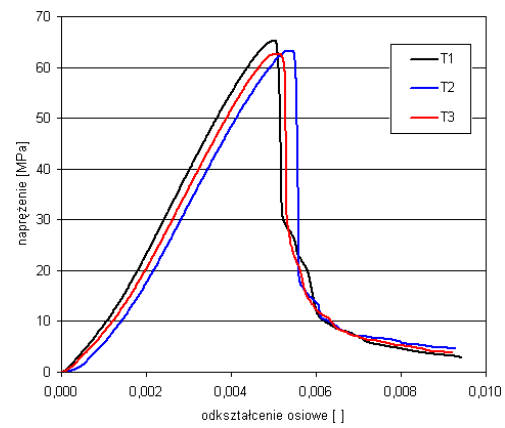
- 1) Sygnał sterujący pochodził z wewnętrznego przetwornika przemieszczeń umieszczonego w zespole siłownika hydraulicznego maszyny. W trakcie badania utrzymywano stałą prędkość przemieszczeń tłoka maszyny wynoszącą 0,66 mm/min., co odpowiadało prędkości osiowych odkształceń próbki $d\varepsilon/dt = 10^{-4}$ [s⁻¹]. Badaniom poddano trzy próbki oznaczone jako T1, T2 i T3.
- 2) Sygnał sprzężenia zwrotnego pochodził z zewnętrznego przetwornika przemieszczeń umieszczonego między płytami maszyny. Badane tym sposobem próbki Z1, Z2 i Z3 obciążano z prędkością odkształceń osiowych wynoszącą 10^{-4} [s⁻¹].
- 3) Sygnałem sterującym był wynik pomiaru przemieszczeń obwodowych próbki z ekstensometru obwodowego zainstalowanego na próbce. Badania prowadzono ze stałą prędkością odkształceń obwodowych wynoszącą $5,5 \cdot 10^{-5}$ [s⁻¹]. Tym sposobem zbadano próbki oznaczone jako O1, O2 i O3.

Widok badanej próbki umieszczonej w maszynie wytrzymałościowej MTS wraz z zespołem przetworników pomiarowych przedstawiono na rysunku 1.

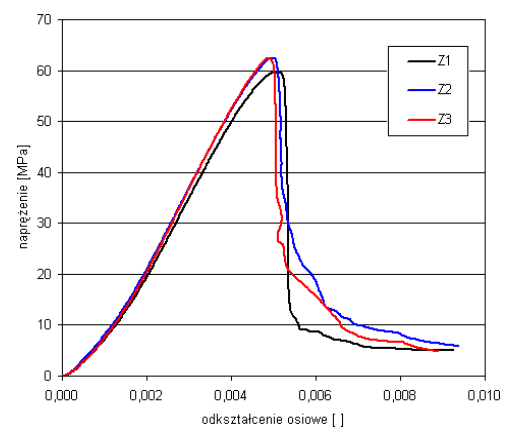
W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań sporządzono pełne charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe próbek (rys. 2–4) oraz wyznaczono wartości modułów sprężystości E i modułów pozniszczeniowych M badanego materiału.



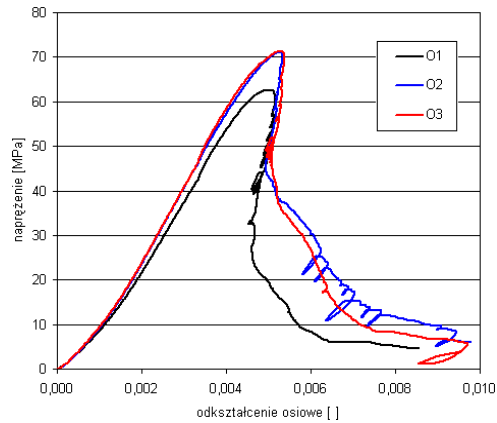
Rys. 1. Próbką z ekstensometrami pomiarowymi



Rys. 2. Charakterystyka próbek T1–T3 — sterowanie prędkością przemieszczeń tłoka maszyny



Rys. 3. Charakterystyka próbek Z1–Z3 — sterowanie prędkością przemieszczeń osiowych próbki



Rys. 4. Charakterystyka próbek O1–O3 — sterowanie prędkością przemieszczeń obwodowych próbki

Moduł sprężystości (tzw. sieczny) wyznaczano w oparciu o przedniszczeniową część charakterystyki w przedziale naprężeń wynoszącym $0,3 \div 0,8$ wytrzymałości doraźnej na ściskanie R_c . Moduł pozniszczeniowy obliczano jako średnią wartość tangensa kąta nachylenia pozniszczeniowej charakterystyki w przedziale naprężeń od $0,9$ do $0,5 R_c$. Określając wartości modułu pozniszczeniowego M , przyjęto, że dodatnia wartość tego parametru wskazuje, że materiał zachowuje się według klasy I, zaś wartość ujemna świadczy o zachowaniu się materiału według klasy II (zgodnie z klasyfikacją Wawersika).

Wyznaczone parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe zamieszczono w tabeli 1.

TABELA 1

Zestawienie wyników badań własności mechanicznych próbek

Oznaczenie próbki	Rodzaj sygnału sterującego	R_c , MPa		E , GPa		M , GPa	
		próbki	średnia	próbki	średnia	próbki	średnia
T1	przemieszczenie tłoka maszyny	65,5	63,6	15,7	15,3	203,8	224,2
T2		63,4		14,9		197,8	
T3		61,9		15,3		271,0	
Z1	przemieszczenie osiowe próbki	59,8	61,6	14,9	15,4	199,8	183,4
Z2		62,5		15,5		192,3	
Z3		62,5		15,8		158,0	
O1	przemieszczenie obwodowe próbki	62,7	68,4	15,7	16,3	-37,0	-47,3
O2		71,1		16,5		-59,8	
O3		71,3		16,8		-45,2	

Analiza wyników badań wskazuje, że wybór sygnału sprzężenia zwrotnego sterującego pracą maszyny może wywierać znaczący wpływ na uzyskane rezultaty badań pozniszczeniowych.

W sytuacji, gdy sterowanie maszyną odbywało się ze stałą prędkością przemieszczenia tłoka (rys. 2) lub ze stałą prędkością przemieszczeń osiowych próbki (rys. 3), moduły pozniszczeniowe próbek osiągały bardzo wysokie, ale zbliżone do siebie wartości, a pozniszczeniowa część charakterystyki materiału odznaczała się znacznym nachyleniem, odpowiadając jednak zachowaniu się niszczonego materiału według klasy I. Należy jednak nadmienić, że zbyt mała sztywność elementów układu pomiarowego (zwłaszcza zewnętrznego przetwornika siły), a także niedokładność doboru parametrów wzmacnicza PID, może prowadzić do rozbieżności rezultatów uzyskanych przy tych sposobach sterowania maszyną.

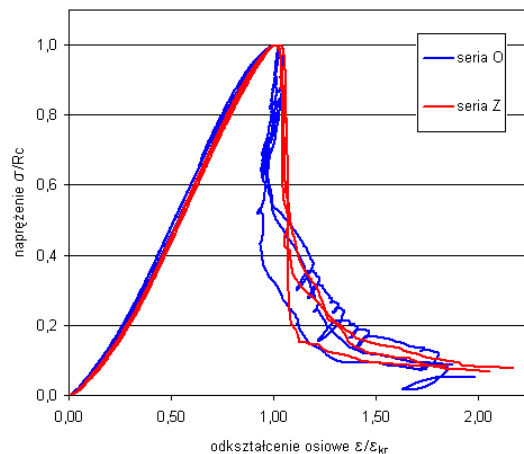
Przy sterowaniu stałą prędkością przemieszczeń obwodowych (rys. 4) uzyskane wyniki wskazują zarówno na ilościową, jak i jakościową zmianę zachowania się badanego materiału. Pokrytyczna część charakterystyki wyraźnie wskazuje, że próbki badane w tym trybie sterowania zachowują się jak materiał klasy II. Ten przykład pokazuje, że jeśli uzyskana charakterystyka pozniszczeniowa materiału przebiega w pobliżu granicy klas, a badania wykonywano przy sterowaniu przemieszczeniem osiowym próbki, wówczas bardziej miarodajnym jest wynik eksperymentu, w którym sygnałem sterującym będzie wynik pomiaru przemieszczeń obwodowych próbki. Fakt ten jest niezmiernie ważny, bo pokazuje, że wybór sygnału sprzężenia zwrotnego sterującego pracą maszyny stwarza możliwość błędnego zakwalifikowania badanego materiału do odpowiedniej klasy zachowania pokrytycznego.

4. Podsumowanie

Badania własności pozniszczeniowych materiałów prowadzone są od lat 60. XX wieku [3]. Nieliczne ośrodki naukowo-badawcze w kraju dysponują aparaturą, która pozwala prowadzić tego typu badania. Z reguły jest to aparatura różna zarówno z punktu widzenia konstrukcji czy systemu sterowania, jak i ze względu na możliwość do stosowania metodykę badań. Problemy te, a także nieujednolicona metodyka badań mogą być przyczyną błędów, a już z pewnością uniemożliwiają porównywanie wyników badań uzyskanych na różnych stanowiskach.

Jednym z ważniejszych problemów w badaniach pozniszczeniowych jest dobór czynnika sprzężenia zwrotnego, a w konsekwencji sposobu sterowania pracą maszyny w trakcie badania próbek. Jest to szczególnie ważne, gdyż błędy popełnione w tym zakresie mogą prowadzić do uzyskiwania błędnych wyników, a niejednokrotnie wręcz uniemożliwić prawidłowe wykonanie eksperymentu.

Badania na próbkach z zaprawy cementowej wykazały, że uzyskiwane parametry pozniszczeniowe w zależności od zastosowanego sposobu sterowania pracą maszyny wytrzymałościowej mogą różnić się nie tylko ilościowo, lecz także jakościowo, wskazując na zachowanie się materiału według odrębnych klas pozniszczeniowej klasyfikacji Wawersika (rys. 5).



Rys. 5. Porównanie charakterystyk próbek przy sterowaniu prędkością przemieszczeń osiowych i obwodowych

Przypadek ten ukazuje jednak, że przebieg procesu niszczenia tego właśnie materiału przy sterowaniu przemieszczeniem osiowym bądź przemieszczeniem tłoka maszyny nie jest w pełni kontrolowany, więc za miarodajny wynik badań należy uznać ten, który pochodzi z eksperymentu przeprowadzonego przy sterowaniu maszyną sygnałem z przetwornika przemieszczeń obwodowych próbki i świadczy o zachowaniu się materiału według klasy II.

Wyniki badań laboratoryjnych są podstawą wielu prac o charakterze zarówno poznawczym i użytkowym, stąd też znaczenie sygnału sprzężenia zwrotnego zastosowanego do kontroli pracy maszyny w badaniach pozniszczeniowych należy rozpatrywać w dwóch aspektach:

- 1) obejmującym wpływ sposobu sterowania na możliwość przeprowadzenia eksperymentu i poprawność uzyskanych wyników badań;
- 2) pozwalającym w oparciu o znajomość parametrów zastosowanej metodyki badawczej na interpretację i porównywanie wyników uzyskanych na różnych stanowiskach badawczych.

Podsumowując, warto wspomnieć, że obowiązujące dotąd zalecenia w zakresie badań własności wytrzymałościowych i odkształceniowych betonu nie uwzględniają badań pozniszczeniowych, a preferowany sposób sterowania maszyną wytrzymałościową nie umożliwia kontroli procesu zniszczenia. Dlatego opisane badania próbek z zapraw cementowych przeprowadzone zostały w oparciu o metodykę zalecaną przez ISRM dla badań własności pozniszczeniowych skał.

LITERATURA

- [1] *Flisiak D., Klisowski R., Szumiński A.*: Metodyka badań a uzyskiwane charakterystyki pozniszczeniowe — uwagi o potrzebie standaryzacji, XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Kraków 2002

- [2] *Flisiak D., Klisowski R., Szumiński A.*: Uwagi na temat sposobu prowadzenia testu jednoosiowego ściskania w serwosterowalnej maszynie wytrzymałościowej, XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Kraków 2002
- [3] *Wawersik W.R.*: Detailed analysis of rock failure in laboratory compression tests. Ph. D. Thesis, Univ. Minnesota, Minneapolis 1968
- [4] *Okubo S., Nishimatsu Y.*: Uniaxial Compression Testing Using a Linear Combination of Stress and Strain as the Control Variable; *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 22, No. 5, Pergamon Press, 1985, 323–330
- [5] Instrukcja ITB nr 194: Badanie cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach. Warszawa, ITB 1998
- [6] *Fairhurst C.E., Hudson J.A.*: Draft ISRM suggested methods for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36 (1999), Pergamon Press, 1999, 279–289