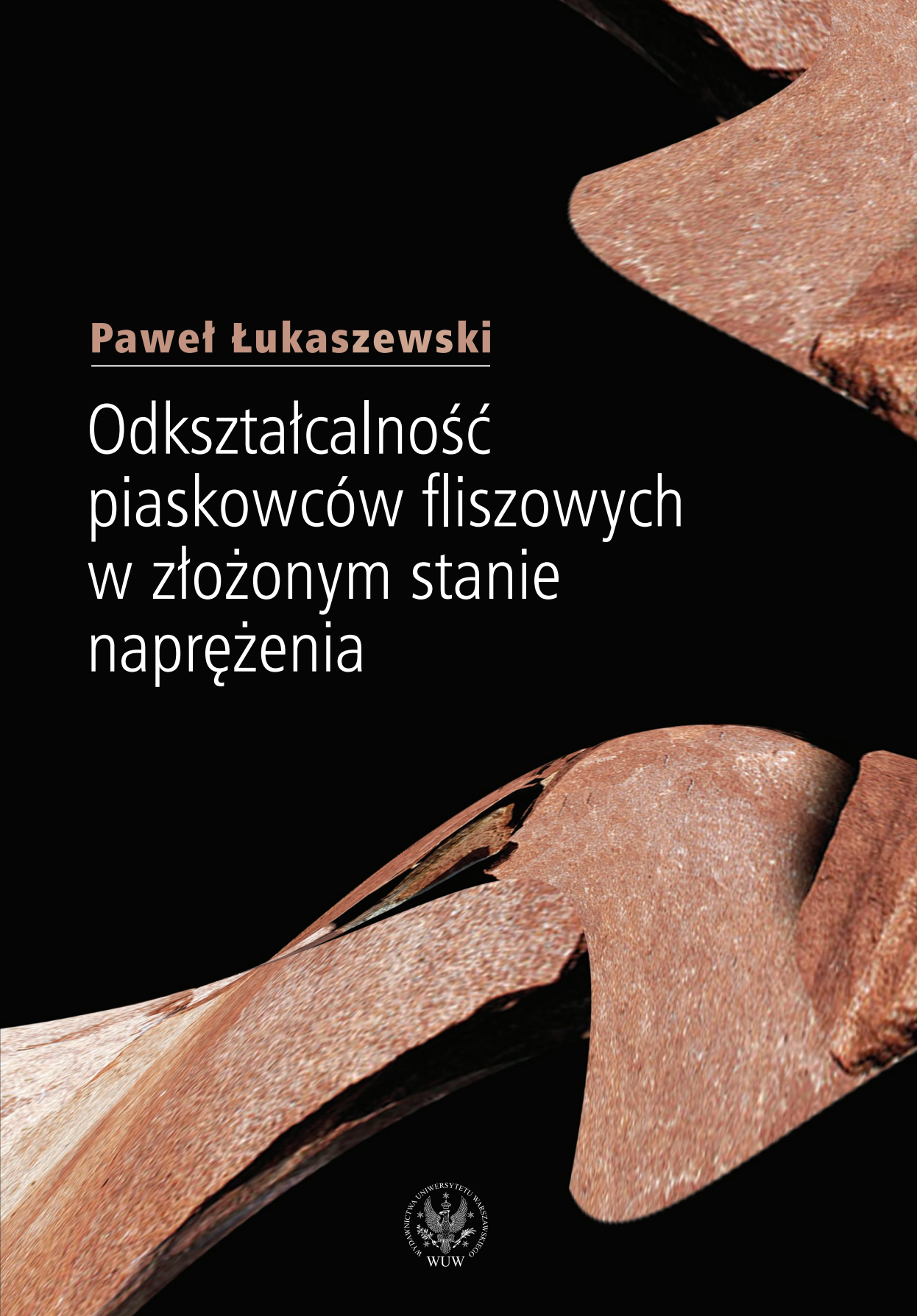




Paweł Łukaszewski

Odkształcalność piaskowców fliszowych w złożonym stanie naprężenia

Odkształcalność piaskowców fliszowych
w złożonym stanie naprężenia

Paweł Łukaszewski

Odkształcalność piaskowców fliszowych w złożonym stanie naprężenia



Recenzenci

*dr hab. Mirosława Bukowska, prof. Głównego Instytutu Górnictwa,
dr hab. Dariusz Łydźba, prof. Politechniki Wrocławskiej*

Redaktor prowadzący

Małgorzata Yamazaki

Redakcja i korekta

Barbara Nowak

Redakcja techniczna

Zofia Kosińska

Projekt okładki

Katarzyna Jarnuszkiewicz

Skład i łamanie

Logoscript

Publikacja dofinansowana przez Wydział Geologii i Rektora Uniwersytetu Warszawskiego

© Copyright by Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2013

ISBN 978-83-235-1160-1

ISBN 978-83-235-1976-8 PDF

Wydanie I

Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego

00-497 Warszawa, ul. Nowy Świat 4

<http://www.wuw.pl>; e-mail: wuw@uw.edu.pl

Dział Handlowy: tel. 22 55 31 333

e-mail: dz.handlowy@uw.edu.pl

Księgarnia Internetowa: <http://www.wuw.pl/ksiegarnia>

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	7
2. Historia badań oraz aktualny stan wiedzy	12
2.1. Historia badań oraz aktualny stan wiedzy o badaniach wytrzymałościowych w warunkach jednoosiowego i trójosiowego ściskania.	12
2.2. Właściwości fizykomechaniczne skał fliszu karpackiego w świetle danych archiwalnych	37
3. Ogólna charakterystyka badanego materiału skalnego	43
3.1. Ogólna charakterystyka geologiczno-facjalna Karpat fliszowych	43
3.2. Wybór odsłonień do poboru materiału skalnego do badań	44
3.3. Charakterystyka strukturalna badanego materiału skalnego	45
3.4. Zróżnicowanie frakcjonalne badanych skał.	51
3.5. Analiza stopnia zwięzłości skał	56
3.6. Wydzielenie typów badawczych.	58
4. Charakterystyka właściwości identyfikacyjnych skał fliszu karpackiego	61
4.1. Charakterystyka wybranych właściwości fizycznych piaskowców fliszowych	61
4.2. Charakterystyka dynamicznych współczynników sprężystości piaskowców fliszowych.	63
5. Proces deformacji piaskowców fliszowych w warunkach jednoosiowego ściskania	74
5.1. Metodyka badań	74
5.2. Naprężeniowa i odkształceniowa charakterystyka piaskowców fliszowych	77
6. Badania wytrzymałościowe w trójosiowym stanie naprężenia	93
6.1. Stanowisko badawcze do badań wytrzymałościowych w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania.	93

6.2. Zastosowane metody badawcze	95
6.3. Ogólna charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa w zakresie ciśnień okólnych do 90 MPa	102
7. Analiza wyników badań	119
7.1. Analiza technik badawczych	119
7.2. Analiza zróżnicowania strukturalnego piaskowców fliszowych	127
7.3. Analiza anizotropii wytrzymałości i odkształcalności piaskowców fliszowych	138
8. Analiza procesu deformacji piaskowców fliszowych w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania	147
8.1. Wpływ ciśnienia okólnego na deformację piaskowców fliszowych.	147
8.2. Wpływ zróżnicowania strukturalnego (frakcjonalnego) na proces deformacji piaskowców fliszowych	160
8.3. Wpływ chropowatości powierzchni zniszczenia na proces deformacji piaskowców fliszowych.	173
9. Obwiednie wytrzymałości skał fliszu karpackiego na tle kryteriów Coulomba–Mohra, Fairhursta oraz Hoeka–Browna	183
Podsumowanie.	200
Summary	206
Bibliografia	210

1. WPROWADZENIE

Postęp technologiczny ostatnich kilkudziesięciu lat, rozwój infrastruktury drogowej kraju oraz rosnące potrzeby energetyczne i konieczność magazynowania węglowodorów zwiększają zainteresowanie budownictwem podziemnym. Powstają projekty tuneli drogowych i kolejowych, na cele magazynowe adaptuje się podziemne wyrobiska i szyby, a także buduje się podziemne zbiorniki do składowania i/lub magazynowania ropy naftowej oraz gazu ziemnego. Szacowane bogate zasoby niekonwencjonalnych złóż gazu spowodowały wzrost liczby głębokich wierceń, a potencjalna ich eksploatacja narzuca konieczność stosowania zabiegów udrażniających górotwór w postaci szczelinowania hydraulicznego. Współczesna geomechanika wymaga zatem dokonania charakterystyki procesu deformacji skał w złożonym stanie naprężenia, odwzorowującym warunki rzeczywiste w górotworze.

Zachowanie się skał podczas badań jednoosiowego ściskania jest dość dobrze rozpoznane, do czego znacząco przyczyniło się rozpowszechnienie pras o dużej sztywności, pozwalających rejestrować nie tylko przedkrytyczną, ale także i pokrytyczną ścieżkę deformacji. W warunkach trójosiowego ściskania, w złożonym stanie naprężenia, opis deformacji skał jest jednak ciągle niepełny i aby był wiarygodny, musi uwzględniać zarówno wysokie ciśnienie panujące na znacznych głębokościach, jak i zmieniającą się w skorupie ziemskiej temperaturę. Konieczne staje się zatem stosowanie w badaniach geomechanicznych komór trójosiowych (termociśnieniowych), dzięki którym jest możliwe modelowanie (w przybliżeniu) warunków panujących na różnych głębokościach.

Pierwsze testy wytrzymałościowo-odkształceniowe skał w podwyższonym ciśnieniu wykonywano już na początku XX w., jednak dopiero w latach 80. Międzynarodowe Towarzystwo Mechaniki Skał (ISRM) wydało zalecenia dotyczące badań w warunkach trójosiowego ściskania.

Literatura naukowa z tej dziedziny wskazuje, że w warunkach niskiego ciśnienia okólnego skały pękają krucho. Zjawisku temu towarzyszy wyzwolenie się energii sprężystej m.in. w postaci efektu akustycznego. Wzrost ciśnienia okólnego powoduje jednak, że po przekroczeniu charakterystycznego dla danej odmiany litologicznej poziomu skały zaczynają odkształcać się ciągliwie, nabierając zdolności do przenoszenia dużych odkształceń trwałych bez efektów kruchego pęknięcia. Wyznaczenie progu, przy którym skała przechodzi ze stanu kruchego w stan ciągliwy, jest jednym z aktualnych zadań geomechaniki.

Obserwowane w laboratorium w skali mikro zjawiska kruchego pęknięcia skał są odpowiednikiem zjawisk rzeczywistych – tektonicznych trzęsień ziemi, mających często tragiczne skutki w zaludnionych obszarach globu. Odkształcenia plastyczne (zachowanie ciągliwe) odpowiadają natomiast deformacjom ciągłym, np. fałdowym, przebiegającym w czasie i nie mającym gwałtownego, katastroficznego przebiegu. Poznanie mechanizmów zniszczenia skał jest więc bardzo istotnym problemem naukowym, nie tylko w zakresie geomechaniki, ale także ma znaczenie dla geologii strukturalnej, tektoniki i tektonofizyki.

Podstawą oceny geomechanicznej ośrodków skalnych są przede wszystkim klasyczne badania jednoosiowego ściskania, wykonywane powszechnie w laboratoriach na całym świecie. W zależności od możliwości technicznych, stopnia zaawansowania aparatury badawczej i złożoności procedur, badania te pozwalają w różnym stopniu scharakteryzować proces deformacji materiału skalnego w tzw. warunkach normalnych – przy ciśnieniu atmosferycznym i temperaturze pokojowej. Opis zachowania się skał w takich warunkach jest więc bardzo szeroki i wielowątkowy, obejmuje różne grupy litologiczne i często ma bardzo szczegółowy charakter.

Głównym celem naukowym tego opracowania jest jednak charakterystyka odkształcalności (deformacji) skał w złożonym stanie naprężenia, w warunkach osiowo-symetrycznego stanu naprężeń ściskających ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$).

Jako przedmiot badań geomechanicznych wybrano piaskowce fliszu karpackiego, które w swej stosunkowo niedawnej historii geologicznej były poddawane działaniu sił tektonicznych. Na obszarze ich występowania obecne są struktury geologiczne, zarówno nieciągłe – łuski, uskoki, powstałe na skutek pęknięcia kruchego, jak i struktury ciągłe – fałdy, tworzące się w wyniku długotrwałych odkształceń. Geneza skał fliszowych jest związana z dynamiką prądów zawieszonych transportujących zróżnicowany materiał klasyczny w głębokim, dość monotonnym zbiorniku morskim, w tym przypadku w okresie kredy i paleogenu. Pod wpływem ruchów tektonicznych w neogenie zostały one odklute od podłoża, podzielone na płaszczowiny i następnie przesunięte na odległość od kilkudziesięciu do kilkuset kilometrów na północ. Późniejsze procesy wietrzeniowe spowodowały, że sfałdowane, drobnoziarniste osady, takie jak mułowce i iłowce, są obecnie znane przede wszystkim z wierceń, a na powierzchni terenu odsłaniają się praktycznie tylko w oknach tektonicznych. Wyraźnie dominują tutaj

bardziej odporne na wietrzenie piaskowce, tworząc wyniesienia i pasma górskie. Są one eksploatowane i wykorzystywane jako surowce skalne na potrzeby budownictwa, drogownictwa i innych dziedzin gospodarki. W ścianach kamieniołomów odsłaniają się w stanie niezwiertzałym i właśnie dzięki ułatwionej dostępności tę grupę skał wybrano do badań.

Piaskowce fliszu karpackiego były wielokrotnie badane pod kątem ich właściwości fizyczno-mechanicznych, przede wszystkim jednak w warunkach jednoosiowego ściskania, zatem istnieje wiele opracowań na ten temat. W warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania analizy wytrzymałościowo-odkształceniowe tych skał były znacznie rzadziej wykonywane i tym samym liczba publikowanych materiałów, dotyczących zależności między naprężeniem a odkształceniem osiowym, obwodowym i objętościowym w złożonym stanie naprężenia, jest ograniczona.

Badania właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych skał regionu karpackiego w warunkach jednoosiowego ściskania, prowadzone w ramach dwóch projektów badawczych, zakończonych w 2003 r. pod kierunkiem autora i w 2004 r. pod kierunkiem Joanny Pinińskiej (2004) w Środowiskowym Laboratorium Badania Ośrodków Skalnych Zakładu Geomechaniki Uniwersytetu Warszawskiego, wykazały, że mimo znacznego podobieństwa mineralnego w poszczególnych odmianach litologicznych występują duże różnice w przebiegu „ścieżek” deformacji. Do charakterystyki tego procesu powszechnie stosowany system wydzieleni rodzajów skał, oparty tylko na analizie petrograficznej, nie jest wystarczający, podobnie jak kryterium nawiązujące jedynie do uziarnienia. Piaskowce fliszowe wykazują bowiem duże zróżnicowanie frakcyjne oraz słabe wysortowanie materiału.

Do badań prezentowanych w niniejszej pracy dobierano materiał skalny pod względem jego zmienności facjalnej i na tej podstawie lokalizowano miejsca pobierania próbek. Przyjęty następnie, jako zasadniczy, podział na trzy główne typy badawcze został ustalony na podstawie charakterystycznych cech skał fliszowych: stopnia diagenety, wielkości uziarnienia i składu mineralnego.

Charakterystykę odkształcalności piaskowców fliszowych przeprowadzono na podstawie własnych badań geomechanicznych:

- wstępnych badań identyfikacyjnych właściwości fizycznych oraz pomiarów prędkości fal ultradźwiękowych;
- badań wytrzymałościowych w jednoosiowym stanie naprężenia;
- badań wytrzymałościowych w trójosiowym stanie naprężenia;
- badań chropowatości powierzchni zniszczenia uzyskanych z badań wytrzymałościowych.

Badania cech fizycznych miały na celu przede wszystkim ustalenie gęstości objętościowej i porowatości całkowitej niezbędnej do wstępnej charakterystyki badanego materiału skalnego oraz weryfikacji przyjętego podziału litologicznego, czemu służyły również nieniszczące badania ultradźwiękowe. Ich wyniki stano-

wiły jednocześnie wstępną prognozę przebiegu deformacji (odkształcalności) piaskowców fliszowych pod obciążeniem. Zmiennie ukierunkowane pomiary umożliwiły także ustalenie stopnia anizotropii badanych ośrodków skalnych, zarówno na podstawie rejestrowanych zmian prędkości fali podłużnej i poprzecznej, jak również poprzez ustalone na ich podstawie dynamiczne stałe sprężystości.

Testy wytrzymałościowe w jednoosiowym stanie naprężeń stanowiły pierwszy wariant badań w złożonym stanie naprężenia, gdy ciśnienie okólne było równe zero ($p = 0$ MPa) i przeprowadzono je głównie dla celów porównawczych. Ich wyniki posłużyły także do wyznaczenia związków empirycznych w postaci zależności funkcyjnych między podstawowymi parametrami geomechanicznymi.

Zasadniczą charakterystykę wytrzymałościowo-odkształceniową analizowanych piaskowców fliszowych przeprowadzono na podstawie badań w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania, na podstawie których wyznaczono:

- maksymalne naprężenie różnicowe i progowe wartości naprężenia na progu liniowości odkształceń osiowych oraz na progu dylatacji właściwej;
- krytyczne odkształcenia osiowe, obwodowe i objętościowe;
- statyczne stałe sprężystości – moduł Younga i współczynnik Poissona;
- wielkość energii krytycznej (niezbędnej do zniszczenia) oraz energii dylatacji (niezbędnej do zainicjowania pęknięcia niestabilnego na progu dylatacji właściwej).

Obok charakterystyki wytrzymałościowo-odkształceniowej badanych skał, dużo miejsca poświęcono części metodycznej, mającej istotne znaczenie dla poprawności wykonywanych testów w trójosiowym stanie naprężenia i doboru odpowiedniego wariantu badawczego. Wykorzystując możliwości techniczne stosowanej aparatury, badania prowadzono trzema metodami, odmiennie w każdej z nich osiągając punkt krytyczny i doprowadzając do ostatecznego zniszczenia próbki. Wykonywano pojedyncze testy klasyczne przy niezmiennym ciśnieniu okólnym oraz testy wielokrotnego i ciągłego zniszczenia, zwiększając poziomy ciśnienia okólnego w trakcie badania. Wyniki wykonanych w ten sposób badań pozwoliły ustalić znaczenie wariantu badawczego dla różnicowania się deformacji badanych piaskowców fliszowych przy różnych ścieżkach obciążenia.

Stosując w badaniach zmienne poziomy ciśnienie okólnych, starano się ustalić wpływ wartości $\sigma_2 = \sigma_3 = p$ na przebieg procesu dylatacji. Analizowano zależności między odkształceniami osiowymi i obwodowymi (podłużnymi i poprzecznymi) a wywołującymi je zmianami naprężenia tak, aby możliwie dokładnie ustalić znaczenie wartości ciśnienia okólnego dla inicjacji i rozwoju spękań. W ocenie ilościowej wykorzystano również wyznaczoną wartość energii dylatacji odniesionej do energii krytycznej, a zdefiniowany i otrzymany w ten sposób nowy wskaźnik energetyczny kwantyfikuje zróżnicowanie litologiczne badanych skał.

Wskutek kruchej pęknięcia i zniszczenia próbki skalnej w testach trójosiowego ściskania powstaje jedna główna powierzchnia pęknięcia, wzdłuż której na-

stępuje wzajemne przemieszczanie się ścianek bocznych szczeliny. Istotnego znaczenia nabierają wówczas siły tarcia powierzchniowego, przeciwstawiające się dalszej dezintegracji skały. Wielkość tarcia zależy od kształtu, formy i morfologii powierzchni kontaktu, im jest ona bardziej „szorstka”, tym bardziej siła tarcia wzrasta.

Uzyskane w badaniach wytrzymałościowych powierzchnie ściana poddano ocenie chropowatości w profilometrze, uzyskując ich parametryczną charakterystykę. Ustalono w ten sposób wpływ ciśnienia okólnego na zmiany morfologii szczelin, a co za tym idzie, na wielkość sił tarcia przeciwstawiającego się zniszczeniu.

W przeprowadzonych badaniach odniesiono się także do naturalnej dla skał fliszu karpackiego anizotropii, rejestrowanej wcześniej w badaniach ultradźwiękowych, ściskając w maszynie wytrzymałościowej próbki różnie zorientowane względem cech strukturalno-teksturalnych. Głównym celem tych badań było wyznaczenie uprzywilejowanego kierunku, w którym wytrzymałość i odkształcalność przyjmuje wartości ekstremalne – minimalne i maksymalne. Do tego typu badań wybrano jeden z typów litologicznych o stwierdzonej wcześniej dużej anizotropii ultradźwiękowej.

Podsumowaniem wyników badań są obwiednie wytrzymałości obrazujące stan graniczny wytrzymałości. Uwzględniono w nich zróżnicowanie litologiczne materiału i zmienne warunki ciśnieniowe, a także stosowane w badaniach różne ścieżki obciążenia. Ustalone na podstawie obwiedni wartości kątów tarcia wewnętrzznego i spójności odniesiono do stałych materiałowych dla warunku eksperymentalnego według Coulomba–Mohra, Fairhursta oraz Hoeka–Brown.

2. HISTORIA BADAŃ ORAZ AKTUALNY STAN WIEDZY

2.1. Historia badań oraz aktualny stan wiedzy o badaniach wytrzymałościowych w warunkach jednoosiowego i trójosiowego ściskania

Wytrzymałość materiału jest jedną z podstawowych cech fizycznych określającą jego przydatność dla celów konstrukcyjnych. I choć początkowo wykorzystywano drewno i kamień, to jednak pierwsze systematyczne badania naukowe, stanowiące podstawę rozwoju mechaniki ośrodków ciągłych, wykonano dla stali. Na ich podstawie zdefiniowano zasadnicze pojęcia naprężenia i odkształcenia, rozwinęto teorię sprężystości i plastyczności. Zasadniczym badaniem w ocenie wytrzymałości stali jest wytrzymałość na rozciąganie.

Dynamiczny rozwój mechaniki gruntów nastąpił na początku XX w. Twórczo adaptowano wcześniejsze osiągnięcia, jednak podstawowe badania musiały być zmienione, gdyż dla gruntów podstawową cechą jest wytrzymałość na ściskanie. W połowie XX w. z kolei nastąpił rozwój badań, dla których zasadniczym badaniem jest wytrzymałość skał na ściskanie.

W ocenie wytrzymałości materiałów dominują dwie koncepcje, umownie nazywane mechaniczną i kinetyczną. Według koncepcji mechanicznej rozpad na części jest skutkiem utraty stabilności ciała stałego znajdującego się w polu naprężeń, a wzory na wytrzymałość materiałów są wyprowadzane z rozwiązań energetycznych. W koncepcji kinetycznej rozerwanie ciała następuje w czasie pod wpływem zmian termicznych i naprężeń mechanicznych, a trwałość ciała oblicza się na podstawie wzorów wiązań atomów, rozkładu istniejących defektów, włącznie z dyslokacjami.

Uwzględnienie struktury mikroskopowej skał zmieniło poglądy na przebieg procesu zniszczenia i spowodowało odejście od modeli statycznych do modeli,

w których nieustannie trwają drgania atomów i przemieszczenia dyslokacji krawędziowych oraz śrubowych. Śledzenie, rejestracja i ocena tych procesów są trudne i wymagają stosowania różnych, często bardzo złożonych technik badawczych.

Analizy teoretyczne są podstawą projektowania badań modelowych, laboratoryjnych oraz *in situ* i służą do interpretacji wyników. Badania modelowe służą ocenie jakościowej zjawisk dynamicznych, natomiast ilościowa charakterystyka naprężeń oraz weryfikacja obliczeń możliwa jest dopiero na podstawie rzeczywistych parametrów, uzyskanych z badań *in situ* i laboratoryjnych.

Metody laboratoryjne zmieniają się wraz z postępem wiedzy o budowie skorupy ziemskiej, aby coraz dokładniej odzwierciedlać warunki istniejące na dużych głębokościach. Coraz powszechniej rekonstruuje się rzeczywiste stany naprężeń na podstawie badań wytrzymałościowych w warunkach wysokich ciśnień i temperatury. Poprawna charakterystyka skał skorupy ziemskiej powinna uwzględniać jeszcze ich interakcję fizyczną i chemiczną, związaną z przepływem roztworów wodnych lub węglowodorów przez pory i szczeliny. Istotne znaczenie dla geomechanicznych badań laboratoryjnych ma również nienaruszony i nieodprężony stan materiału skalnego. Niezbędna jest synchronizacja laboratoryjnych prac badawczych z poborem rdzeni i monolitów, ich ochrona przed wpływem czynników zewnętrznych, możliwie szybkie ich udostępnienie oraz doświadczalne wyznaczenie wskaźników korekcyjnych, uwzględniających efekty odprężenia materiału i „efekt skali”.

Mechanika skał zajmuje się złożonym ośrodkiem i jest działem wiedzy inżynierskiej, która korzysta z teoretycznych rozwiązań mechaniki ciała stałego. Zrozumienie mechanicznych właściwości ośrodków skalnych wymaga zatem znajomości podstaw teorii sprężystości, plastyczności i kruchego pęknięcia. Mechanika ciała stałego makroskopowo charakteryzującego się w normalnych warunkach stabilnością kryształu, w budowie mikroskopowej obejmuje wiedzę o strukturze i właściwościach kryształów, których zewnętrzna symetria jest powiązana z mikroskopową symetrią położenia atomów. W strukturze mikroskopowej każdy atom wykonuje małe drgania wokół ustalonego położenia równowagi, co wymaga zastosowania matematycznych praw symetrii. Początkowo badano właściwości idealnych kryształów, ale w 2. połowie XX w. zaczęto badać niedoskonałości ich struktury i ich wpływ na właściwości fizyczne, m.in. wytrzymałość, która w istotny sposób zależy od dyslokacji, czyli nieregularności w rozmieszczeniu atomów.

W rozwiązaniach praktycznych do opisu zachowania się skał w warunkach obciążeń zewnętrznych korzysta się z elementów teorii sprężystości, teorii plastyczności oraz kruchego pęknięcia. Stosuje się więc pojęcia tensorów odkształcenia ε_{ij} oraz naprężeń σ_{ij} stosowane w teorii sprężystości, mierząc przemieszczenie punktu w stosunku do przyjętego układu odniesienia. Właściwości sprężyste ośrodka charakteryzują natomiast moduły sprężystości. Przy małych odkształceniach ciała sprężystego i przy założeniu, że odkształcenie zachodzi quasi-statycznie, składowe naprężenia i odkształcenia związane są sześcioma równaniami liniowymi, zgodnie z prawem Hooke’a:

$$\sigma_{ij} = A_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (2.1)$$

gdzie: σ_{ij} – tensor naprężenia, ε_{kl} – tensor odkształcenia, A_{ijkl} – tensor współczynników materiałowych.

Dla ogólnego przypadku anizotropii, liczba współczynników materiałowych wynosi 21, natomiast dla ośrodka jednorodnego, izotropowego redukuje się do 2. Najbardziej znane stałe materiałowe to: moduł Younga (E), moduł ścinania (G), moduł odkształcenia objętościowego (K) oraz współczynnik Poissona (ν).

Wyniki badań, jak i obserwacje terenowe, wskazują, że zachowanie się skał w pewnych warunkach nie może być w pełni wyjaśnione teorią sprężystości i bardziej odpowiednie jest zastosowanie teorii plastyczności. Zajmuje się ona określeniem rozkładu naprężeń i odkształceń w ośrodkach, którym w procesie deformacji towarzyszą trwałe odkształcenia. W teorii plastyczności ustala się związek między tensorem naprężenia a tensorem przyrostu odkształcenia lub tensorem prędkości odkształcenia plastycznego. Analizując zachowanie się skał pod obciążeniem, jest możliwe wyróżnienie części sprężystej i części plastycznej odkształcenia. Pełny zakres odkształcenia zawiera więc część sprężystą, związaną z naprężeniami zgodnie z prawem Hooke’a, i część plastyczną. Obserwowany stan naprężenia i stan odkształcenia zależą w znacznym stopniu od historii obciążania materiału, który wielokrotnie odciążany i ponownie obciążany wzmacnia się lub osłabia.

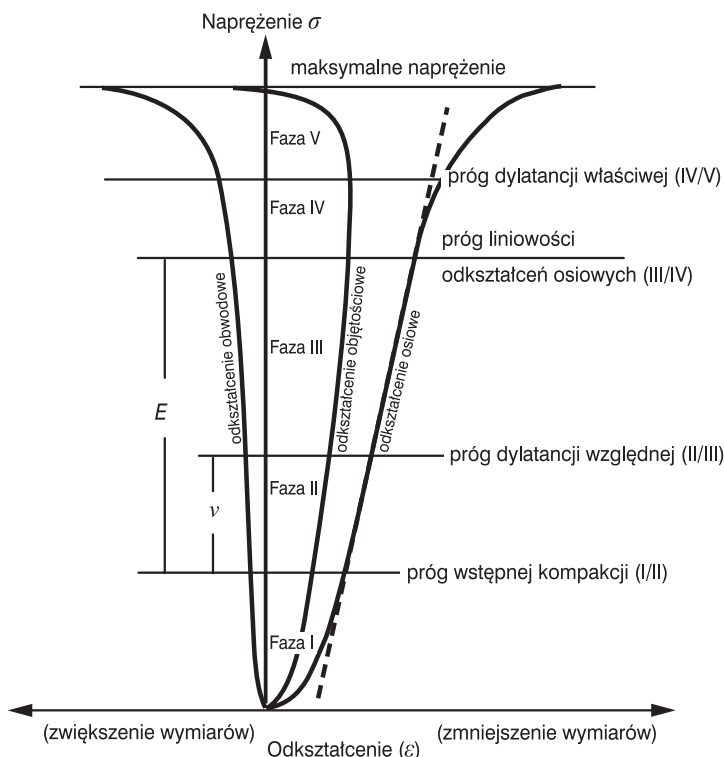
Fizyczny mechanizm plastyczności jest wyjaśniany nieodwracalną zmianą położenia atomów, wynikającą z rozrywania niektórych wiązań międzyatomowych i powstawania nowych. Proces ten zachodzi najszybciej w pobliżu istniejących defektów struktury lub w miejscach osłabionych powstaniem dużych naprężeń lokalnych, czego efektem jest pękanie i kruszenie materiału w wyniku rozwoju i łączenia się mikrospeków.

Skały, jako ośrodek rzeczywisty, zawierają defekty, w których dochodzi do koncentracji naprężeń. Mogą to być spękania, szczeliny, pory, ale także styki międzyziarnowe czy dyslokacje krystalograficzne. W miejscach tych może rozpoczynać się proces zniszczenia. Według kryterium Griffitha szczelina zacznie się rozprzestrzeniać, jeśli prędkość wyzwala energii sprężystej przekracza wartość przyrostu energii powierzchniowej. Przy odpowiednim zorientowaniu szczeliny na jej końcach koncentrują się naprężenia rozciągające o znacznych wartościach. Jeśli ich wartość przekroczy wytrzymałość materiału na rozciąganie, rozpoczyna się pękanie prostopadle do kierunku działania naprężenia rozciągającego.

W latach 50. XX w. zmodyfikowano kryterium Griffitha przez uwzględnienie strefy odkształceń plastycznych wokół szczeliny dla pękania quasi-kruchego. Z wpływem lat podejście dedukcyjne, polegające na przechodzeniu od zjawisk ogólnych, teoretycznych, do szczegółowych doświadczeń zostało zastąpione podejściem odwrotnym, indukcyjnym, od zjawisk szczegółowych – doświadczeń do ogólnych – teoretycznych. Wzrosło znaczenie badań doświadczalnych wyko-

nywanych w laboratorium, dzięki którym najpierw poznaje się przyczynę procesu, a dopiero później jego skutek.

Pierwsze, eksperymentalne badania, w których stopniowe zniszczenie struktury materiału skalnego obserwowano na podstawie analizy mikroskopowej próbek skalnych, wykonanej dla różnych punktów charakterystyki naprężenie-odkształcenie, przedstawili Brace i in. (1966), Bieniawski (1967a, b), Hallbauer i in. (1973) oraz Tapponier i Brace (1976). Wyróżnili oni w procesie deformacji skał na krzywej naprężenie-odkształcenie pięć faz, które odpowiadają kolejnym etapom procesu pękania (rys. 2.1):



Rys. 2.1. Wyidealizowane charakterystyki odkształcenia się skał przy ściskaniu (na podstawie: Kwaśniewski, 1986a, 1992)

- **faza I** – nieliniowego odkształcania skały, w której następuje zamykanie się pierwotnych szczelin i mikrodefektów; odkształcenie skały jest tylko częściowo odwracalne;
- **faza II** – pełnego liniowego odkształcania się skały;
- **faza III** – liniowości charakterystyki odkształcenia osiowego i nieliniowości odkształceń obwodowych i objętościowych, świadcząca o inicjacji mikropęknięcia; w fazie tej rozpoczyna się stabilna propagacja szczelin i pojawia się efekt dylatacji;

- **faza IV** – nieliniowości wszystkich charakterystyk odkształcenia, świadcząca o zaawansowanym procesie stabilnej propagacji mikroszczelin;
- **faza V** – nieliniowości wszystkich charakterystyk naprężenie–odkształcenie i znacznego wzrostu objętości próbki; następuje niestabilna propagacja spękań, co prowadzi do zniszczenia struktury skały, a naprężenie osiąga wartości maksymalne.

Poszczególne fazy odkształceń wyznaczają graniczne, progowe wielkości naprężeń:

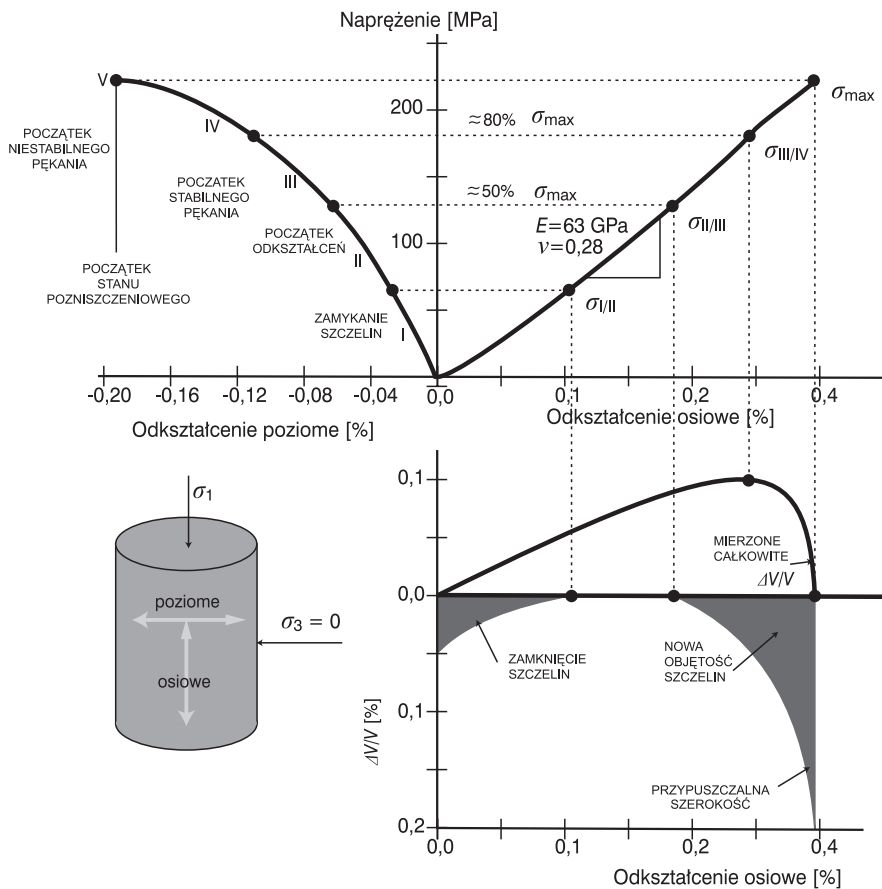
- $\sigma_{I/II}$ – granica kompaktacji;
- $\sigma_{II/III}$ – granica dylatacji względnej (mikrodylatacji), początek rozwoju inicjalnego pęknięcia (pęknięcie stabilne);
- $\sigma_{III/IV}$ – granica liniowości odkształceń osiowych (pęknięcie stabilne);
- $\sigma_{IV/V}$ – granica dylatacji właściwej (makrodylatacja – pęknięcie niestabilne);
- σ_{cr} – osiągnięcie maksymalnej wartości naprężenia, po którym następują fazy pęknięcia pozniszczeniowego.

Wyznaczone na podstawie dylatacyjnego modelu deformacji wartości naprężenia dla progów dylatacji względnej i właściwej są swoistymi cechami materiałowymi. Z badań (Brace i in., 1966; Scholz, 1968; Borecki i in., 1981, Kwaśniewski 1986a, b) wynika, że wartości progu dylatacji względnej mieszczą się w przedziale 0,3–0,6 naprężenia krytycznego, a wartość progu dylatacji właściwej w przedziale 0,6–0,98 naprężenia krytycznego. Przedstawione fazy deformacji nawiązują także do wydzieleni podanych przez Martina i Simmonsa (1992) na rysunku 2.2.

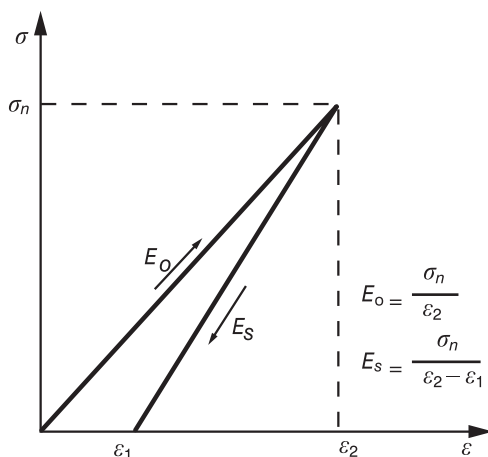
Wawersik i Fairhurst (1970) na wznoszącej krzywej naprężenie–odkształcenie wydzielili trzy fazy: zaciskania porów i szczelin, sprężystą oraz zmniejszania kąta nachylenia siecznej do charakterystyki naprężenie–odkształcenie. Trzy fazy deformacji: „dociskania” (zamykania porów i szczelin), odkształceń liniowych i pęknięcia wyróżnił również Kertesz (1979), a z kolei pięć faz deformacji, obejmujących także etap pozniszczeniowy: zaciskania, odkształceń sprężystych, sprężystych i lepko-sprężystych, niszczenia oraz przemieszczeń po zniszczeniu wydzielił Pacher (1970).

Istotne znaczenie ścieżek obciążania (przebiegu obciążenia w funkcji czasu) dla analizy procesu pęknięcia z jednoczesnym uwzględnieniem kolejnych faz deformacji podkreśla wielu badaczy, np. Dietze (1958), Gustkiewicz (1975) oraz Thiel (1980).

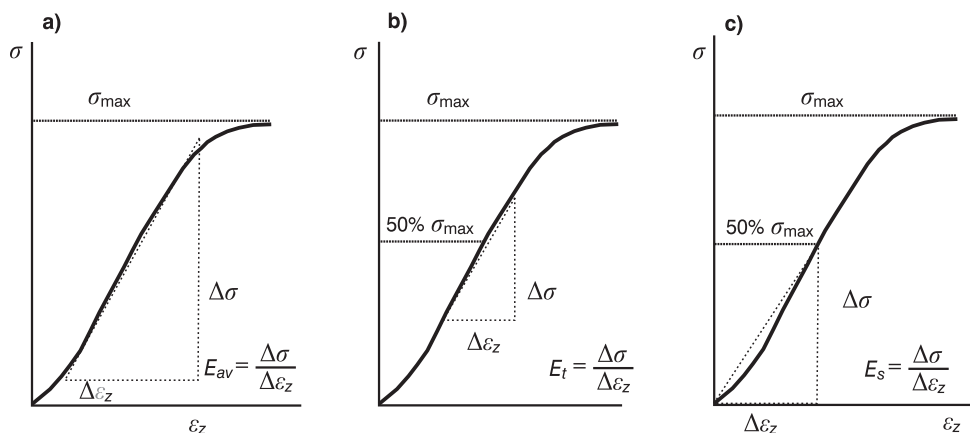
Poprawne ustalenie granic faz deformacji jest bardzo istotne dla właściwego wyznaczania parametrów sprężystości. W praktyce geomechanicznej podstawowymi parametrami sprężystości są moduł Younga (E) i współczynnik Poissona (ν). Ze względu na histerezę sprężystą, jaką wykazują skały zwarte, Kidybiński (1982) rozróżnia moduł sprężystości dla przedziału odkształceń odwracalnych oraz moduł odkształcenia dla całkowitych odkształceń próbki przy danym naprężeniu (rys. 2.3). Wartości obu modułów mogą być również wyznaczane jako sieczne lub styczne do odpowiedniego odcinka krzywej naprężenie–odkształce-



Rys. 2.2. Krzywa deformacji naprężenie-odkształcenie (na podstawie: Martin i Simmons, 1992)

Rys. 2.3. Schemat określania modułu sprężystości (E_s) i modułu odkształcenia (E_o)

nie dla całej wysokości próbki skalnej lub w połowie jej wysokości (Bukowska i in., 1992). Podobne wielowariantowe podejście zaprezentowane jest w normie ASTM (D 3148-02) i instrukcji ISRM (Ulusay, Hudson, 2007) i zgodnie z ich treścią moduł Younga może być wyznaczony jako (rys. 2.4):



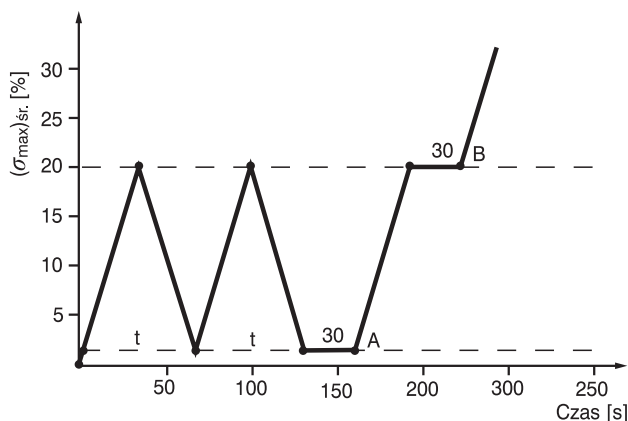
Rys. 2.4. Sposób wyznaczania modułu Younga zgodnie z normą ASTM (D 3148-02) i zaleceniami ISRM (na podstawie: Ulusay, Hudson, 2007): a) moduł średni, b) moduł styczny, c) moduł sieczny

- moduł średni dla w przybliżeniu prostoliniowego fragmentu krzywej naprężenie–odkształcenie, zwykle między 20 a 80% naprężenia niszczącego;
- moduł styczny dla stałego procentowego poziomu naprężenia, zwykle ok. 50% naprężenia niszczącego;
- moduł sieczny określany zwykle od zera do pewnego stałego poziomu, najczęściej do 50% naprężenia niszczącego.

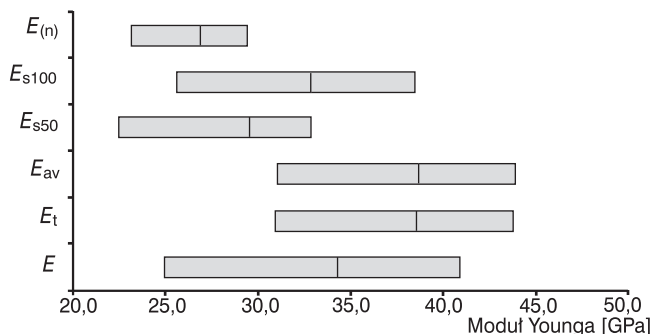
Zupełnie inne podejście zaprezentowano w Polskiej Normie PN-EN 14580, gdzie zaleca się poddawanie próbek walcowych cyklom obciążenia i odciążenia w przedziale 2–20% przewidywanego σ_{max} . Moduł Younga (według normy statyczny moduł sprężystości) wyznacza się dla naprężeń i odpowiadających im odkształceń przed trzecim (punkt A) i po trzecim (punkt B) cyklu obciążenia (rys. 2.5).

Porównując wartości modułu sprężystości i modułu odkształcenia, prezentowane w literaturze światowej, należy zwracać uwagę zarówno na metodę, jak i na zakres σ i ϵ , dla którego dany moduł został wyznaczony. Na rysunku 2.6 przedstawiono porównanie wartości modułów Younga na podstawie własnych badań dolomitu z Siewierzy, uzyskanych zgodnie z normami PN-EN i ASTM oraz według klasycznej interpretacji Hallbauera i in. (1973) dla II i III fazy deformacji.

Największe wartości uzyskano dla modułu średniego (E_{av}) i stycznego (E_t), a najmniejsze dla modułu siecznego (E_{s50}) i modułu $E_{(n)}$, przy czym moduły E_{av} i E mogą być zawyżone i niemiernodajne, ponieważ wykraczają poza II i III



Rys. 2.5. Schemat wyznaczania modułu Younga $E_{(n)}$ według polskiej normy PN-EN 14580



Rys. 2.6. Porównanie wartości modułów Younga uzyskanych zgodnie z normami PN-EN i ASTM oraz według klasycznej interpretacji Hallbauera i in. (1973)

fazę deformacji. Wartości modułu siecznego E_{S50} ustalonego w przedziale od 0 do 50% $\sigma_{\max}$ mogą być z kolei zaniżone, ze względu na bardzo duże odkształcenia I fazy kompaktacji (fazy I).

Wartości modułu Younga uzyskane z zastosowaniem metody klasycznej (E) wg Hallbauera i in. (1973) oraz metody siecznej w przedziale 0–100% $\sigma_{\max}$ (E_{s100}) mają najbardziej zbliżone wartości. Ten najprostszy, przybliżony moduł E_{s100} daje dobre, wiarygodne wyniki.

Trwałe zniszczenie struktury materiału skalnego pod wpływem wzrastającego obciążenia zachodzi stopniowo. Rozwój konstrukcji pras sztywnych pozwolił na kontrolowanie przebiegu tego procesu przy różnych ścieżkach obciążania, nie tylko na jego etapie przedkrytycznym, czyli do momentu osiągnięcia przez skałę wytrzymałości doraźnej, ale również po jej przekroczeniu (Cook, 1965; Bieniawski, 1970; Wawersik, Fairhurst, 1970; Rummel, Fairhurst, 1970; Hudson i in., 1972; Okubo, Nishimatsu, 1985; Pinińska, Łukaszewski, 1991; Smółka, 1994; Łukaszewski, 2005c; Pinińska, 1997; Kortas,

Nowakowski, 2002; Klisowski i in., 2002; Tajduś i in., 2003a; Bukowska, 2003; Bukowska i in., 2007). Możliwy jest też monitoring przejawów koncentracji i relaksacji naprężeń w etapie pokrytycznym, gdy materiał skalny poddawany jest wzrastającemu obciążeniu i jako ośrodek spękany dalej przenosi obciążenia. Według Salamona (1970) wykazanie istnienia opadającej części charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej jest największym postępem w mechanice skał w latach 70. XX w. Zaletą sztywnych maszyn wytrzymałościowych jest nie tylko możliwość otrzymania pełnej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej, ale także prowadzenie badań ze stałą prędkością odkształcenia próbki. Maszyny wytrzymałościowe, wyposażone w system serwosterujący, dają możliwość zaprogramowania dowolnego schematu obciążania próbki. Jako parametr sterujący obciążeniem można stosować wartość przyrostu siły obciążającej (rys. 2.7a), przesuwu tłoka maszyny (rys. 2.7b), odkształcenia osiowego (rys. 2.7c) oraz odkształcenia obwodowego (rys. 2.7d). Każdy z tych wariantów w odmienny sposób modeluje proces deformacji próbek skalnych (Łukaszewski i in., 1993; Pinińska i in., 1993a, b; Cain, 1996; Nowakowski, 1997; Flisiak i in., 2002; Kortas, Nowakowski, 2002; Klisowski i in., 2002; Bukowska, 1997, 2003). Jeśli parametrem sterującym jest siła, otrzymuje się tylko charakterystykę przedkrytyczną krzywej deformacji. W badaniach, w których przyrost obciążenia wymuszony jest stałym wzrostem odkształcenia osiowego lub przesuwem tłoka, dla skał o stabilnym zachowaniu względem maszyny wytrzymałościowej (Kłeczek, 1994), otrzymuje się również pokrytyczną charakterystykę krzywej deformacji, klasy I według klasyfikacji Wawersika i Fairhursta (1970). Dla skał o niestabilnej współpracy z maszyną wytrzymałościową (Kłeczek, 1994), klasy II według klasyfikacji Wawersika i Fairhursta (1970), zaleca się stosowanie obciążenia sterowanego stałą prędkością odkształcenia obwodowego. Postęp obciążenia należy w tym przypadku dostosować do postępu deformacji tak, aby nawiązywał do czasu reakcji energii sprężystej w próbce. W takim badaniu w wyniku powtarzających się cykli rozproszenia i wzrostu energii rejestrują się na krzywej naprężenie–odkształcenie kolejne pętle deformacji.

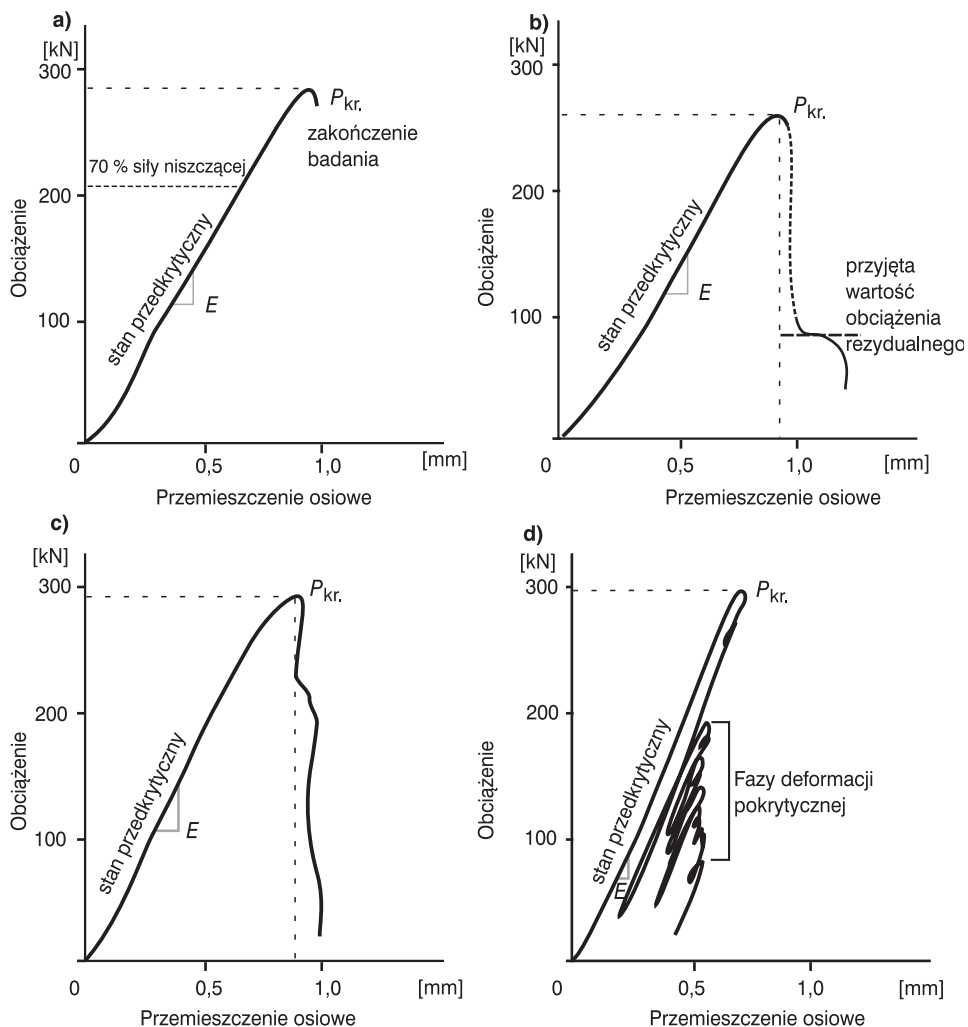
Znaczenie sposobu sterowania maszyną wytrzymałościową na przebieg deformacji było również przedmiotem badań Smołki (1994), Tajdusia, Szumińskiego i Olesiaka (2003a) Kortasa i Nowakowskiego (2002) oraz Klisowskiego, Flisiak i Szumińskiego (2002).

Pinińska (1995a, b), sterując eksperymentem z zadeklarowaną wartością przyrostu odkształcenia obwodowego, scharakteryzowała pokrytyczny etap deformacji w oparciu o cztery modele krzywych (rys. 2.8):

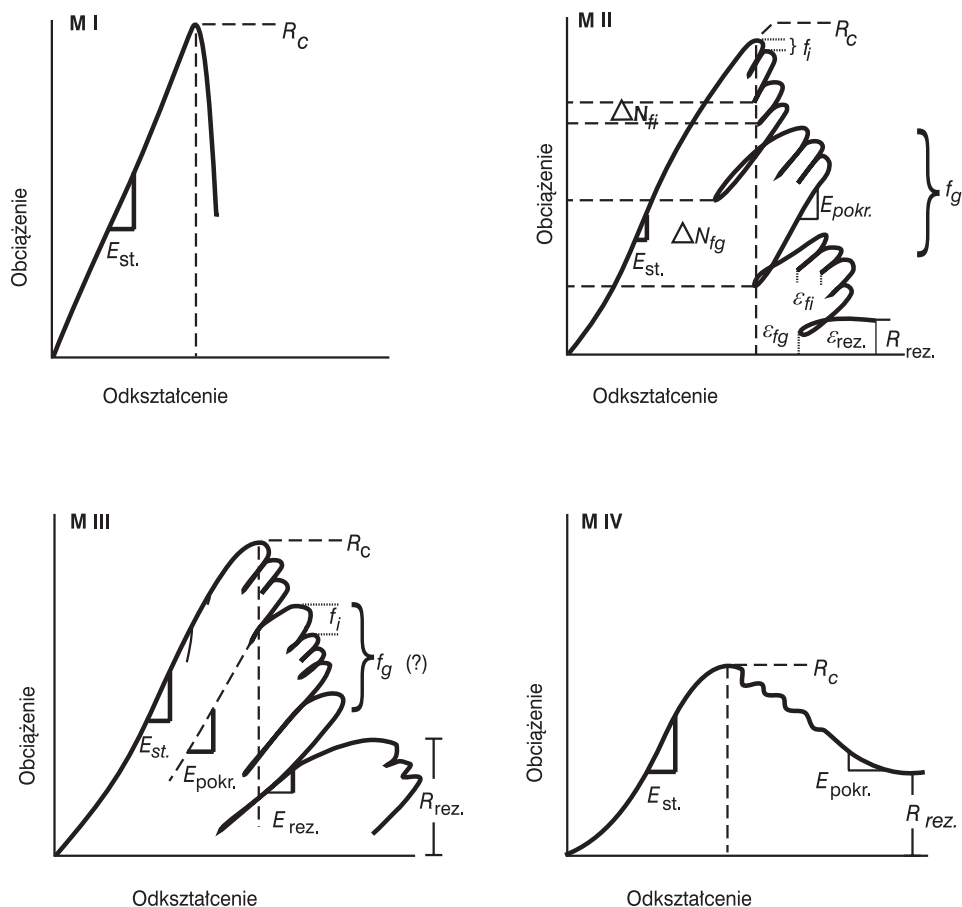
- model I – natychmiastowe zniszczenie w jednej fazie deformacji;
- model II – niszczenie stopniowe, manifestowane występowaniem kilku faz głównych (f_g) – makropęknięć, złożonych z kilku wyraźnych faz pojedynczych (f_i) – mikropęknięć;
- model III – niszczenie stopniowe, złożone z wielu faz pojedynczego pęknięcia (f_i) bez wyraźnie wykształconej fazy głównej (f_g);

- model IV – niszczenie stabilne, typowe dla zachowania skał klasy I według klasyfikacji Wawersika i Fairhursta (1970).

W modelu II fazy makropęknięcia (f_g) i mikropęknięcia (f_i) pojawiają się cyklicznie w sposób regularny i świadczą o śródziarnowym pękaniu rozdzielczym ziaren mocniejszych. W modelu III mikropęknięcie (f_i) przebiega nieregularnie i świadczy o międzyziarnowym pękaniu połączonym ze ścinaniem, natomiast w modelu IV fazy pęknięcia są słabo zaznaczone, a odkształcenie osiowe wzrasta monotonicznie.



Rys. 2.7. Przykłady typowych charakterystyk deformacji (obciążenie–przemieszczenie): a) badanie sterowane stałą prędkością siły obciążającej, b) badanie sterowane stałą prędkością przesuwu tłoka, c) badanie sterowane stałą prędkością odkształcenia osiowego, d) badanie sterowane stałą prędkością odkształcenia obwodowego



Rys. 2.8. Modele deformacji pokrytycznej wg Pinińskiej przy jednoosiowym ściskaniu w warunkach stałego przyrostu odkształcenia obwodowego (Pinińska, 1995a, b)

Bukowska (1997, 2005a) na podstawie eksperymentów prowadzonych z zadeklarowaną wartością przyrostu przesuwu tłoka wyróżniła z kolei 6 typów krzywych niszczenia próbek skalnych (rys. 2.9). Różnią się one długością fazy zamykania się mikroszczelin w etapie przedkrytycznym, występowaniem lokalnych spadków naprężeń w części przed- i pokrytycznej, „gładkim” lub „schodkowym” przebiegiem krzywej pokrytycznej oraz możliwością aproksymacji części pokrytycznej zależnością liniową lub hiperboliczną.

Zachowanie się skał w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury jest jednak inne i bardziej złożone niż w warunkach jednoosiowych. Pierwsze eksperymenty w trójosiowym stanie naprężenia przeprowadził von Carman w latach 1911–12 na marmurze z Carrary (Gramberg, 1989). Pod koniec lat 50. i na początku 60. ubiegłego wieku nastąpił wyraźny rozwój tego typu badań. Z tego okresu na uwagę zasługują prace Price’a (1958), Donatha (1961, 1964),