

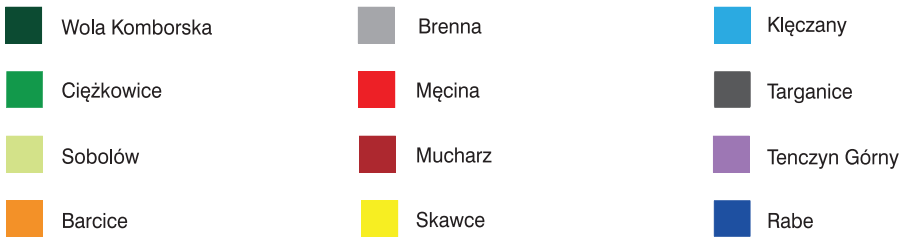
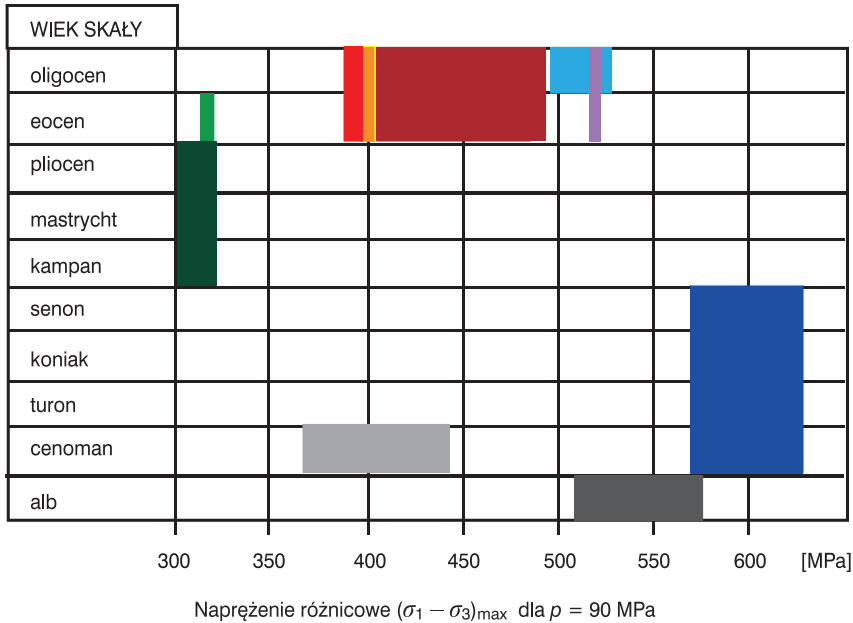
rając zarówno materiał frakcji psamitowej, jak i frakcji psefitowej, charakteryzują się małą wytrzymałością.

Oprócz zmienności strukturalnej i frakcjonalnej w analizowanych piaskowcach fliszowych obserwuje się także zróżnicowanie facjalne, opisane w rozdziale 3.1. Skały te należą do różnych płaszczowin i formacji fliszu karpackiego (tab. 4.1), a ich wiek jest określany od dolnej kredy aż po oligocen. Najstarsze piaskowce lgockie z Targanic, datowane na dolną kredę (alb), charakteryzują się jedną z największych wytrzymałości, natomiast najbardziej wytrzymałe są górnokredowe piaskowce istebniańskie z Rabego, datowane na cenoman–santon. Znacznie mniejszą wytrzymałość wykazywały cenomańskie piaskowce godulskie z Brennej, co mogło być spowodowane ich słabszym wysortowaniem. Najmniejszą wytrzymałość spośród wszystkich analizowanych skał klastycznych uzyskano dla piaskowców istebniańskich z Woli Komborskiej, powstałych na przełomie kredy górnej i paleogenu (kampan, mastrycht i pliocen). Tak długi okres sedymentacji prawdopodobnie spowodował złe wysortowanie materiału, czego konsekwencją jest mała wytrzymałość. Eoceńskie piaskowce ciężkowickie i magurskie natomiast charakteryzują się dość dużą zmiennością. Piaskowce z Ciężkowic mają jedną z najmniejszych wytrzymałości, a piaskowce magurskie charakteryzują się zarówno średnią (Barcice i Męcina), jak i dużą wytrzymałością (Tenczyn Górny). Najmłodsze skały, czyli piaskowce krośnieńskie z Mucharza i ze Skawiec oraz piaskowce cergowskie z Kłęczan, charakteryzują się średnią wytrzymałością, co zapewne wynika z charakteru materiału skalnego, właściwego dla etapu zasypywania zbiornika sedymentacyjnego. Trudno jest zatem wykazać jednoznacznie wpływ wieku analizowanych piaskowców fliszowych na wytrzymałość, podobnie jak w przypadku uziarnienia tych skał (rys. 7.17).

Cechy strukturalne, według których kwalifikowano badane odmiany skał do właściwych typów litologicznych (badawczych), wpływają na wartości oznaczanych parametrów geomechanicznych. Wzrost udziału spoiwa w materiale skalnym powoduje zwiększenie maksymalnych naprężeń różnicowych oraz wartości modułu Younga, natomiast parametry te zmniejszają się wraz z rosnącą zawartością kwarcu i wzrostem wielkości uziarnienia.

7.3. Analiza anizotropii wytrzymałości i odkształcalności piaskowców fliszowych

Anizotropia wytrzymałości i odkształcalności skał jest bardzo ważnym zagadnieniem w geomechanice. Dość dobrze jest poznana anizotropia wytrzymałości w warunkach jednoosiowego ściskania skał uwarstwionych i laminowanych. W warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania anizotropia wytrzymałości i odkształcalności, pomimo wielu prac (Donath, 1964; Kwaśniewski, 2002; McCabe, Koerner, 1975; Niandou i in., 1997; Łukaszewski, 2004), ciągle jest



Rys. 7.17. Wpływ wieku analizowanych piaskowców fliszowych na ich wytrzymałość na ściskanie przy ciśnieniu okólnym wynoszącym 90 MPa

dyskutowana i kolejni badacze opisują ją dla różnych skał, dochodząc często do odmiennych wniosków.

Te niejednoznaczne oceny skłoniły autora do przeprowadzenia własnych badań nad anizotropią wytrzymałości i odkształcalności skał w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania. Materiał badawczy stanowiły piaskowce fliszowe z Mucharza, które wybrano ze względu na dużą ich anizotropię ultradźwiękową (Pinińska, 2003, Łukaszewski, 2002a). Głównym celem badań było określenie wpływu orientacji największego naprężenia głównego σ_1 , uwzględniające wpływ położenia płaszczyzn uwarstwienia na wytrzymałość, odkształcalność i charakter zniszczenia badanych skał.

Do badań anizotropii wytrzymałości i odkształcalności wykorzystano przygotowane w kamieniołomie i zorientowane względem stropu i spągu, sześciennie

bloki skalne, z których, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 7.18, wycięto próbki walcowe średnicy 53,5 mm i smukłości 2:

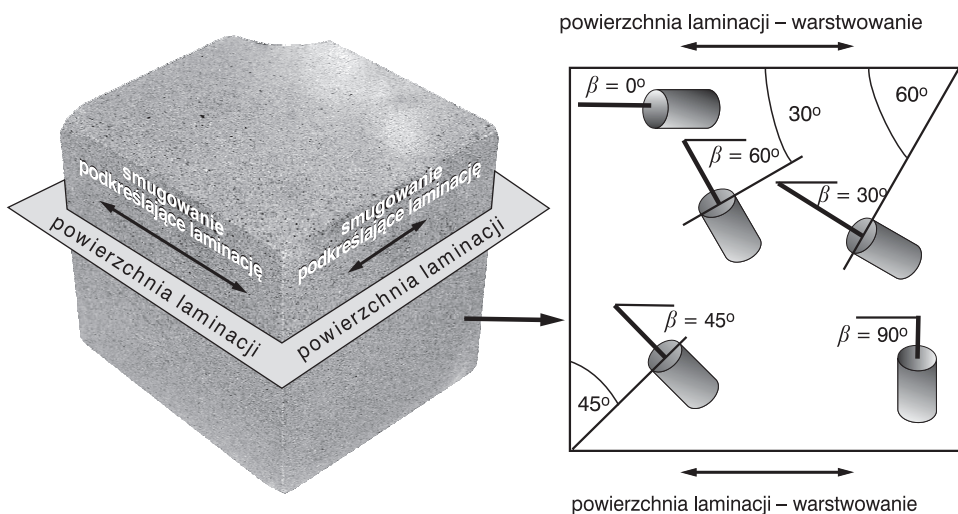
- równoległe do powierzchni laminacji ($\beta = 0^\circ$);
- nachylone do powierzchni laminacji pod kątem 30° ($\beta = 30^\circ$);
- nachylone do powierzchni laminacji pod kątem 45° ($\beta = 45^\circ$);
- nachylone do powierzchni laminacji pod kątem 60° ($\beta = 60^\circ$);
- prostopadłe do powierzchni laminacji ($\beta = 90^\circ$).

W badaniach anizotropii wytrzymałości i odkształcalności piaskowców krośnieńskich z Mucharza wykorzystano pojedyncze testy klasyczne, zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 6.2, z zastosowaniem trzech ciśnień okólnych: 30, 60 i 90 MPa.

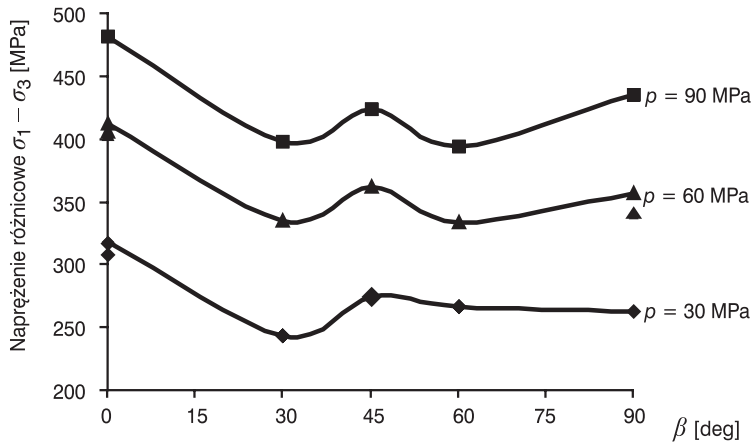
Na podstawie uzyskanych z testów trójosiowych zależności między naprężeniem różnicowym a odkształceniem osiowym, obwodowym i objętościowym dla każdej badanej próbki wyznaczono: maksymalne naprężenie różnicowe $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ (MPa), krytyczne odkształcenie osiowe $\varepsilon_{a\text{kr}}$ (%), krytyczne odkształcenie obwodowe $\varepsilon_{c\text{kr}}$ (%), moduł Younga E (GPa), współczynnik Poissona ν (-), energię krytyczną γ_{kr} (MJ/m³) oraz naprężenie różnicowe dla progu dylatacji właściwej $(\sigma_1 - \sigma_3)_D$ (MPa) i dla granicy liniowości charakterystyki odkształceń osiowych $(\sigma_1 - \sigma_3)_E$ (MPa).

Piaskowce z Mucharza wykazują największą wytrzymałość (rys. 7.19) w kierunku równoległym do warstwowania ($\beta = 0^\circ$), a najmniejszą, gdy naprężenie osiowe σ_1 jest zorientowane do płaszczyzny warstwowania pod kątem 30° ($\beta = 30^\circ$).

Wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego obserwuje się podobny wzrost wytrzymałości dla wszystkich kierunków β i trudno jest wskazać kąt, dla którego te zmiany są większe lub mniejsze.



Rys. 7.18. Schemat wycinania próbek



Rys. 7.19. Anizotropia wytrzymałości granicznej piaskowców krośnieńskich z Mucharza przy różnych ciśnieniach okólnych

Współczynniki anizotropii wytrzymałości, wyznaczone według wzoru:

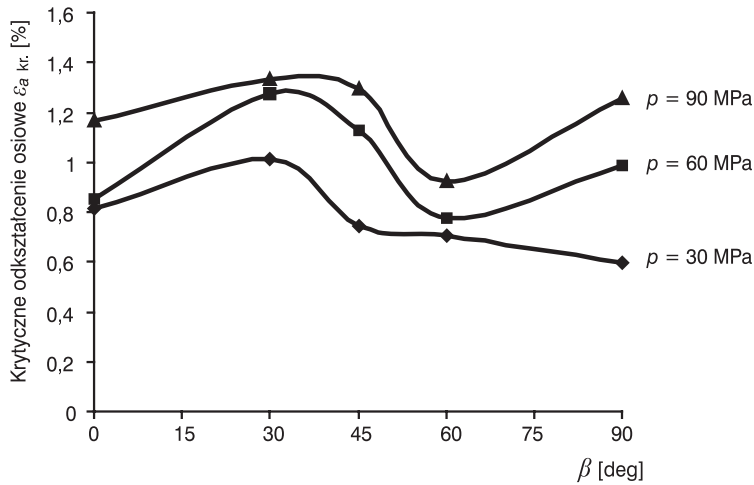
$$k_c = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{\min} \quad (7.9)$$

wynoszą od 1,21 do 1,30. W warunkach konwencjonalnego trójosiowego ścisnienia w miarę wzrostu ciśnienia okólnego efekt anizotropii ulega nieznacznej redukcji, o czym świadczy zmniejszenie się współczynnika anizotropii k_c z 1,30 dla 30 MPa do 1,21 dla 90 MPa.

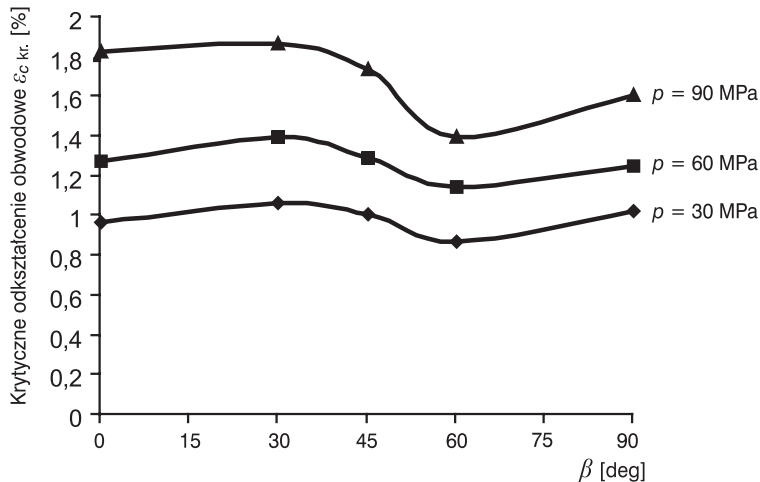
Największe krytyczne odkształcenia osiowe (rys. 7.20) charakterystyczne są dla kierunku działania największego naprężenia głównego σ_1 względem płaszczyzny uwarstwienia w przedziale 30–45°, a najmniejsze w kierunku $\beta = 60^\circ$, prostopadłym ($\beta = 90^\circ$) i równoległym ($\beta = 0^\circ$) do uwarstwienia. Wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego obserwuje się wzrost odkształceń osiowych dla wszystkich kierunków i postępuje on najszybciej dla $\beta = 45^\circ$, a najwolniej dla $\beta = 60^\circ$.

Podobne zależności widoczne są także dla odkształceń obwodowych (rys. 7.21), w których największe wartości dotyczą kierunku 30°, a najmniejsze kierunku równoległego do warstwowania ($\beta = 0^\circ$) i dla kierunku $\beta = 60^\circ$. Podobnie jak w przypadku odkształceń osiowych, wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego także dochodzi do wzrostu odkształceń obwodowych dla wszystkich kierunków. Wzrost ten postępuje najszybciej dla kierunku β w przedziale od 30 do 45°, a najwolniej w kierunku $\beta = 60^\circ$.

Największe wartości modułu Younga (E) (rys. 7.22) zarejestrowano dla kierunku równoległego do warstwowania ($\beta = 0^\circ$), nieco mniejsze dla kierunku $\beta = 45^\circ$ i $\beta = 60^\circ$, a najmniejsze dla kierunku $\beta = 30^\circ$. Wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego od 30 do 60 MPa obserwuje się wzrost wartości modułu Younga we wszystkich kierunkach. Przy zmianie ciśnienia okólnego z 60 do



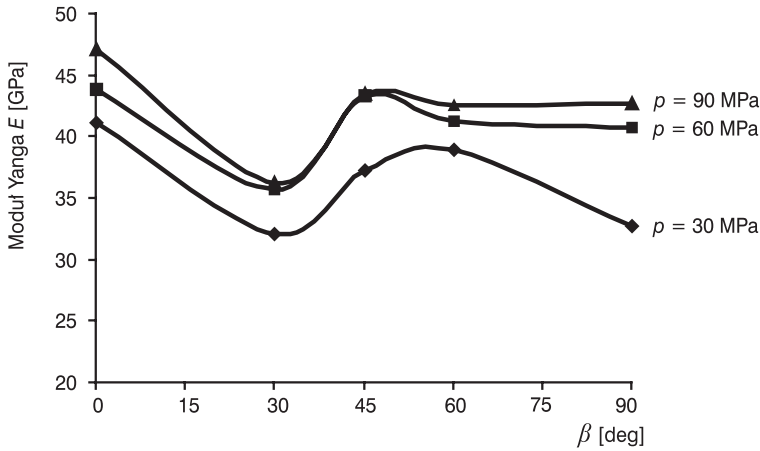
Rys. 7.20. Anizotropia odkształceń osiowych piaskowców krośnieńskich z Mucharza przy różnych ciśnieniach okólnych



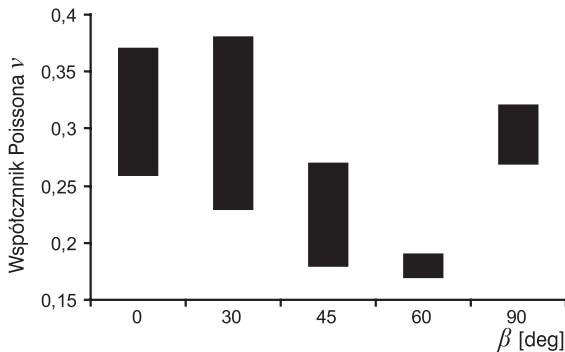
Rys. 7.21. Anizotropia odkształceń obwodowych piaskowców krośnieńskich z Mucharza przy różnych ciśnieniach okólnych

90 MPa wzrost wartości E następuje tylko w kierunku równoległym ($\beta = 0^\circ$) i prostopadłym ($\beta = 90^\circ$) do laminacji oraz dla kierunku $\beta = 60^\circ$. Dla β z przedziału od 30 do 45° moduł Younga nie ulega zmianie.

Współczynnik Poissona analizowanych skał nie charakteryzuje się wyraźnymi zmianami wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego. Największe wartości charakterystyczne są dla kierunku równoległego ($\beta = 0^\circ$) i prostopadłego ($\beta = 90^\circ$) do warstwowania, oraz dla kierunku $\beta = 30^\circ$, a najmniejsze dla kierunków pośrednich w przedziale od 45 do 60° (rys. 7.23).



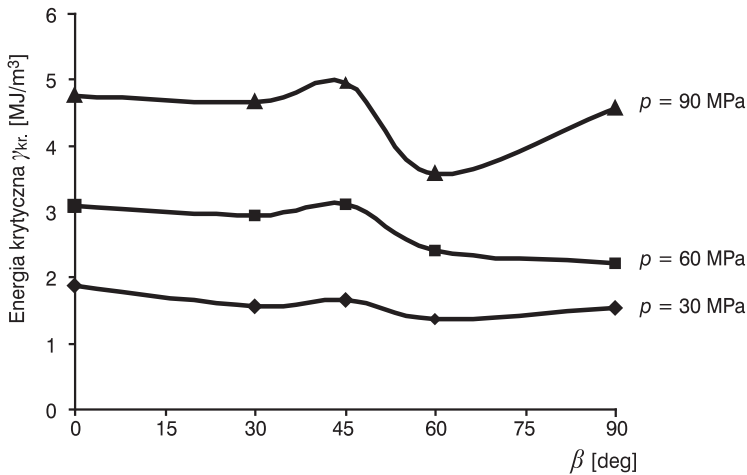
Rys. 7.22. Anizotropia wartości modułu Younga piaskowców krośnieńskich z Mucharza przy różnych ciśnieniach okólnych



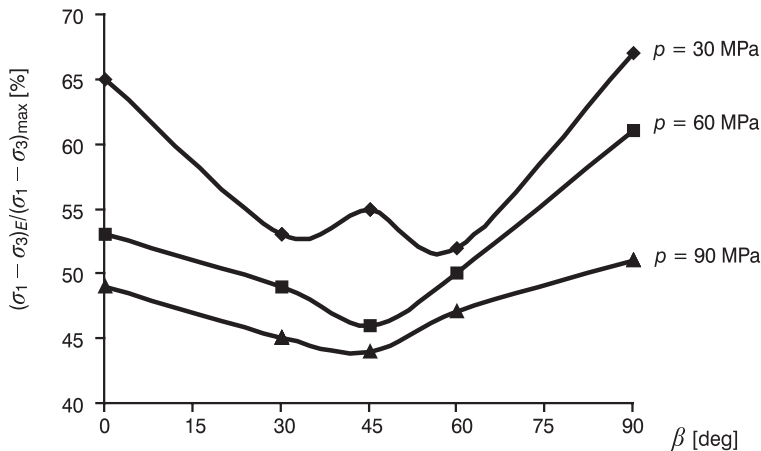
Rys. 7.23. Anizotropia wartości współczynnika Poissona piaskowców krośnieńskich z Mucharza

Kierunek działania największego naprężenia głównego względem płaszczyzny uwarstwienia ma trudny do ustalenia wpływ na wartość energii krytycznej $\gamma_{kr.}$ (MJ/m^3) (rys. 7.24). Dla niskich ciśnień, rzędu 30 MPa, uzyskano podobne wartości energii krytycznej. Dla ciśnień wyższych różnice wartości $\gamma_{kr.}$, w zależności od kierunku β są coraz większe. Przy ciśnieniu okólnym 90 MPa największe wartości energii uzyskano dla kierunku 45° , a najmniejsze dla $\beta = 60^\circ$. Wzrost ciśnienia okólnego wpływa znacząco na wartość energii krytycznej, która wzrasta najszybciej dla kierunku równoległego ($\beta = 0^\circ$), prostopadłego ($\beta = 90^\circ$) oraz w przedziale $30\text{--}45^\circ$, a najwolniej dla $\beta = 60^\circ$.

W celu przejrzystości analizy oraz umożliwienia porównań naprężenie różnicowe na progu dylatacji właściwej $(\sigma_1 - \sigma_3)_D$ oraz na granicy liniowości charakterystyki odkształceń osiowych $(\sigma_1 - \sigma_3)_E$ znormalizowano względem maksymalnego naprężenia różnicowego $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{max}}$.



Rys. 7.24. Anizotropia wartości energii krytycznej piaskowców krośnieńskich z Mucharza przy różnych ciśnieniach okólnych



Rys. 7.25. Anizotropia wartości naprężenia różnicowego dla granicy liniowości odkształceń osiowych znormalizowanego względem $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ dla piaskowców krośnieńskich z Mucharza przy różnych ciśnieniach okólnych

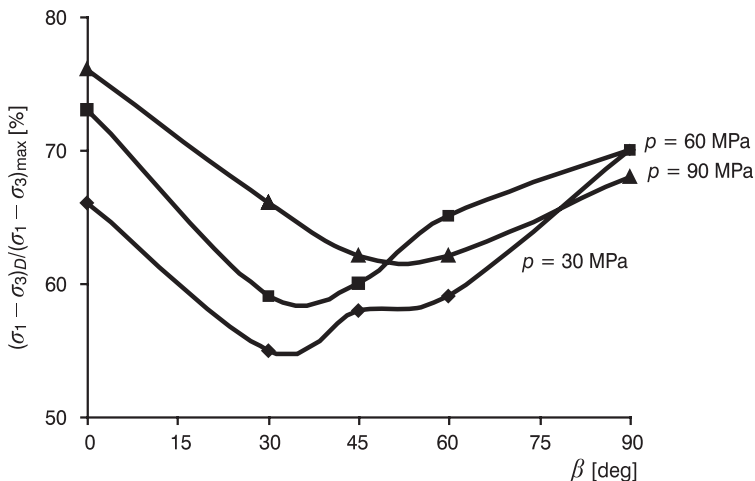
Największe wartości $(\sigma_1 - \sigma_3)E/(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ (rys. 7.25) odnotowano dla kierunków równoległego ($\beta = 0^\circ$) i prostopadłego ($\beta = 90^\circ$) do laminacji, a najmniejsze dla β w przedziale od 30 do 60° . Wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego obserwuje się spadek wartości tego parametru i postępuje on najszybciej dla kierunku równoległego ($\beta = 0^\circ$) i prostopadłego ($\beta = 90^\circ$) do laminacji, a najwolniej dla $\beta = 30$ i 60° .

Kierunek działania największego naprężenia głównego względem płaszczyzny uwarstwienia oraz zastosowane ciśnienia okólne mają trudny do ustalenia

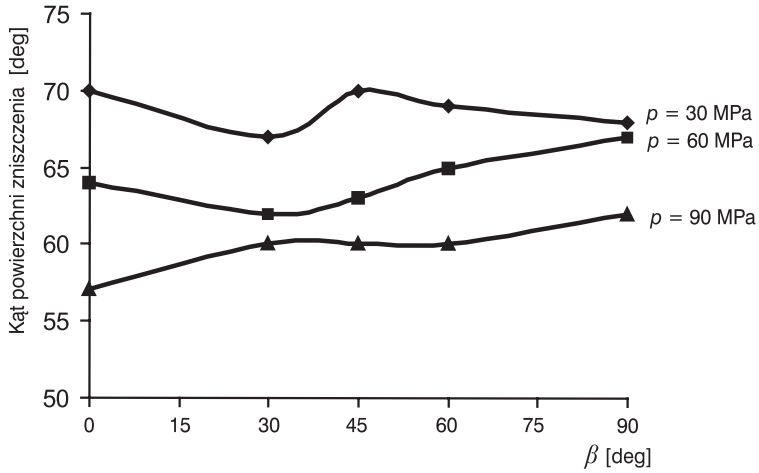
wpływ na wartość $(\sigma_1 - \sigma_3)_D / (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ (rys. 7.26). Największe wartości uzyskano dla kierunku równoległego ($\beta = 0^\circ$), nieco mniejsze dla kierunku prostopadłego ($\beta = 90^\circ$) do uwarstwienia, a najmniejsze dla kierunków od 30° do 60° . Dla kierunków $0-45^\circ$ obserwuje się wzrost wartości tego parametru wraz ze wzrostem wartości ciśnienia okólnego. Postępuje on najszybciej dla $\beta = 0^\circ$ i dla $\beta = 30^\circ$, a najwolniej dla kierunku 45° . Dla kierunków w przedziale $60-90^\circ$ trudno jest zauważyć jakieś tendencje zmian wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego.

Wykonano również analizę wielkości kątów powierzchni zniszczenia (ścięcia) zmierzonych na próbkach po badaniach trójosiowych. Uwzględniono przy tym nie tylko trzy wartości ciśnienia okólnego, ale także kierunki działania największego naprężenia głównego (β). Trudno jest jednak zauważyć jakieś ogólne tendencje zmian kąta powierzchni zniszczenia wraz ze zmianą kierunku β (rys. 7.27). Dla ciśnienia okólnego 30 MPa największe wartości kąta uzyskano dla kierunku równoległego ($\beta = 0^\circ$) i kierunku $\beta = 45^\circ$, a najmniejsze dla kierunku $\beta = 30^\circ$. Dla ciśnienia 90 MPa wyniki były odwrotne: największe wartości kąta zmierzono dla kierunku $\beta = 30^\circ$, a najmniejsze dla kierunku równoległego ($\beta = 0^\circ$) do uwarstwienia. Wartości kąta powierzchni zniszczenia zmniejszają się wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego. Zmiany są większe dla $\beta = 0^\circ$ i $\beta = 45^\circ$ i wynoszą 13° , a najmniejsze dla $\beta = 30^\circ$, gdzie spadek ten jest o połowę mniejszy i wynosi tylko 7° .

Badania wpływu anizotropii skał na właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania wykazały istnienie uprzywilejowanego kierunku, w którym wytrzymałość jest najmniejsza,



Rys. 7.26. Anizotropia wartości naprężenia różnicowego dla progu dylatacji właściwej, znormalizowanego względem $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ dla piaskowców krośnieńskich z Mucharza przy różnych ciśnieniach okólnych



Rys. 7.27. Anizotropia wartości kąta powierzchni zniszczenia piaskowców krośnieńskich z Mucharza przy różnych ciśnieniach okólnych

a odkształcalność największa. Jest to kąt $\beta = 30^\circ$, w którym zniszczenie następuje wskutek pęknięcia rozdzielczego wzdłuż powierzchni warstwowania, co potwierdzają inni autorzy (Donath, 1961, 1964, 1972; McLamore, Gray 1967; McCabe, Koerner, 1975; Kwaśniewski, 2002).