

Krzysztof Tomiczek\*

## O RÓŻNICACH W ZACHOWANIU SIĘ SKAŁ W WARUNKACH JEDNOOSIOWEGO ROZCIĄGANIA I ŚCISKANIA

---

### 1. Wprowadzenie

Dotychczasowa wiedza o własnościach odkształceniowych skał wywodzi się niemal wyłącznie z prób na ściskanie. Pomimo tego, że od dawna uważa się, iż próby rozciągania obok prób na ściskanie stanowią podstawę badań doświadczalnych nad mechanicznymi (w tym odkształceniowymi) właściwościami materiałów, to wiedza na temat zachowania się skał w polu naprężeń rozciągających jest niezwykle skromna<sup>1</sup>.

W celu wykrycia różnic w zachowaniu się skał w polu naprężeń ściskających i rozciągających przeprowadzono próby jednoosiowego ściskania i rozciągania próbek skalnych trzech quasi-jednorodnych skał: piaskowców Brenna i Jastrzębie oraz granitu Strzelin.

Do badań użyto:

- 1) próbek walcowych o dwóch różnych długościach:
  - $d \approx 42 \text{ mm} \times h \approx 84 \text{ mm}$  w próbach jednoosiowego monocyklicznego ściskania (smukłość  $h : d \approx 2 : 1$ ) piaskowców Brenna i Jastrzębie (gdzie:  $d$  — średnica, a  $h$  — wysokość próbki),
  - $d \approx 42 \text{ mm} \times h \approx 168 \text{ mm}$  w próbach monocyklicznego i wielocyklicznego rozciągania bezpośredniego ( $h : d \approx 4 : 1$ );
- 2) próbek prostopadłościennych granitu Strzelin o długości krawędzi podstawy  $a \approx 31,3 \text{ mm}$  i wysokości  $h \approx 69,3 \text{ mm}$  (gdzie:  $a$  — długość krawędzi podstawy,  $h$  — wysokość próbki;  $h : a \approx 2,21$ )<sup>2</sup>.

---

\* Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice

<sup>1</sup> Wyniki dotychczas prowadzonych badań na świecie nad zachowaniem się skał w warunkach naprężeń rozciągających zostały omówione w innych publikacjach (zob. np. [2]) i ze względu na ograniczenie wydawnicze nie zostały przedstawione w niniejszym artykule.

<sup>2</sup> W próbach jednoosiowego monocyklicznego ściskania w przypadku granitu Strzelin użyto próbek prostopadłościennych, ponieważ za pomocą maszyny wytrzymałościowej SHM-MG 250/4 można zadać obciążenie sięgające maksymalnie 250 kN. Jest ono zbyt małe, by zniszczyć próbki tego granitu o większym polu przekroju poprzecznego. Zalecana wysokość próbek prostopadłościennych przy smukłości  $h : d = 2$  dla długości boku krawędzi podstawy  $a = 31,3 \text{ mm}$  wynosiłaby  $h = 62,6 \text{ mm}$ . Pominęto wpływ efektu skali. Uznano, że w tym przypadku nie ma on znaczącego wpływu na zmierzone wartości naprężeń i odkształceń. Odkształcenia podłużne i poprzeczne mierzono stosując układ dwóch szeregowo połączonych tensometrów (razem cztery tensometry).

Dokładność mechanicznej obróbki i przygotowania próbek do badań spełniała zalecenia Międzynarodowego Towarzystwa Mechaniki Skał.

## 2. Badania eksperymentalne nad właściwościami odkształceniowymi piaskowców Brenna i Jastrzębie oraz granitu Strzelin w warunkach jednoosiowego ściskania

Próby jednoosiowego ściskania sterowano sygnałem przemieszczenia. Tłok wysuwał się z cylindra roboczego maszyny ze stałą prędkością równą 0,003 mm/s. Próbki umieszczane były pomiędzy dwoma podkładkami stalowymi o średnicy równej średnicy próbki ( $d \approx 42$  mm) i grubości równej połowie średnicy ( $h \approx 21$  mm), a następnie ustawione na dolnej płycie oporowej maszyny wytrzymałościowej. Górna płyta oporowa połączona była z górną belką oporową za pomocą przegubu kulistego.

Do pomiaru odkształceń podłużnych  $\varepsilon_z$  oraz poprzecznych  $\varepsilon_\theta$  walcowych próbek piaskowców Brenna i Jastrzębie używano tensometrów elektrooporowych typu kratowego. W przypadku próbek prostopadłościennych stosowano układ trzech połączonych szeregowo tensometrów umieszczonych w połowie wysokości próbki poziomo i trzech — pionowo do jej osi podłużnej.

Własności odkształceniowe piaskowców Brenna i Jastrzębie oraz granitu Strzelin przy ściskaniu określono na podstawie charakterystyk naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie jednostkowe podłużne  $\varepsilon_z$  i poprzeczne  $\varepsilon_\theta$  (lub  $\varepsilon_{x,y}$ ) (rys. 1).

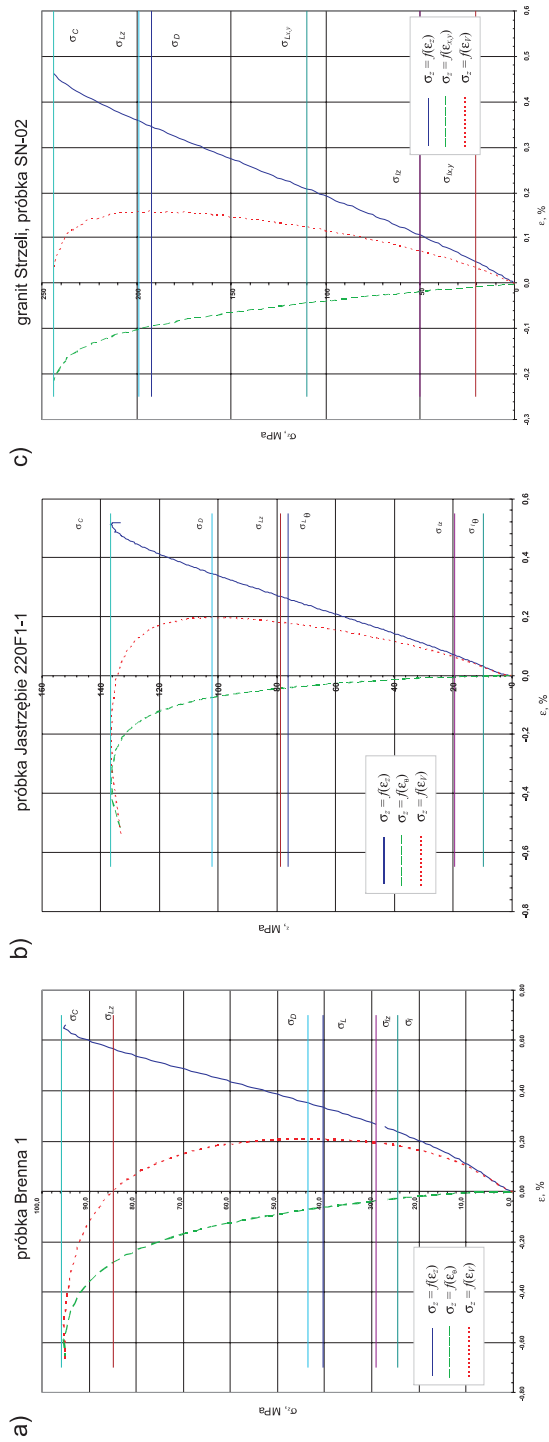
Charakterystykę naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie jednostkowe objętościowe  $\varepsilon_V$  wykreślono obliczając odkształcenia objętościowe  $\varepsilon_V$  na podstawie zmierzonych wartości odkształceń podłużnych  $\varepsilon_z$  i poprzecznych  $\varepsilon_\theta$  (lub  $\varepsilon_{x,y}$ ).

Obliczono wartości stałych charakteryzujących stadia odkształcania się badanych skał przy ściskaniu.

Spśród trzech wybranych do badań skał największą wytrzymałość graniczną na jednoosiowe ściskanie  $\sigma_C$  miał granit Strzelin ( $\sigma_C = 246$  MPa), wyraźnie mniejszą — piaskowiec Jastrzębie ( $\sigma_C = 109$  MPa), a najmniejszą — piaskowiec Brenna ( $\sigma_C = 95$  MPa).

Charakterystyki naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie jednostkowe podłużne  $\varepsilon_z$  dla trzech skał przy niewielkich poziomach naprężeń mają charakter nieliniowy i są wypukłe. Efekt ten jest bardzo wyraźny w przypadku piaskowców, natomiast mniej wyraźny dla granitu. Wraz ze wzrostem naprężenia  $\sigma_z$  charakterystyki naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie  $\varepsilon$  wyprostowują się i można wyznaczyć na nich przedziały zachowań liniowych (lub quasi-liniowych).

Różne są długości tych przedziałów, na charakterystykach  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$  najdłuższe są w przypadku granitu Strzelin ( $\sigma_{Lz} - \sigma_{Lz} = 0,67\sigma_C$ ), krótsze dla piaskowców Brenna ( $\sigma_{Lz} - \sigma_{Lz} = 0,57\sigma_C$ ) i Jastrzębie ( $\sigma_{Lz} - \sigma_{Lz} \cong 0,58\sigma_C$ ). Na charakterystykach  $\sigma_z = f(\varepsilon_{x,y})$  (lub  $\sigma_z = f(\varepsilon_\theta)$ ) przedziały zachowań liniowych są również najdłuższe w przypadku granitu Strzelin ( $\sigma_{Lx,y} - \sigma_{Lx,y} = 0,40\sigma_C$ ), a nieco krótsze dla piaskowca Jastrzębie ( $\sigma_{L\theta} - \sigma_{L\theta} = 0,36\sigma_C$ ) i wyraźnie krótsze dla piaskowca Brenna ( $\sigma_{L\theta} - \sigma_{L\theta} = 0,16\sigma_C$ ).



**Rys. 1.** Wybrane charakterystyki naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie jednostkowe: podłużne  $\epsilon_z$  (—) (a), poprzeczne  $\epsilon_{x,y}$  (- - -) (b) objętościowe  $\epsilon_V$  (· · ·) (c) próbek piaskowców Brenna i Jastrzębie oraz granitu Strzeliin poddanych próbie jednoosiowego ściskania

Największą odkształcalność podłużną w przedziale zachowań liniowych przejawia piaskowiec Brenna, dla którego współczynnik  $E_l = 20,6$  GPa, a najmniejszą granit Strzelin ( $E_l = 58,7$  GPa). Dla piaskowca Jastrzębie współczynnik  $E_l$  jest równy 27,4 GPa.

Po przekroczeniu granic zachowań liniowych oraz przy dalszym wzroście naprężeń normalnych  $\sigma_z$  charakterystyki naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie jednostkowe podłużne  $\varepsilon_z$  tracą swój liniowy charakter i stają się wklęsłe, aż do momentu przekroczenia wytrzymałości granicznej na jednoosiowe ściskania  $\sigma_C$ . Efekt utraty liniowego charakteru tych charakterystyk jest bardzo wyraźny dla wszystkich trzech zależności  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$ ,  $\sigma_z = f(\varepsilon_\theta)$  i  $\sigma_z = f(\varepsilon_\nu)$  w przypadku piaskowców Brenna i Jastrzębie oraz charakterystyk  $\sigma_z = f(\varepsilon_{x,y})$  i  $\sigma_z = f(\varepsilon_\nu)$  granitu Strzelin. Efekt ten jest mniej wyraźny w przypadku charakterystyk  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$  granitu Strzelin.

Sieczne współczynniki odkształcalności podłużnej  $E_{s,50}$  (na poziomie  $\sigma_z / \sigma_C = 0,5$ ) są największe w przypadku granitu Strzelin  $E_{s,50} = 53,0$  GPa, zdecydowanie mniejsze dla piaskowca Jastrzębie  $E_{s,50} = 24,0$  GPa i dla piaskowca Brenna  $E_{s,50} = 12,8$  GPa.

Piaskowiec Brenna w odróżnieniu od piaskowca Jastrzębie doznaje bardzo silnych odkształceń poprzecznych  $\varepsilon_\theta$  w stosunku do odkształceń podłużnych  $\varepsilon_z$ . Takie zachowanie się piaskowca Brenna sprawia, że do zjawiska wzrostu objętości (dylatacji) dochodzi przy stosunkowo niedużych wartościach naprężeń  $\sigma_D$ , równych średnio  $0,46\sigma_C$ . Dla piaskowca Jastrzębie i dla granitu Strzelin progi te są znacznie wyższe, równe odpowiednio  $0,73\sigma_C$  i  $0,80\sigma_C$ .

Średnie wartości współczynnika Poissona  $\nu$  wyznaczone dla wspólnej liniowej części charakterystyk  $\sigma_z$  —  $\varepsilon_z$  i  $\sigma_z$  —  $\varepsilon_\theta$  (lub  $\sigma_z$  —  $\varepsilon_{x,y}$ ) były najmniejsze dla piaskowca Jastrzębie ( $\nu = 0,16$ ), nieco większe w przypadku granitu Strzelin ( $\nu = 0,24$ ) i największe dla piaskowca Brenna ( $\nu = 0,46$ ).

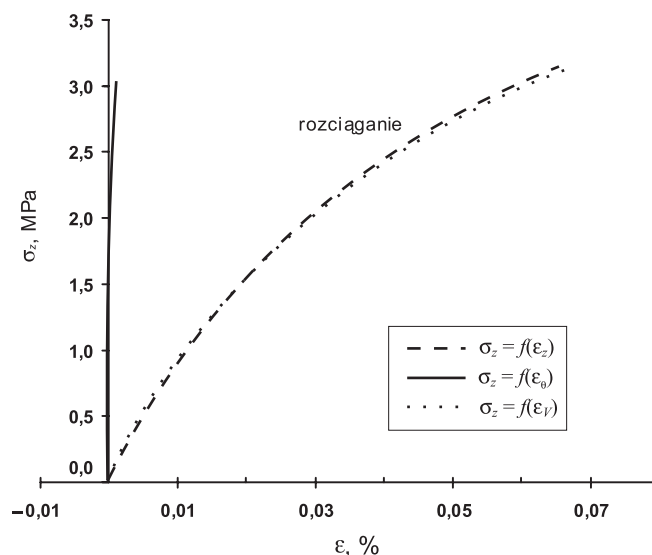
### **3. Badania eksperymentalne nad właściwościami odkształceniowymi skał w warunkach jednoosiowego rozciągania. Różnice w zachowaniu się skał przy jednoosiowym rozciąganiu i ściskaniu**

Próby rozciągania bezpośredniego sterowane były także za pomocą sygnału przemieszczenia. Tłok przemieszczał się ze stałą prędkością równą 0,001 mm/s podczas obciążania oraz odciążania przy wielocyklicznym jednoosiowym rozciąganiu.

Podstawy walcowych próbek skalnych były przyklejone bezpośrednio (połączenie stykowe) do stalowych uchwytów. Średnica końców tych uchwytów na wysokości około 21 mm była równa średnicy próbki ( $d \approx 42$  mm). Uchwyty były połączone ze stalowymi objemami — kołnierzami z cylindrem i z belką oporową maszyny wytrzymałościowej. W kołnierzu górnym umieszczony był przegub kulisty.

Próby jednoosiowego rozciągania rozpoczęto od prób monocyklicznych, tzn. takich, podczas których próbki poddawane były monotonicznemu obciążaniu, aż do chwili ich zniszczenia (rys. 2). Natomiast podczas prób jednoosiowego rozciągania wielocyklicznego (rys. 3) starano się dobrać wielkość obciążania w kolejnych cyklach tak, aby uzyskać cztery poziomy naprężeń rozciągających:  $\sigma_z / \sigma_T = 0,3, 0,6, 0,9$  i  $1,0$ . Stosowano próbki walcowe o średnicy  $d = 42$  mm i smukłości  $h : d = 4$ . Odkształcenia mierzono za pomocą trzech zespołów tensometrów rozmieszczonych symetrycznie na całej wysokości próbki<sup>3</sup>.

Na podstawie wykonanych pomiarów stwierdzono, że wszystkie charakterystyki naprężenie  $\sigma_z$  — odkształcenie  $\epsilon$  mają charakter nieliniowy (rys. 2). Odkształcenia podłużne  $\epsilon_z$  i objętościowe  $\epsilon_V$  rosną w całym przedziale naprężeń  $\sigma_z$ . W przypadku niektórych skał odkształcenia poprzeczne  $\epsilon_\theta$  na poziomach naprężeń  $\sigma_z < 0,45 \sigma_T$  były skróceniami, a na wyższych poziomach naprężeń — wydłużeniami. Wartości  $|\epsilon_\theta|$  są niewielkie w porównaniu z wartościami  $|\epsilon_z|$  i  $|\epsilon_V|$ .

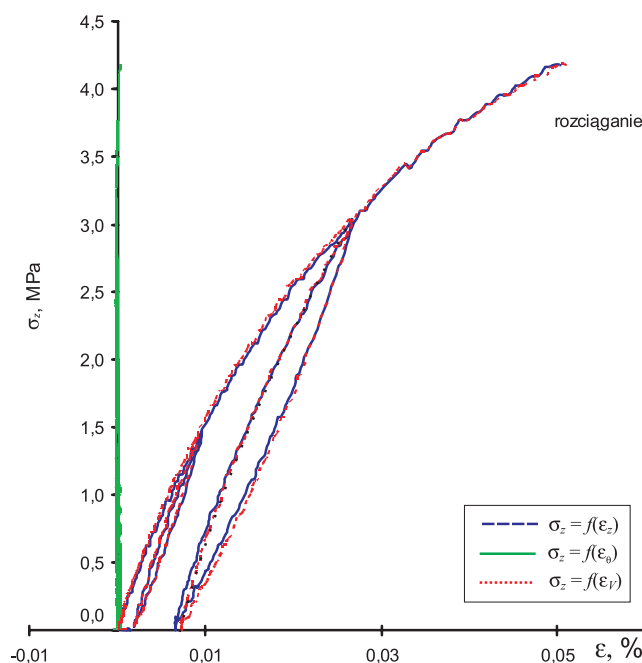


**Rys. 2.** Typowe charakterystyki naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie jednostkowe: podłużne  $\epsilon_z$ , poprzeczne  $\epsilon_\theta$  i objętościowe  $\epsilon_V$  skał poddanych próbom monocyklicznego rozciągania bezpośredniego

Własności odkształceniowe piaskowców Brenna i Jastrzębie oraz granitu Strzelin opisano (również) na podstawie charakterystyk naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie jednostkowe podłużne  $\epsilon_z$ , poprzeczne  $\epsilon_\theta$  i objętościowe  $\epsilon_V$  (zob. rys. 2 i 3). Charakterystykę naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie jednostkowe objętościowe  $\epsilon_V$  wykreślono, podob-

<sup>3</sup> Stosowano trzy układy trzech szeregowo połączonych tensometrów pionowych i poziomych (razem osiemnaście tensometrów).

nie jak w przypadku prób jednoosiowego ściskania, posługując się wartościami  $\epsilon_V$  obliczonymi na podstawie zmierzonych wartości odkształceń podłużnych  $\epsilon_z$  i poprzecznych  $\epsilon_0$  ( $\epsilon_V = \epsilon_z + 2\epsilon_0$ ) (rys. 3).



**Rys. 3.** Typowe charakterystyki naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie jednostkowe: podłużne  $\epsilon_z$ , poprzeczne  $\epsilon_0$  i objętościowe  $\epsilon_V$  skał poddanych próbom wielocyklicznego rozciągania bezpośredniego

Na podstawie rysunku 3 można stwierdzić, że skały doznają wyraźnych trwałych odkształceń podłużnych  $\epsilon_z^p$  i objętościowych  $\epsilon_V^p$  oraz znikomo małych — poprzecznych  $\epsilon_0^p$ . Wielkość tych odkształceń nieodwracalnych rośnie wraz z każdym kolejnym cyklem obciążania. Zdecydowana większość próbek skalnych doznawała kruchego makropęknięcia tensyjnego w pojedynczej quasi-płaszczyźnie zorientowanej prostopadle lub niemal prostopadle do kierunku działania obciążenia rozciągającego, przeważnie w środkowej części próbki, pomiędzy dolnym i górnym zespołem tensometrów.

Wszystkie skały miały zdecydowanie mniejszą wytrzymałość na rozciąganie niż na ściskanie (piaskowiec Brenna,  $\sigma_T / \sigma_C \approx 1/30$ ; piaskowiec Jastrzębie i granit Strzelin,  $\sigma_T / \sigma_C \approx 1/20$ ). Wytrzymałość graniczna na rozciąganie monocykliczne była nieco większa od wytrzymałości na rozciąganie wielocykliczne, ale różnice te były znikome i nie przekraczały 5% wytrzymałości na rozciąganie monocykliczne. Średnie wartości wytrzymałości granicznej na mono- i wielocykliczne rozciąganie były równe:  $\sigma_T \approx 3,0$  MPa dla piaskowca Brenna,  $\sigma_T \approx 5,2$  MPa dla piaskowca Jastrzębie i  $\sigma_T \approx 11,5$  MPa dla granitu Strzelin.

#### 4. Różnice jakościowe oraz ilościowe zjawiska odkształcania się skał przy rozciąganiu i przy ściskaniu

O różnicach jakościowych i ilościowych zjawiska odkształcania się skał przy rozciąganiu i przy ściskaniu świadczą charakterystyki  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$ ,  $\sigma_z = f(\varepsilon_0)$  i  $\sigma_z = f(\varepsilon_V)$ . Przy ściskaniu charakterystyki  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$  początkowo były wypukłe, później miały kształt quasi-liniowy, a na poziomach naprężeń poprzedzających makrozniszczenie były wklęsłe. Na charakterystykach  $\sigma_z = f(\varepsilon_0)$ , bardzo stromych przy niewysokich poziomach naprężenia, także można było wyróżnić przedział zachowań liniowych, jednak był on zazwyczaj krótszy. Jak wynika z charakterystyk  $\sigma_z = f(\varepsilon_V)$ , objętość skał początkowo malała. Jednak odkształcenia poprzeczne (wydłużenia) wraz ze wzrostem poziomu naprężenia szybko rosły, a więc zjawisko kompaktacji słabło. Po przekroczeniu progu dylatacji bezwzględnej  $\sigma_D$  objętość skał zaczynała rosnać.

Dla prób rozciągania wszystkie trzy charakterystyki  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$ ,  $\sigma_z = f(\varepsilon_0)$  i  $\sigma_z = f(\varepsilon_V)$  mają charakter nieliniowy; charakterystyki  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$ , i  $\sigma_z = f(\varepsilon_V)$  są wklęsłe w całym przedziale naprężeń  $\sigma_z$  (rys. 2 i 3).

Skały doznają wyraźnych odkształceń podłużnych  $\varepsilon_z$  i bardzo niewielkich poprzecznych  $\varepsilon_0$ . Na wykresach naprężenie  $\sigma_z$  — odkształcenie  $\varepsilon_0$  objawia się to tym, że charakterystyka  $\sigma_z = f(\varepsilon_0)$  niemal przylega do osi (pionowej)  $\sigma_z$ , a charakterystyka  $\sigma_z = f(\varepsilon_V)$  niemal pokrywa się z charakterystyką  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$ . To zjawisko jest zdecydowanie inne od tego obserwowanego w przypadku prób jednoosiowego ściskania, podczas których odkształcenia poprzeczne  $\varepsilon_0$  były znaczące i miały duży wpływ na kształt charakterystyk  $\sigma_z = f(\varepsilon_V)$ .

Charakterystyki  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$  i  $\sigma_z = f(\varepsilon_0)$  przy obciążaniu zarówno podczas prób monotonicznego, jak i wielocyklicznego rozciągania są wklęsłe, a przy odciążaniu (próby wielocykliczne) — wypukłe. Zjawisko to jest bardziej wyraźne w przypadku badanych piaskowców niż w przypadku granitu.

Charakterystyki  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$  i  $\sigma_z = f(\varepsilon_0)$  były nieliniowe; nie można było wyróżnić na nich przedziałów, w których przyrosty naprężeń  $\Delta\sigma_z$  byłyby proporcjonalne do przyrostów odkształceń  $\Delta\varepsilon_z$  (lub  $\Delta\varepsilon_0$ ). Tym samym nie można było oznaczyć liniowego współczynnika odkształcalności podłużnej  $E_l$ . Nie można było również oznaczyć wartości współczynnika Poissona  $\nu$  w taki sam sposób, jak w przypadku prób na ściskanie. Dlatego wyznaczono przyrostowy współczynnik Poissona  $\nu_m$  (zob. [1]) przyjmując kryterium najmniejszych rejestrówalnych przyrostów odkształceń poprzecznych  $\Delta\varepsilon_0$ .

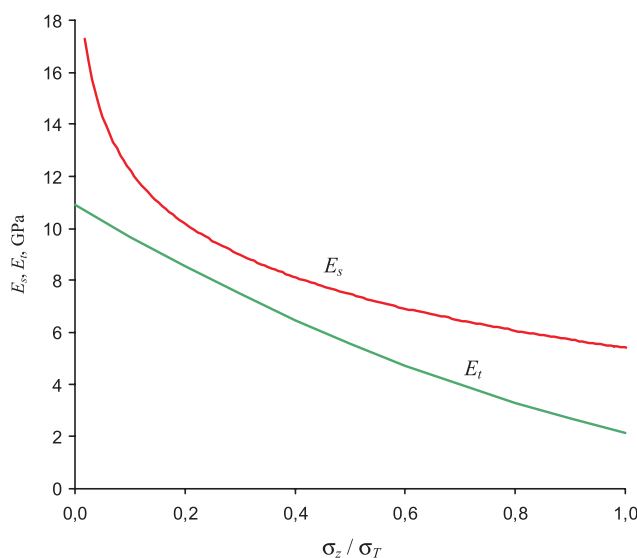
Charakterystyki naprężenie — odkształcenie przy rozciąganiu i ściskaniu są różne jakościowo. Przyrosty odkształceń podłużnych i poprzecznych przy ściskaniu przy niewielkich oraz poprzedzających zniszczenie poziomach naprężeń były duże, a dla pewnych przedziałów naprężeń stałe (część liniowa charakterystyk).

Przy rozciąganiu odkształcenia podłużne  $\varepsilon_z$  i objętościowe  $\varepsilon_V$  są jednoimienne (i rosną w całym przedziale naprężeń  $\sigma_z$ ), natomiast odkształcenia poprzeczne  $\varepsilon_0$  mogą być różnoimienne.

W przypadku prób rozciągania nie zarejestrowano gwałtownego przyrostu odkształceń ani podłużnych, ani poprzecznych, które byłyby zwiastunem zniszczenia materiału skalnego.

Uwagę zwracają także: różnice w wielkościach odkształceń podłużnych  $\varepsilon_z$  przy rozciąganiu i przy ściskaniu, odniesione do znormalizowanego naprężenia ściskającego  $\sigma_z / \sigma_C$  lub rozciągającego  $\sigma_z / \sigma_T$  oraz znikomo małe (w porównaniu z próbami jednoosiowego ściskania) odkształcenia poprzeczne  $\varepsilon_\theta$  przy rozciąganiu.

Zarówno w warunkach rozciągania monocyklicznego, jak i wielocyklicznego sieczne oraz styczne współczynniki odkształcalności podłużnej  $E_s$  i  $E_t$  dla skał przyjmują wartości największe na niskich, a najmniejsze — na wysokich poziomach naprężeń. Tempo odkształceń chwilowych i całkowitych rośnie wraz ze wzrostem poziomu naprężenia  $\sigma_z / \sigma_T$  (np. w przypadku rozciągania monocyklicznego współczynniki  $E_s$  i  $E_t$  dla  $\sigma_z / \sigma_T \approx 0,3$  przyjmują wartości od około 10 GPa (piaskowiec Brenna) do ponad 50 GPa (granit Strzelin), a dla  $\sigma_z / \sigma_T = 1$  od około 1 GPa (piaskowiec Brenna) do 40 GPa (granit Strzelin)) (rys. 4). Odkształcalność skał w przedziale naprężeń rozciągających sięgających danego poziomu  $\sigma_z / \sigma_T$  jest przeważnie mniejsza od odkształcalności chwilowej odpowiadającej temu poziomowi.



**Rys. 4.** Typowe zależności pomiędzy siecznym  $E_s$  i stycznym  $E_t$  współczynnikiem odkształcalności podłużnej a poziomem naprężenia rozciągającego  $\sigma_z / \sigma_T$  oznaczone w wyniku prób monocyklicznego rozciągania bezpośredniego

Sieczne współczynniki odkształcalności podłużnej  $E_s$  są większe od współczynników stycznych  $E_t$  na poziomach naprężeń  $\sigma_z / \sigma_T > 0,1$ . Wraz ze wzrostem naprężenia  $\sigma_z$  różnice pomiędzy  $E_s$  i  $E_t$  powiększają się.

Wartości stycznych  $E_t$  i siecznych  $E_s$  współczynników odkształcalności podłużnej maleją wraz ze wzrostem poziomu naprężeń rozciągających, podczas gdy w przypadku prób ściskania wartość liniowego współczynnika odkształcalności podłużnej  $E_t$  jest stała w dłuższym lub krótszym przedziale naprężeń ściskających.



Tempo spadku wartości współczynników  $E_s$  i  $E_t$  wraz ze wzrostem poziomu naprężenia  $\sigma_z / \sigma_T$  jest podobne w przypadku obu piaskowców (choć wartości  $E_s$  oraz  $E_t$  były różne) i różne od tempa spadku  $E_s$  i  $E_t$  granitu (bardziej wyraźne).

Stosunek pomiędzy  $E_s$  i  $E_t$  wraz ze wzrostem poziomu naprężenia  $\sigma_z / \sigma_T$  od 0,5 do 1,0 rośnie najsilniej w przypadku granitu, słabiej w przypadku piaskowców.

W warunkach rozciągania wielocyklicznego odkształcalność skał rośnie po każdym kolejnym cyklu obciążania; maleją wartości  $E_s$  i  $E_t$ .

W przypadku piaskowców średnie wartości  $E_s$  i  $E_t$  oznaczone w próbie rozciągania monocyklicznego były równe lub większe od średnich wartości  $E_s$  i  $E_t$  uzyskanych na podstawie prób rozciągania wielocyklicznego. Odwrotną zależność pomiędzy  $E_s$  i  $E_t$  zanotowano w przypadku granitu; średnia wartość siecznego  $E_s$  i stycznego  $E_t$  współczynnika odkształcalności podłużnej była wyraźnie mniejsza w przypadku prób rozciągania monocyklicznego.

Próbki skalne ulegały zniszczeniu podczas prób rozciągania przy wartościach odkształceń wielokrotnie mniejszych niż przy ściskaniu. Na przykład wydłużenia  $^F \epsilon_z$  dla piaskowca Brenna stanowią około 0,17 odkształceń całkowitych uzyskanych podczas prób ściskania, dla próbek piaskowca Jastrzębie stosunek ten wynosi około 0,15, a dla granitu Strzelin — 0,10.

Największe różnice w wartościach odkształceń przy rozciąganiu i ściskaniu występują w przypadku odkształceń poprzecznych  $\epsilon_\theta$ . Na granicy wytrzymałości  $\sigma_T$  odkształcenia  $\epsilon_\theta$  przy rozciąganiu próbek piaskowców stanowiły od 0,0029 (Brenna) do 0,0073 (Jastrzębie) odkształceń poprzecznych uzyskanych podczas ściskania. W przypadku granitu stosunek ten był większy, równy około 0,01.

Wszystkie skały poddane próbom rozciągania wielocyklicznego doznały wyraźnych odkształceń trwałych  $\epsilon_z^p$ . Tempo wzrostu tych odkształceń w każdym kolejnym z cykli obciążania było coraz większe (np. piaskowiec Jastrzębie:  $^I \epsilon_z^p \approx 0,0010\%$ ,  $^{II} \epsilon_z^p \approx 0,0038\%$  i  $^{III} \epsilon_z^p \approx 0,0066\%$ ; zob. rys. 5).

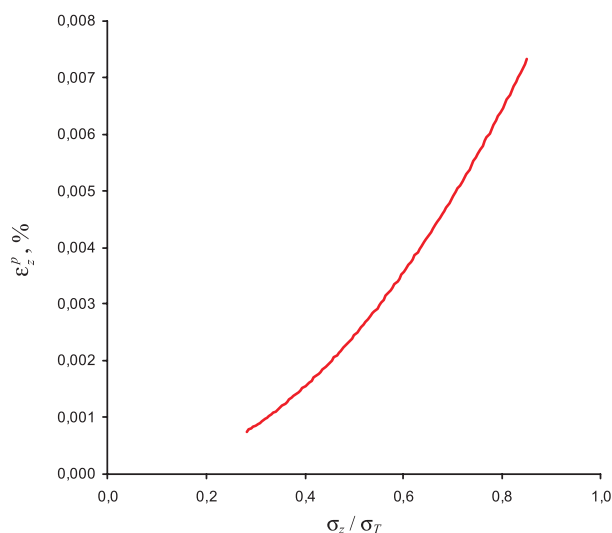
Największego przyrostu odkształceń trwałych skały doznawały w III cyklu obciążania (np. granit Strzelin  $\frac{^{III} \epsilon_z^p}{^I \epsilon_z^p} \approx 19$ , piaskowiec Brenna  $\frac{^{III} \epsilon_z^p}{^I \epsilon_z^p} \approx 11$  i piaskowiec Jastrzębie  $\frac{^{III} \epsilon_z^p}{^I \epsilon_z^p} \approx 6$ ).

Zbliżone były wartości stosunku pomiędzy odkształceniami trwałymi, których skały doznają po III cyklu obciążania, a ich odkształceniami całkowitymi (np. wartości ilorazu  $\frac{^{III} \epsilon_z^p}{^F \epsilon_z}$

dla piaskowca Brenna były równe od 1/7 do 1/6, dla piaskowca Jastrzębie od 1/8 do 1/4, a dla granitu Strzelin — od 1/8 do 1/3).

Wszystkie skały poddane próbom rozciągania bezpośredniego doznawały zjawiska dyatacji w całym przedziale naprężeń. Decydujący wpływ na wielkość odkształceń objętościowych  $\epsilon_V$  miały odkształcenia podłużne  $\epsilon_z$ , które były wydłużeniami. Odkształcenia poprzeczne  $\epsilon_\theta$  (wydłużenia lub skrócenia) były bardzo niewielkie i miały znikomą wpływ na wielkość odkształceń objętościowych  $\epsilon_V$ .

Takie zachowanie się skał przy rozciąganiu jest diametralnie różne od ich zachowania się przy ściskaniu. Przy ściskaniu bowiem objętość skał najpierw maleje, a po przekroczeniu progu dyatacji bezwzględnej  $\sigma_D$  — rośnie.



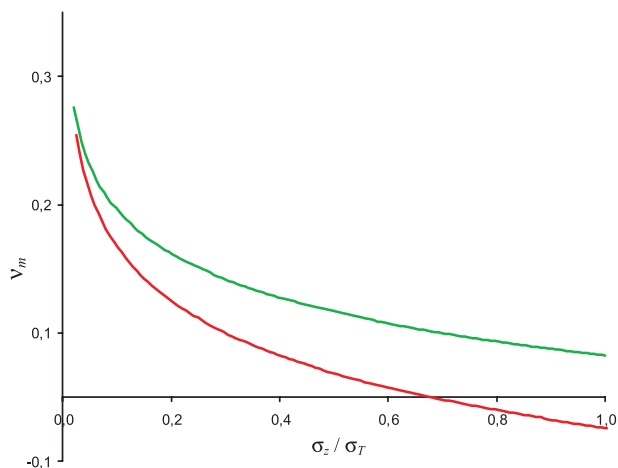
**Rys. 5.** Typowa zależność pomiędzy odkształceniami trwałymi  $\epsilon_z^p$  a poziomem naprężenia rozciągającego  $\sigma_z / \sigma_T$  dla skał poddanych próbom wielocyklicznego rozciągania bezpośredniego

Wartości średnich odkształceń objętościowych dla ostatniego stadium obciążania ( ${}^F\epsilon_V$ ) były wyraźnie większe od wartości po pierwszym cyklu rozciągania ( ${}^I\epsilon_V$ ) (np. dla piaskowca Brenna:  ${}^F\epsilon_V / {}^I\epsilon_V = 13,6$ ,  ${}^F\epsilon_V = 0,0851\%$ ,  ${}^I\epsilon_V = 0,0062\%$ ; dla piaskowca Jastrzębie  ${}^F\epsilon_V / {}^I\epsilon_V = 6,8$ ,  ${}^F\epsilon_V = 0,0474\%$ ,  ${}^I\epsilon_V = 0,0070\%$ , a dla granitu Strzelin  ${}^F\epsilon_V / {}^I\epsilon_V = 6,5$ ,  ${}^F\epsilon_V = 0,0368\%$ ,  ${}^I\epsilon_V = 0,0057\%$ ). Odkształcenia objętościowe na granicy wytrzymałości przy rozciąganiu monocyklicznym były mniejsze (lub równe) od tych w próbach rozciągania wielocyklicznego i wynosiły dla piaskowca Brenna  ${}^F\epsilon_V = 0,0708\%$ , dla piaskowca Jastrzębie  ${}^F\epsilon_V = 0,0378\%$ , a dla granitu Strzelin  ${}^F\epsilon_V = 0,0372\%$ .

Skały doznawały bardzo niewielkich odkształceń poprzecznych  $\epsilon_\theta$  (w skrajnych przypadkach nawet 200 razy mniejszych od odkształceń podłużnych  $\epsilon_z$ , np. próbka Brenna 21 część dolna<sup>4</sup>,  ${}^F\epsilon_z = 0,09\%$ ,  ${}^F\epsilon_\theta = 0,005\%$ ,  ${}^F\epsilon_\theta / {}^F\epsilon_z = 1/18$ , piaskowiec Jastrzębie próbka 1E, część środkowa,  ${}^F\epsilon_z = 0,07\%$ ,  ${}^F\epsilon_\theta = 0,0004\%$ ,  ${}^F\epsilon_z / {}^F\epsilon_\theta = 199$ ; próbka 2 granitu Strzelin, część górna,  ${}^F\epsilon_z = 0,0046\%$ ,  ${}^F\epsilon_\theta = 0,0004\%$ ,  ${}^F\epsilon_z / {}^F\epsilon_\theta = 12$ ). Dla niewysokich poziomów naprężeń rozciągających  $\sigma_z / \sigma_T < 0,3$  odkształcenia poprzeczne  $\epsilon_\theta$  były zawsze skróceniami (znak „-”), a dla poziomów naprężeń  $\sigma_z / \sigma_T > 0,45$  w przypadku większości próbek piaskowców Brenna i Jastrzębie skróceniami (znak „-”) lub wydłużeniami (znak „+”; przede wszystkim w przypadku granitu Strzelin).

Chwilowy współczynnik Poissona  $\nu_m$  na niewielkich poziomach naprężeń  $\sigma_z / \sigma_T$  przyjmował wartości stosunkowo wysokie (sięgające dla obu piaskowców 0,5). Wraz ze wzrostem poziomu naprężenia rozciągającego  $\sigma_z / \sigma_T$  współczynnik  $\nu_m$  malał (rys. 6).

<sup>4</sup> Nie podjęto próby wyjaśnienia (ewentualnie pojawiających się) różnic pomiędzy wartościami odkształceń w różnych częściach próbki. Założyłem, że próbka znajduje się w jednorodnym polu naprężeń i odkształceń.



**Rys. 6.** Typowe zależności pomiędzy chwilowym współczynnikiem Poissona  $\nu_m$  a poziomym naprężeniem rozciągającym  $\sigma_z / \sigma_T$  dla piaskowców i granitu

Dla większości próbek piaskowców po przekroczeniu naprężenia  $\sigma_z$  równego  $0,45\sigma_T$  współczynnik Poissona  $\nu_m$  przyjmuje wartości ujemne; piaskowce doznają wydłużeń zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym. Dla granitu współczynnik Poissona  $\nu_m$  był zawsze dodatni.

## 5. Podsumowanie

Proces odkształcania się skał przy rozciąganiu jest jakościowo różny od tego, który towarzyszy ścisnaniu. Świadczą o tym różne dla rozciągania i ścisnania kształty charakterystyk naprężenie  $\sigma_z$  — odkształcenie  $\epsilon$ . Proces odkształcania się skał przy rozciąganiu jest procesem nieliniowym i częściowo odwracalnym. Skały ulegają dylatacji w całym przedziale naprężeń rozciągających. Procesowi zniszczenia nie zapowiada gwałtowny przyrost odkształceń.

### LITERATURA

- [1] *Tomiczek K.*: Właściwości procesu odkształcania się i kruchego pęknięcia skał przy rozciąganiu. Praca doktorska. Gliwice, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska 2006
- [2] *Tomiczek K.*: O własnościach odkształceniowych skał przy rozciąganiu. Materiały konferencyjne IX Międzynarodowego Sympozjum Geotechnika 2000, Gliwice – Ustroń 2000

