

Krzysztof Marian Tomiczek\*

## ZMIENNA USZKODZENIA $D$ DLA SKAŁ PODDANYCH PRÓBOM JEDNOOSIOWEGO ROZCIĄGANIA

---

### 1. Podstawowe informacje o zmiennej uszkodzenia $D$ [6, 7]<sup>1)</sup>

Materiały ulegają odkształceniom pod wpływem obciążenia. Odkształcenia możemy podzielić na sprężyste i niesprężyste. Mogą one zależeć lub być niezależne od czynnika czasu. Zniszczenie może zachodzić w sposób ciągły lub kruchy. Kształt charakterystyk naprężenie  $\sigma_z$  — odkształcenie  $\varepsilon$  zależy w dużej mierze od budowy materiałów, struktury atomów, temperatury i prędkości obciążenia. Materiały krystaliczne i amorficzne mają inne właściwości odkształceniowe, kiedy występują jako pojedyncze kryształy i wtedy, kiedy występują w formie polikryształów. Pełne zrozumienie zjawiska odkształcania się danego materiału wymaga znajomości jego budowy wewnętrznej. Własności odkształceniowe opisywane są poprzez równania konstytutywne, które opierają się na mikromechanice, metodach statystycznych lub też na badaniach eksperymentalnych. Badania eksperymentalne są również narzędziami weryfikującymi proponowane rozwiązania teoretyczne.

Najczęściej równania konstytutywne opisują materiał jako ośrodek ciągły, tzn. nie nawiązują do jego struktury atomowej. Powszechnie zmiany wymiarów lub kształtu opisuje się poprzez odkształcenie, a rozkład sił wewnętrznych w materiale — naprężenie. Takie podejście jest bardzo praktyczne i wygodne wtedy, kiedy badamy zachowanie się materiałów poddanych działaniu obciążenia, jednak nie znajduje odniesienia bezpośrednio do nieciągłej przecież struktury wewnętrznej materiału.

---

\* Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice

<sup>1)</sup> Opisy zaczerpnięto z czterech pozycji literaturowych. Autorem pierwszej z nich, *A Course on Damage Mechanics*, jest Jean Lemaitre (1991, 1996). Druga pozycja jest monografią *Continuum Damage Mechanics — Theory and Applications* pod redakcją Dusana Krajcinovica i Jeana Lemaitre'a (1987). Współautorami rozdziałów są m.in. J. Hult i J.L. Chaboche, jednak sposoby obliczania zmiennej uszkodzenia  $D$ , które stosowano, określono mianem *metod Lemaitre'a*. Ostatnie dwie najważniejsze pozycje to prace oraz informacje ustne Y. Ju (2002–2003) oraz Y. Ju i H. Xie (2000). Zmodyfikowane metody obliczania zmiennej uszkodzenia  $D$  oparte na ich pracach określono mianem *metody Ju*.

Struktura wewnętrzna materiału może ulegać uszkodzeniu już przy niewielkich obciążeniach. Pomiędzy ziarnami kryształów lub w nich samych powstają mikropęknięcia. W strefach koncentracji naprężeń mogą pojawiać się mikropustki, które powodują dalsze osłabienie materiału. Dokładna analiza tych zjawisk pozwala na opisanie procesu zniszczenia.

W pionierskiej w dziedzinie mechaniki uszkodzeń pracy Kachanov (1958) zaproponował opisanie zjawiska uszkodzenia materiałów za pomocą bezwymiarowej zmiennej ciągłości  $\psi$ , która umożliwiłaby modelowanie naturalnie nieciągłego procesu uszkodzenia materiału za pomocą wielkości ciągłej.

Zmienna  $\psi$  związana jest z pogarszaniem się materiału. Ze zmienną tą wiąże się inna wielkość  $D$ , gdzie  $D \equiv 1 - \psi$ , która opisuje stopień uszkodzenia materiału. Zmienna ta ( $D$ ) nazywana jest zmienną uszkodzenia.

Dla materiału nieuszkodzonego  $D = 0$ , a dla zupełnie zniszczonej struktury wewnętrznej materiału  $D = 1$ . I to właśnie ta zmienna uszkodzenia  $D$  znalazła szerokie zastosowanie w opisie stopnia uszkodzenia materiałów.

## 2. Zmienna uszkodzenia $D$ według Lemaitre'a (1987) dla skał poddanych próbom rozciągania bezpośredniego

Wzrost obciążenia podczas prób jednoosiowego rozciągania powoduje stopniowe uszkodzenie struktury wewnętrznej materiału, propagację mikropęknięć i powstawanie pustek.

$D$  można wyznaczyć na podstawie charakterystyki naprężenie (normalne)  $\sigma$  — odkształcenie (podłużne)  $\varepsilon$  (materiału uszkodzonego) z zależności:

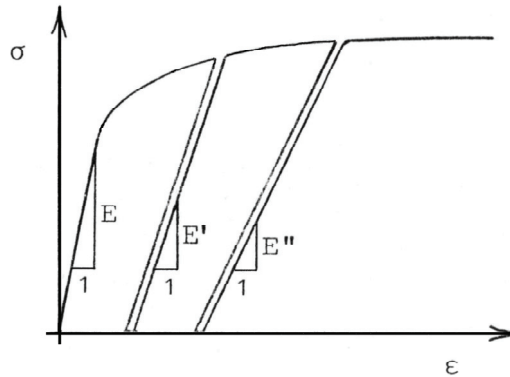
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad (1)$$

Dla obciążania wielocyklicznego otrzymujemy (zob. [5], rys. 1):

$$D' = 1 - \frac{E'}{E} \quad (2)$$

$$D'' = 1 - \frac{E''}{E} \quad (3)$$

Można zatem odnieść uszkodzenie  $D$  do kolejnych poziomów odkształcenia, a zmienna uszkodzenia  $D$  dla materiałów o innym kształcie charakterystyk naprężenie  $\sigma$  — odkształcenie  $\varepsilon$  niż te przedstawione na rysunku 1 może być wyznaczana w ten sam sposób.



**Rys. 1.** Sposób wyznaczania współczynników odkształcalności podłużnej wg Lemaitre'a dla kolejnych cykli obciążania przy jednoosiowym rozciąganiu wielocyklicznym;  $\sigma$  — naprężenie normalne,  $\varepsilon$  — odkształcenie jednostkowe podłużne,  $E$  — moduł sprężystości (Hult, 1987)

### 3. Zmienna uszkodzenia $D$ według Ju (2000) dla skał poddanych próbom rozciągania bezpośredniego

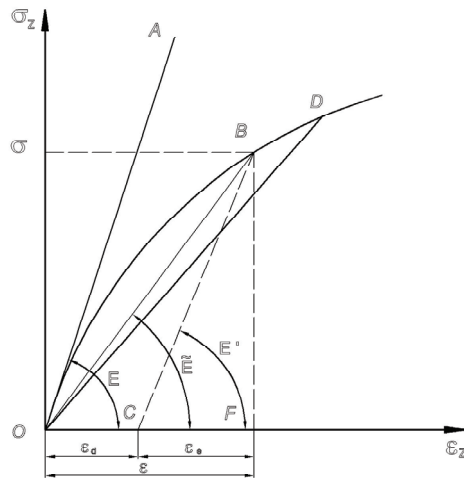
W rzeczywistości zmienna uszkodzenia  $D$  opisana za pomocą modułu sprężystości<sup>2)</sup> uszkodzonego materiału powinna być stosowana tylko w przypadku materiałów sprężystych, jednak powszechnie metoda ta jest stosowana także w przypadku materiałów sprężysto-plastycznych. Moduł sprężystości zastępowany jest modulem odkształcalności materiału uszkodzonego. Niestety, takie podejście uniemożliwia zmierzenie uszkodzenia materiałów sprężysto-plastycznych, ponieważ moduł sprężystości nie jest przecież modulem odkształcalności materiału uszkodzonego.

Niektórzy badacze prowadząc pionierskie w tej dziedzinie badania uznali, że odkształcenie nie zawsze jest jednoznaczne z uszkodzeniem materiału. Właściwsze zatem wydaje się zastąpienie modułu sprężystości innym współczynnikiem odkształcalności podłużnej w celu opisanego zmiennej uszkodzenia  $D$  dla materiału skalnego (zob. rys. 2 i 3).

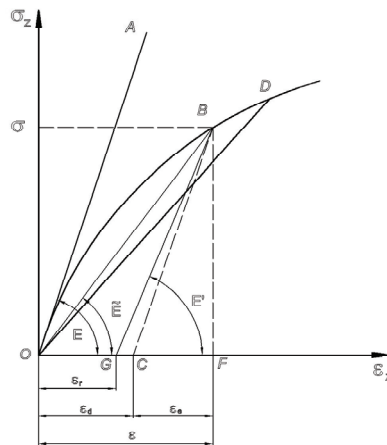
Uszkodzenie materiałów zarówno sprężystych, jak i sprężysto-plastycznych, tzn. takich, które doznają odkształceń trwałych, można opisać na podstawie charakterystyk naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie podłużne  $\varepsilon_z$  dla materiału nieliniowo-sprężystego i sprężysto-plastycznego za pomocą równania (zob. [3]):

$$D = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon}\right) \left(\frac{E'}{E}\right) \quad (4)$$

<sup>2)</sup> *Elastic modulus* (moduł sprężystości). Pozostawiono oryginalne nazwy podawane przez Autorów.



**Rys. 2.** Sposób wyznaczania modułu sprężystości  $E$ , modułu odkształcalności  $\tilde{E}$  modułu odpężenia  $E'$  dla materiału nieliniowo sprężystego;  $\varepsilon_d$  — odkształcenia trwałe,  $\varepsilon_e$  — odkształcenia sprężyste,  $\varepsilon$  — odkształcenia całkowite [3]



**Rys. 3.** Sposób wyznaczania modułów sprężystości  $E$ , odkształcalności  $\tilde{E}$  i odpężenia  $E'$  dla materiału sprężysto-plastycznego;  $\varepsilon_r$  — odkształcenia trwałe nie powodujące uszkodzenia [3]

#### 4. Metody wyznaczania zmiennej uszkodzenia $D$ piaskowców Brenna i Jastrzębie oraz granitu Strzelin

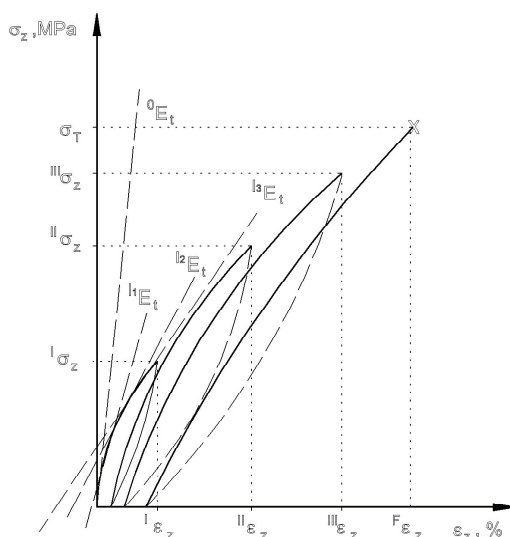
Wartości zmiennej uszkodzenia  $D$  wyznaczono dla kolejnych cykli obciążania, na podstawie charakterystyk naprężenie normalne  $\sigma_z$  — odkształcenie podłużne  $\varepsilon_z$  oznaczonych

w próbach monocyklicznego i wielocyklicznego rozciągania bezpośredniego smukłych walcowych próbek piaskowców Brenna i Jastrzębie oraz granitu Strzelin (zob. [8]), następującymi metodami:

- **Metoda I** (oparta na podejściu Lemaitre'a). Znając wartości stycznych współczynników odkształcalności podłużnej: początkowego  ${}^0E_t$  oraz  ${}^iE_t$  — dla maksymalnej wartości  $i\sigma_z^3$ , obliczono zmienną uszkodzenia  $D_{Lt}$  (rys. 4), stosując wzór<sup>4)</sup>:

$${}^iD_{Lt} = 1 - \frac{{}^iE_t}{{}^0E_t} \quad (5)$$

$i$  — nr cyklu.

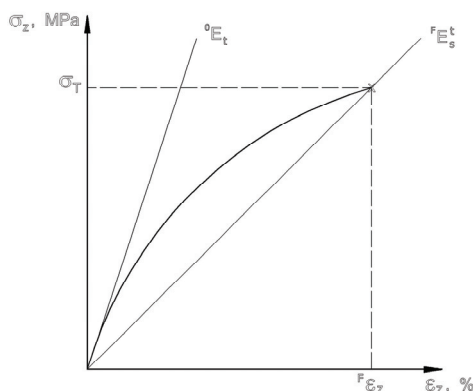


**Rys. 4.** Sposób wyznaczenia współczynników odkształcalności podłużnej  $E_t$  w celu obliczenia wartości zmiennej uszkodzenia  $D_{Lt}$  na podstawie funkcji aproksymujących empiryczną zależność pomiędzy naprężeniami normalnymi  $\sigma_z$  a odkształceniami podłużnymi  $\varepsilon_z$ .  ${}^0E_t$  — styczny współczynnik odkształcalności podłużnej materiału dziewiczego,  ${}^I E_t$ ,  ${}^II E_t$  i  ${}^III E_t$  — styczne współczynniki odkształcalności podłużnej odpowiadające poszczególnym wartościom naprężeń w cyklu I,  ${}^I \sigma_z$ ,  ${}^II \sigma_z$  i  ${}^III \sigma_z$  — naprężenia maksymalne dla kolejnych, trzech cykli obciążania,  $\sigma_T$  — wytrzymałość graniczna na rozciąganie ( $\sigma_T = {}^IV \sigma_z = {}^F \sigma_z$ ),  ${}^I \varepsilon_z$ ,  ${}^II \varepsilon_z$ ,  ${}^III \varepsilon_z$  i  ${}^F \varepsilon_z$  — maksymalne całkowite odkształcenia podłużne po zakończeniu każdego z czterech cykli

<sup>3)</sup>  ${}^i E_t$  zostały obliczone jako wartości pochodnych funkcji aproksymujących empiryczne oznaczone zależności pomiędzy naprężeniami normalnymi  $\sigma_z$  a odkształceniami podłużnymi  $\varepsilon_z$ .

<sup>4)</sup> Indeks górny poprzedzający symbol opisuje kolejny cykl obciążania I, II, III lub IV; cykl, podczas którego próbka uległa zniszczeniu, oznaczono literą F, a indeks górny oznacza, czy zmienna związana jest z odkształceniami całkowitymi  $t$ , czy sprężystymi  $e$ .

- **Metoda II** (oparta na podejściu Lemaitre'a). Dla próbek skalnych poddanych próbom monocyklicznego rozciągania bezpośredniego wyznaczono zmienną uszkodzenia  $D_{Ls}$ . Styczny  ${}^0E_t$  i sieczny  ${}^F E_s^t$  współczynnik odkształcalności podłużnej wyznaczono zgodnie z rysunkiem 5.



**Rys. 5.** Sposób wyznaczenia stycznego  ${}^0E_t$  i siecznego współczynnika odkształcalności podłużnej  ${}^F E_s^t$  w celu obliczenia zmiennej uszkodzenia  $D_{Ls}$  dla skał poddanych próbie monocyklicznego rozciągania bezpośredniego;  $\sigma_T$  — wytrzymałość graniczna na rozciąganie,  ${}^F \epsilon_z$  — odkształcenia podłużne na granicy wytrzymałości

Zgodnie z rysunkiem 5 wzór (5) przyjmuje postać:

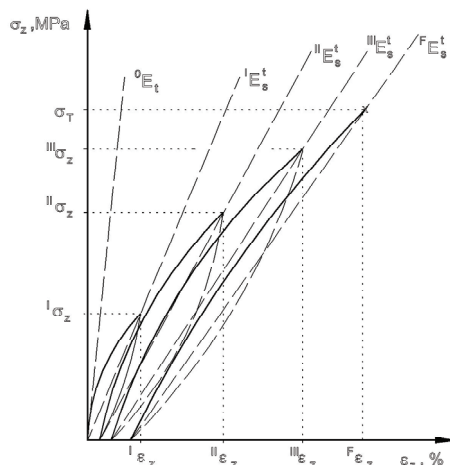
$$D_{Ls} = 1 - \frac{{}^F E_s^t}{{}^0 E_t} \quad (6)$$

- **Metoda III** (oparta na podejściu Lemaitre'a). Dla próbek skalnych poddanych próbom wielocyklicznego rozciągania bezpośredniego wyznaczono zmienną uszkodzenia  $D_{Ls}$  w sposób proponowany przez Lemaitre'a, wyznaczając sieczne współczynniki odkształcalności podłużnej  ${}^F E_s^t$  dla każdego kolejnego cyklu obciążania (por. rys. 1 i 6):

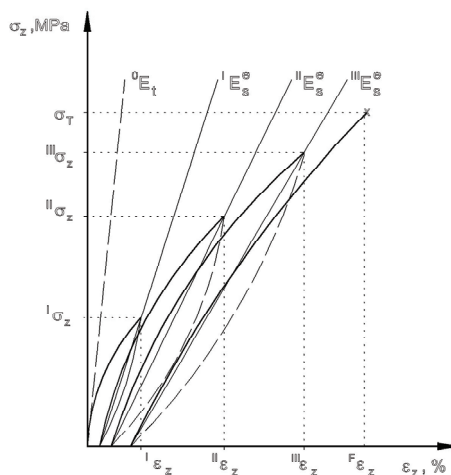
$${}^i D_{Ls} = 1 - \frac{{}^i E_s^t}{{}^0 E_t} \quad (7)$$

- **Metoda IV** (oparta na podejściu Ju, 2000; zob. rys. 7). Dla skał poddanych próbom wielocyklicznego rozciągania bezpośredniego wyznaczono zmienną uszkodzenia  $D_{Js}$ :

$${}^i D_{Js} = 1 - \left( 1 - \frac{{}^i \epsilon_p}{{}^i \epsilon_z} \right) \cdot \left( \frac{{}^i E_s^e}{{}^0 E_t} \right) \quad (8)$$



**Rys. 6.** Sposób wyznaczenia siecznych współczynników odkształcalności podłużnej  ${}^I E_s^t$ ,  ${}^{II} E_s^t$ ,  ${}^{III} E_s^t$  i  ${}^F E_s^t$  w celu wyznaczenia zmiennej uszkodzenia  ${}^I D_{I_s}$ ,  ${}^I E_s^t$ ,  ${}^{II} E_s^t$ ,  ${}^{III} E_s^t$  i  ${}^F E_s^t$  odnoszą się do podłużnych odkształceń całkowitych, których doznaje próbka po każdym z czterech cykli obciążania;  $\sigma_z$  — naprężenia normalne,  ${}^I \epsilon_z$ ,  ${}^{II} \epsilon_z$ ,  ${}^{III} \epsilon_z$  i  ${}^F \epsilon_z$  — całkowite odkształcenie podłużne odpowiadające kolejnym cyklom obciążania.  ${}^0 E_t$  — styczny współczynnik odkształcalności podłużnej materiału dziewiczego,  ${}^I \sigma_z$ ,  ${}^{II} \sigma_z$  i  ${}^{III} \sigma_z$  — naprężenia maksymalne dla kolejnych trzech cykli obciążania,  $\sigma_T$  — wytrzymałość graniczna na rozciąganie ( $\sigma_T = {}^{IV} \sigma_z = {}^F \sigma_z$ )



**Rys. 7.** Sposób wyznaczenia stycznego  ${}^0 E_t$  i siecznych  ${}^I E_s^e$ ,  ${}^{II} E_s^e$ ,  ${}^{III} E_s^e$  oraz  ${}^F E_s^e$  współczynników odkształcalności podłużnej w celu obliczenia zmiennej uszkodzenia  $D_{I_s}$ ;  $\sigma_z$  — naprężenia normalne,  ${}^I \epsilon_z$ ,  ${}^{II} \epsilon_z$ ,  ${}^{III} \epsilon_z$  i  ${}^F \epsilon_z$  — całkowite odkształcenie podłużne odpowiadające kolejnym cyklom obciążania,  ${}^0 E_t$  — styczny współczynnik odkształcalności podłużnej materiału dziewiczego,  ${}^I \sigma_z$ ,  ${}^{II} \sigma_z$  i  ${}^{III} \sigma_z$  — maksymalne naprężenia normalne dla kolejnych, trzech cykli obciążania,  $\sigma_T$  — wytrzymałość graniczna na rozciąganie ( $\sigma_T = {}^{IV} \sigma_z = {}^F \sigma_z$ )

Dla wszystkich próbek poddanych próbom rozciągania monocyklicznego wartości  $D_{Lt}$  były wyraźnie większe od wartości  $D_{Ls}$ . O takim stosunku  $D_{Lt}$  do  $D_{Ls}$  decydowały wartości stycznego  ${}^F E_t$  i siecznego  ${}^F E_s$  współczynnika odkształcalności podłużnej na granicy wytrzymałości. Dla wszystkich skał poddanych próbom rozciągania  ${}^F E_s$  był większy od  ${}^F E_t$  — kąt nachylenia siecznej charakterystyki  $\sigma_z = f(\epsilon_z)$  w punkcie odpowiadającym granicy wytrzymałości był większy od kąta nachylenia stycznej (do charakterystyki  $\sigma_z = f(\epsilon_z)$ ) w tym samym punkcie. Dla piaskowca Brenna wartości  $D_{Lt}$  wahały się od około 0,79 do około 0,93, w przypadku piaskowca Jastrzębie od około 0,58 do około 0,81, a dla granitu Strzelin od około 0,74 do około 0,82. Wartości średnie  $D_{Lt}$  dla tych skał na poziomie naprężenia  $\sigma_z / \sigma_T = 1,0$  były równe odpowiednio 0,87, 0,72 i 0,68.

Wartości zmiennej uszkodzenia  $D_{Ls}$  na poziomie naprężenia  $\sigma_z / \sigma_T = 1$  były wyraźnie mniejsze od 1 ( $D_{Ls} < 1$ ) i były różne dla różnych skał. Największe średnie wartości  $D_{Ls}$  zanotowałem dla granitu Strzelin ( $D_{Ls} \approx 0,54$ ), mniejsze w przypadku piaskowców Brenna ( $D_{Ls} \approx 0,64$ ) i Jastrzębie ( $D_{Ls} \approx 0,46$ ). Należy jednak zaznaczyć, że wartości zmiennej uszkodzenia  $D_{Ls}$  były różne w obrębie tej samej skały. W przypadku granitu Strzelin  $D_{Ls}$  były równe od około 0,50 do około 0,58, dla piaskowca Brenna mieściły się w przedziale od 0,54 do 0,73, a w przypadku piaskowca Jastrzębie były równe od 0,31 do 0,73 (rys. 8).

Dla skał poddanych próbom wielocyklicznego rozciągania bezpośredniego wyznaczono zmienne uszkodzenia  $D_{Lt}$ ,  $D_{Ls}$  i  $D_{Js}$ .

Wartości  $D_{Lt}$  dla wszystkich skał poddanych próbom bezpośredniego rozciągania wielocyklicznego rosną wraz z każdym kolejnym cyklem obciążania. Tempo tego wzrostu maleje. Dla bardzo niewielkich poziomów naprężeń  $\sigma_z / \sigma_T$  zmienna uszkodzenia  $D_{Lt}$  przyjmuje niewysokie wartości ujemne<sup>5)</sup>.

Zmienna uszkodzenia  $D_{Js}$  przyjmuje nieco większe wartości od zmiennej uszkodzenia  $D_{Ls}$  na wszystkich poziomach naprężeń  $\sigma_z / \sigma_T$  (rys. 9)<sup>6)</sup>. Położenie punktów odpowiadających wartościom  $D_{Js}$  i  $D_{Ls}$  dla poziomów naprężenia  $\sigma_z / \sigma_T \approx 0,5$  pozwala na przyjęcie założenia, że aproksymując wszystkie<sup>7)</sup> wartości  $D_{Js}$  i  $D_{Ls}$  funkcją nieliniową, charakterystyki  $D_{Js}$  i  $D_{Ls}$  —  $\sigma_z / \sigma_T$  byłyby dla piaskowców Brenna i Jastrzębie wklęsłe, a w przypadku granitu Strzelin — wypukłe. Ten odmienny kształt charakterystyk sygnalizowałby różne tempo wzrostu wartości zmiennych uszkodzenia  $D_{Js}$  i  $D_{Ls}$  wraz ze wzrostem poziomu naprężeń  $\sigma_z / \sigma_T$ . Jedynie w kilku przypadkach zdarzyło się, że wartości  ${}^F D_{Ls}$  były mniejsze od  ${}^{III} D_{Ls}$ .

Dla wszystkich skał wartości  $D_{Lt}$  są wyraźnie większe od wartości  $D_{Ls}$  i  $D_{Js}$  (zob. rys. 9, por. tab. 1). Różnice pomiędzy tymi wartościami wynikają wprost z różnych sposobów obliczania zmiennej uszkodzenia  $D$ . Wiążąc zmienną uszkodzenia  $D$  ze stycznymi współczynnikami odkształcalności podłużnej  $E_t$  w taki sposób, jak zakładał Lemaitre, otrzymujemy jej wyższe wartości. Podejście Lemaitre'a uwzględnia jednak tylko w sposób pośredni odkształcenia trwałe, których doznają próbki skalne poddane jednoosiowemu rozciąganiu.

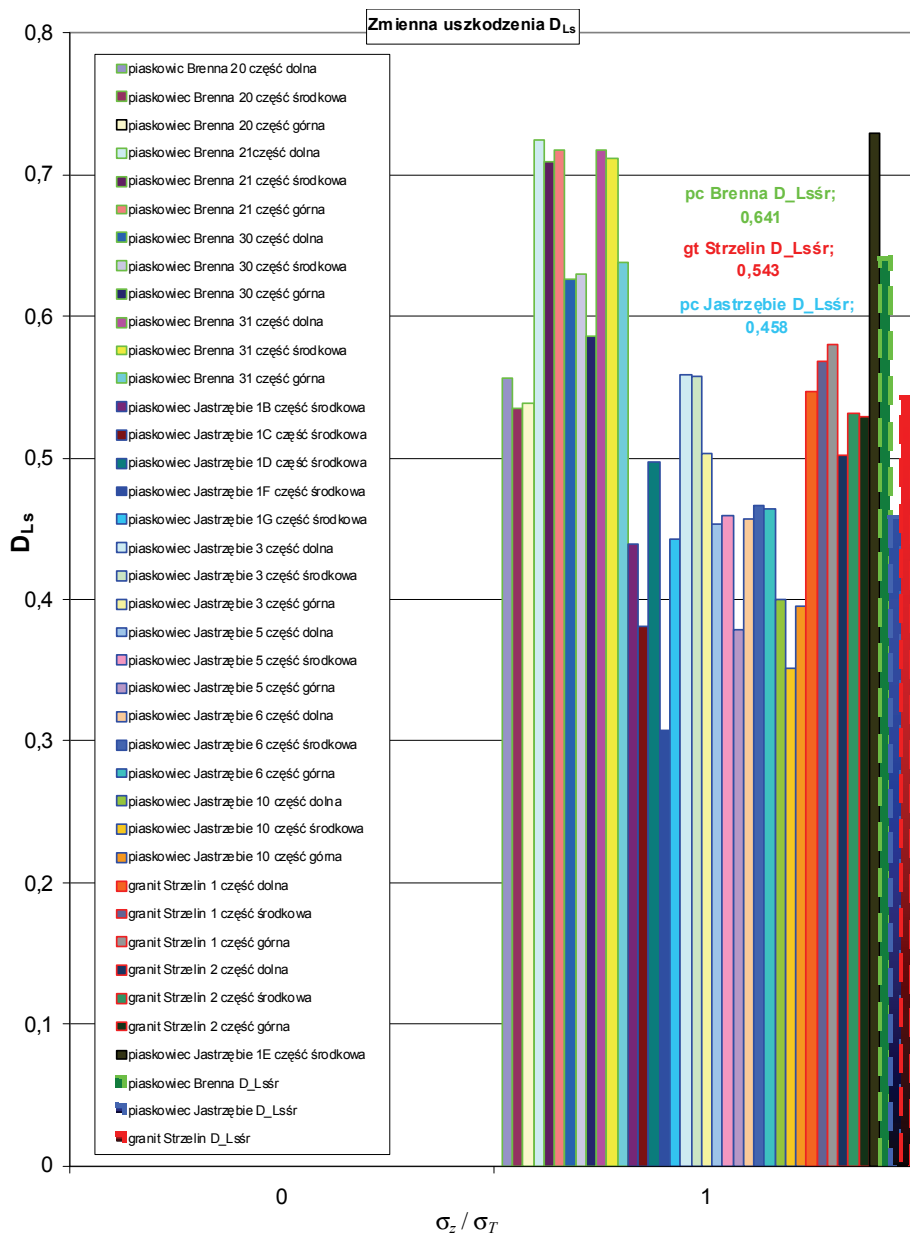
<sup>2)</sup> Dla niewielkich poziomów naprężeń  $\sigma_z / \sigma_T$  styczny współczynnik odkształcalności podłużnej  ${}^I E_t$  był w niektórych przypadkach większy od  ${}^0 E_t$  (zob. Tomiczek, 2006).

<sup>2)</sup> Zdarzyły się jedynie trzy takie przypadki, kiedy  $D_{Ls} > D_{Js}$  (Tomiczek, 2006).

<sup>2)</sup> Tzn. w całym przedziale naprężeń  $\sigma_z / \sigma_T$ .

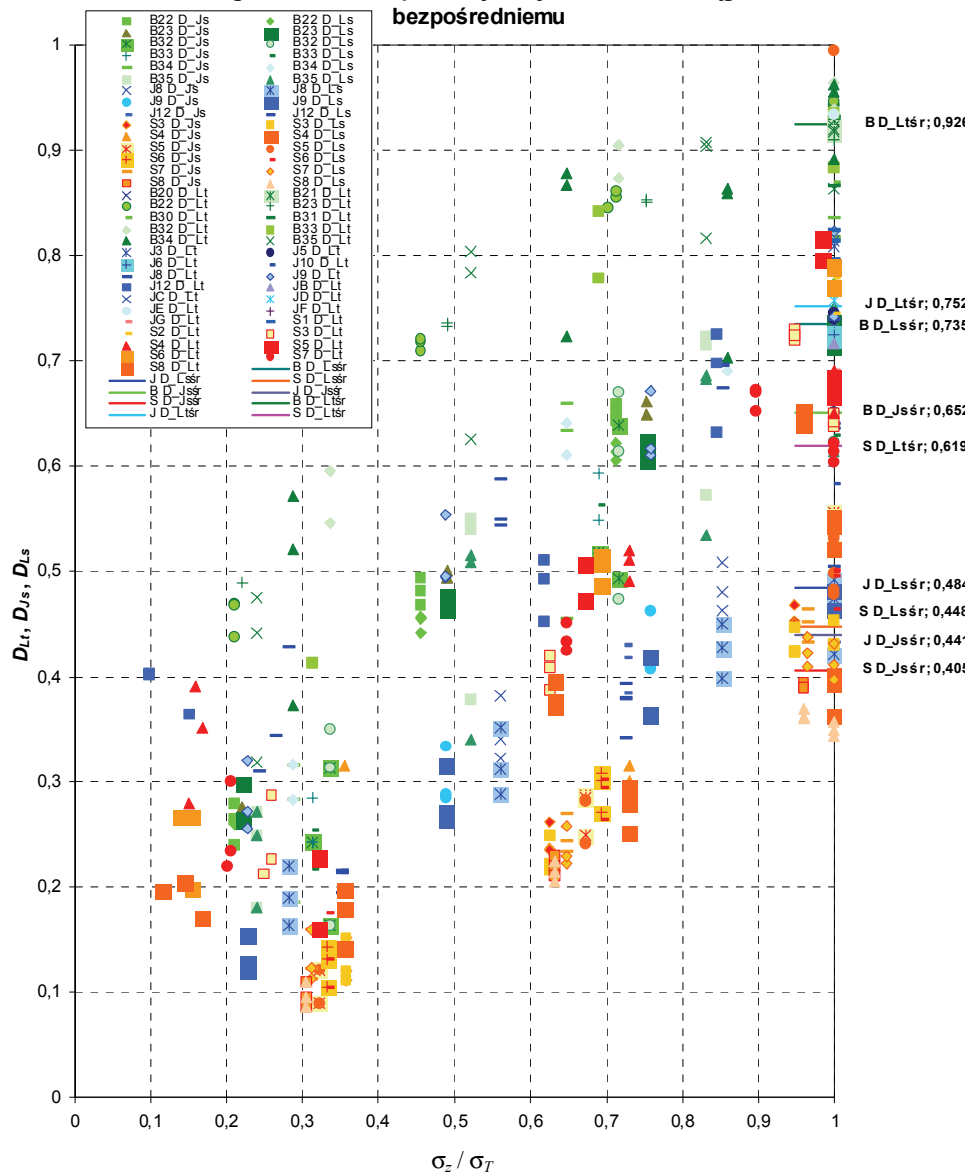


Współczynniki odkształcalności podłużnej  $E_t$  wyznaczone są na podstawie krzywych obciążania, a nie odciążania.



Rys. 8. Zmienna uszkodzenia  $D_{Ls}$  skał poddanych próbom monocyklicznego rozciągania bezpośredniego. Wartości średnie  $D_{Ls}$  wyróżniłem liniami przerywanymi

Zmienne uszkodzenia  $D_{Lt}$ ,  $D_{Ls}$  i  $D_{Js}$  piaskowców Brenna i Jastrzębie oraz granitu Strzelin poddanych cyklicznemu rozciąganiu bezpośredniemu



**Rys. 9.** Zależność pomiędzy zmiennymi uszkodzenia  $D_{Lt}$ ,  $D_{Ls}$  i  $D_{Js}$  a znormalizowanym naprężeniem rozciągającym  $\sigma_z / \sigma_T$  dla próbek poddanych próbom jednoosiowego rozciągania wielocyklicznego. W opisie legendy:  $B$  — piaskowiec Brenna (odcienie koloru zielonego),  $J$  — piaskowiec Jastrzębie (odcienie koloru czerwonego),  $S$  — granit Strzelin (odcienie koloru niebieskiego),  $S$  — granit Strzelin (odcienie koloru czerwonego),  $D_{Lt}$  — oznacza  $D_{Lt}$ ,  $D_{Ls}$  —  $D_{Ls}$  i  $D_{Js}$  —  $D_{Js}$ . Wartości średnie zmiennych uszkodzenia  $D_{Lt}$ ,  $D_{Ls}$   $D_{Js}$  dla  $\sigma_z / \sigma_T = 1$  zaznaczyłem liniami poziomymi

TABELA 1

Wartości średnie zmiennych uszkodzenia  $D_{Lt}$ ,  $D_{Ls}$  oraz  $D_{Js}$  piaskowców Brenna i Jastrzębie oraz granitu Strzelin dla poziomu naprężenia  $\sigma_z / \sigma_T = 1$

Zmienna uszkodzenia \ Skala	Piaskowiec Brenna	Piaskowiec Jastrzębie	Granit Strzelin
Bezpośrednie rozciąganie monocykliczne			
$D_{Lt}$	0,870	0,714	0,677
$D_{Ls}$	0,641	0,458	0,543
Bezpośrednie rozciąganie wielocykliczne			
$D_{Lt}$	0,926	0,752	0,619
$D_{Ls}$	0,735	0,484	0,448
$D_{Js}$	0,652	0,441	0,405

Modyfikując metodę Lemaitre'a i posługując się w obliczeniach zmiennej uszkodzenia  $D$  siecznymi współczynnikami odkształcalności podłużnej  $E_s$ , a tym samym uwzględniając pośrednio całkowite odkształcenia trwałe, otrzymuje się mniejsze wartości zmiennej uszkodzenia  $D$ . Wreszcie, uwzględniając odkształcenia trwałe, których doznają próbki skalne po każdym cyklu obciążania, i wiążąc zmienne uszkodzenia  $D$  ze współczynnikami sprężystości podłużnej  $E$  uwzględniającymi zarówno odkształcenia sprężyste, jak i plastyczne — otrzymujemy najniższe wartości zmiennej uszkodzenia  $D$ . Jednak wartości te zawsze są mniejsze od 1,0, czyli od wartości  $D$  teoretycznie założonej przez Lemaitre'a (zob. tab. 1).

## 5. Komentarz i wnioski

O wartościach zmiennych uszkodzenia skał w polu naprężeń rozciągających generalnie decydują sieczne  $E_s$  i styczne  $E_t$  współczynniki odkształcalności podłużnej. Zmienna uszkodzenia  $D_{Ls}$ , o wartości której decyduje  $E_t$ , przyjmuje zawsze większe wartości od zmiennej uszkodzenia  $D_{Lt}$  (i  $D_{Js}$ );  $E_t$  na granicy wytrzymałości jest zawsze mniejszy od  $E_s$ .

Na wartości  $D_{Js}$  (oprócz  $E_t$  i  $E_s$ ) wpływa stosunek  $\epsilon_p / \epsilon_z$ ; jednak w przypadku skał poddanych próbom rozciągania wartość tego stosunku jest niewielka, dlatego w przypadku tej metody (IV) również decydujący wpływ na wartości  $D_{Js}$  ma  $E_s$ .

Zmienna  $D_{Lt}$  zdeterminowana jest odkształcalnością chwilową na granicy wytrzymałości, podczas gdy w przypadku  $D_{Ls}$  zakłada się stałe tempo odkształceń dla danego cyklu obciążania.

Spośród czterech proponowanych metod optymalną metodą obliczania zmiennej uszkodzenia  $D$  jest metoda I ( ${}^iD_{Lt}$ ), ponieważ:

- o wartości  ${}^iD_{Lt}$  decyduje  $E_t$ , który jest miarą odkształcalności chwilowej. Gwałtowna niestabilna propagacja mikrouszkodzeń jest zwiastunem zniszczenia materiału. W pozostałych metodach zmienna  $D$  obliczana jest na podstawie charakteryzującego odkształcalność średnią  $E_s$ , który trudno jest traktować jako wielkość zapowiadającą zniszczenie materiału;
- skały poddane rozciąganiu doznają tak bardzo niewielkich odkształceń trwałych  $\epsilon_p$ , że odkształcenia te mają znikomy wpływ na wartości  $D_{Js}$ . Dlatego metoda IV, chociaż poprawna i uzasadniona teoretycznie (uwzględnia cechę lepkości materiału), na tym etapie badań nad zachowaniem się skał w polu naprężeń rozciągających wydaje się mniej użyteczna od metody I, w której notabene krucho-plastyczno-lepki charakter uszkodzenia ukryty jest w sposób pośredni we współczynniku  ${}^iE_t$  ( ${}^0E_t$ ).

#### LITERATURA

- [1] *Ju Y.*: A study on theory of fractal damage mechanics of concrete. Post-Doctoral Thesis, China University of Mining and Technology, Beijing, 1997
- [2] *Ju Y.*: Informacja ustna. Gliwice, 2002–2003
- [3] *Ju Y., Xie H.*: Applicability of damage definition based on hypothesis of strain equivalence. Journal of Coal Science & Engineering (China), vol. 6, No. 2, 9–14, 2000
- [4] *Kachanov L.M.*: Time to rupture process under creep conditions. Izv. Akad. Nauk SSSR, Otd. Tekhn. Nauk, vol. 8, 26–31, 1958
- [5] *Krajcinovic D., Lemaitre J. (eds.)*: Continuum Damage Mechanics — Theory and Applications. In Courses and Lectures, No. 295, CISM, Udine, 1987
- [6] *Lemaitre J.*: Sur la determination des Lois de Comportement des Materiaux Elasto-Viscoplastiques. Office National d'Etudes Recherches Aerospatiales, Report N. T. 186, 1991
- [7] *Lemaitre J.*: A Course on Damage Mechanics. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag 1996
- [8] *Tomiczek K.*: O zachowaniu się skał w warunkach naprężeń rozciągających. Cz. 1–4. Kwartalnik Naukowo-Techniczny „Budownictwo Górnicze i Tunelowe”, nr 1–4, Katowice, Wydawnictwo Górnicze 2007