

Andrzej Belzowski<sup>1</sup>

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

## METODA OCENY STOPNIA USZKODZENIA KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH

Procesy degradacji mechanicznej rozwijające się w polimerowych kompozytach konstrukcyjnych pod wpływem długotrwałych obciążeń statycznych i zmęczeniowych powodują niekorzystne zmiany własności mechanicznych. Stosowane metody oceny stopnia uszkodzenia materiału najczęściej wykorzystują nieodwracalne stopniowe zmiany modułu sprężystości wzdłużnej. W pracy przedstawiono propozycję miary stopnia uszkodzenia wyrażającej względną zmianę zapasu wytrzymałości resztkowej określonej dla założonego poziomu ufności. Pozwoliło to uwzględnić degradacyjne zmiany wartości średniej oraz statystycznego rozrzutu wytrzymałości materiału. Przytoczono wyniki przykładowych krzywych zmian parametru uszkodzenia kompozytu jednokierunkowego poddanego degradacji zmęczeniowej.

### A METHOD FOR EVALUATING DAMAGE EXTENT IN POLYMER COMPOSITES

Processes of mechanical degradation occurring in polymer composites under the influence of long-lasting static and dynamic loads have a detrimental effect on their structural properties (Fig. 1). The presently used methods for evaluating the extent of damage in material are mainly based on monitoring gradual decrease of the longitudinal elastic modulus value (Fig. 3). The paper presents a new measure of the damage extent that accounts for relative changes in the residual strength determined at a stipulated confidence level (Fig. 6). The presented approach is therefore capable of allowing for changes in both the mean value of strength and its statistical characteristics. Presented are example graphs of the damage parameter varying under fatigue conditions in unidirectional composite (Figs 4, 7, 8). Due to its sound physical basis the method may be considered a reliable tool in evaluating the extent of damage in composite components or in calibrating other existing techniques that, though convenient in use, lack a sound theoretical basis.

### WPROWADZENIE

Kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami są podatne na procesy degradacji powodujące zmiany (na ogół niekorzystne) własności mechanicznych oraz wielu innych charakterystyk materiału. Wyróżnia się:

- degradację mechaniczną - zachodzącą pod wpływem obciążeń [1],
- degradację fizyczną - obejmującą rozwijające się samorzutnie procesy porządkowania struktury związane z obniżaniem energii wewnętrznej materiału [1, 2],
- degradację chemiczną - przejawiającą się w zmianach własności związanych ze zmianami struktury molekularnej, jakie zachodzą pod wpływem substancji (rozpuszczalniki, woda) i czynników fizycznych (promieniowanie itp.) [1].

Degradacja mechaniczna kompozytów polimerowych zachodząca pod wpływem długotrwałych obciążeń statycznych lub zmęczeniowych wiąże się ze zmianami struktury materiału o zasięgu lokalnym lub obejmującym całą objętość bryły elementu. Zmiany te mają postać różnego rodzaju nieciągłości (debonding, pęknięcia osnowy i włókien, delaminacje itd.). Mogą również występować odkształcenia plastyczne, zmiany własności składników kompozytu itp. W przypadku degradacji,

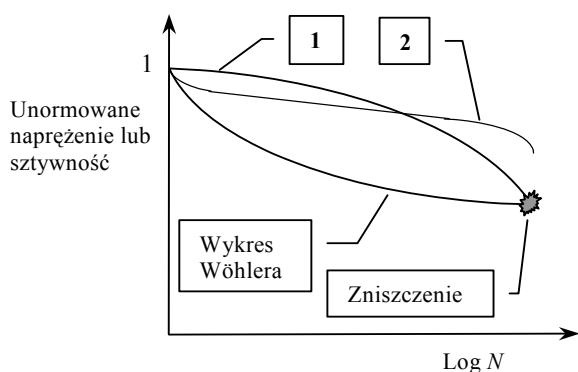
spowodowanej przez długotrwałe obciążenia statyczne i zmęczeniowe o stosunkowo jednorodnym rozkładzie w objętości bryły elementu, zmiany struktury mają charakter ogólny, tzn. obejmują znaczne obszary. Zewnętrznym przejawem postępującej degradacji materiału są zmiany jego własności obserwowane w skali makroskopowej [3, 4]. Najczęściej stwierdza się spadki wartości współczynników sprężystości i wskaźników wytrzymałości oraz wzrost charakterystyk tarcia wewnętrznego. Czasem występuje okresowy wzrost współczynników sprężystości i wytrzymałości. Względne spadki charakterystyk sprężystości i wytrzymałości do momentu zniszczenia wynoszą w polimerowych kompozytach konstrukcyjnych od kilku do 40÷50% (rys. 1). Najmniejsze zmiany występują w kompozytach jednokierunkowych obciążonych zgodnie z kierunkiem ułożenia włókien. Największe spadki występują w materiałach zawierających dużą ilość warstw z włóknami o niekorzystnej orientacji (tkaniny, mata).

Używanie kompozytów w budowie silnie obciążonych elementów konstrukcji, instalacji ciśnieniowych oraz różnych urządzeń o podwyższonych wymaganiach w zakresie niezawodności wymaga monitorowania stanu konstrukcji oraz dokonywania oceny stopnia zużycia

<sup>1</sup> dr inż.

materiału. Ważnym problemem teoretycznym i praktycznym jest znalezienie odpowiedniej miary stopnia uszkodzenia (zużycia) materiału. Idealna miara stopnia uszkodzenia materiału powinna:

- jednoznacznie odzwierciedlać stopień wyczerpania zdolności materiału do przenoszenia obciążeń użytkowych, wyrażony w postaci spadku zapasu wytrzymałości lub przez zmniejszenie pozostającej trwałości zmęczeniowej itp.,
- charakteryzować się względną łatwością realizacji pomiarów wymaganych do określenia stopnia uszkodzenia,
- charakteryzować się brakiem wpływu pomiarów charakterystyk materiału potrzebnych do oceny stopnia uszkodzenia na stan materiału (pomiaru nieniszczące).



Rys. 1. Schematyczny przebieg krzywej Wöhlera oraz względnych zmian wytrzymałości (1) i modułu Younga (2) laminatu bez karbu zachodzących pod wpływem obciążeń zmęczeniowych

Fig. 1. Schematically shown are Wöhler's curve along with plots of relative change in strength (1) and Young's modulus value (2) for plain laminate specimens subject to fatigue loading

Stosowane obecnie miary stopnia uszkodzenia kompozytów spełniają na ogół tylko niektóre z tych postulatów. Można wyróżnić następujące główne sposoby podejścia do problemu oceny stopnia uszkodzenia kompozytów:

1. Ocena stopnia uszkodzenia wykorzystuje bieżące wartości współczynników sprężystości materiału, w szczególności modułu sprężystości wzdłużnej.
2. Ocena stopnia uszkodzenia wykorzystuje charakterystyki geometryczne dominujących typów pęknięć (powierzchnia pęknięć poprzecznych, powierzchnia rozwarstwień itp.).
3. Wykorzystuje się wartości resztkowej wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej (np. hipoteza Palmgreena-Minera).

## KWANTYFIKOWANIE STOPNIA USZKODZENIA KOMPOZYTÓW

Większość stosowanych obecnie definicji miar uszkodzenia kompozytów wykorzystuje bieżące wartości współczynników sprężystości, w szczególności modułu Younga. Teoretyczne podstawy tych metod wywodzą się z koncepcji naprężenia efektywnego, wysuniętej przez Kaczanowa pod koniec lat 50. Rozważając zagadnienie pełzania metali przyjął on, że zjawisko degradacji materiału rozwijające się pod wpływem przyłożonego obciążenia polega na stopniowym powstawaniu pustek zmniejszających przekrój czynny przenoszący obciążenia (rys. 2a). Wskutek obecności pęknięć naprężenie efektywne w materiale uszkodzonym ( $\sigma$ ) jest większe od naprężenia nominalnego ( $\sigma_0$ ), co wyraża zależność

$$\sigma = \sigma_0 / (1 - D) \quad (1)$$

w której  $D$  jest parametrem uszkodzenia przyjmującym wartości  $0 \leq D \leq 1$ . W materiale nieuszkodzonym  $D = 0$ . Wartość  $D = 1$  oznacza zniszczenie. Parametr uszkodzenia zdefiniowany za pomocą zależności  $D = 1 - (A/A_0)$  pokazuje zmniejszanie się przekroju netto  $A$ , przenoszącego obciążenie odniesione do początkowego przekroju  $A_0$  niezawierającego uszkodzenia. Wartość parametru  $D$  można również wyznaczyć z zależności

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (2)$$

w której  $E$  oznacza wartość bieżącą sieciowego modułu Younga, a  $E_0$  wartość początkową [5]. Graficzna interpretacja procedury określania wartości parametru uszkodzenia jest pokazana na rysunku 3.

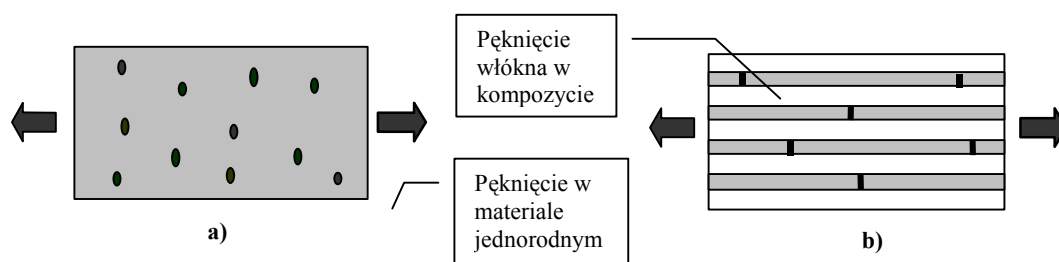
Definicja parametru uszkodzenia, wykorzystująca zmiany modułu sprężystości (wzór (2)), nie uwzględnia faktu, że do oceny bezpieczeństwa konstrukcji najbardziej miarodajne są wartości wytrzymałości resztkowej [6]. Dotychczas nie określono zależności pozwalających wnioskować o wartości wytrzymałości kompozytu na podstawie modułu Younga lub innych współczynników sprężystości. Jest to zrozumiałe, ponieważ wartości współczynników sprężystości reprezentują średni stan struktury materiału uszkodzonego, a wytrzymałość zależy od uszkodzeń powodujących jego największe lokalne osłabienie.

Stopień uszkodzenia materiału jest związany z rodzajem istniejących uszkodzeń oraz ich rozmiarami i gęstością. Podejmuje się próby kwantyfikowania stopnia uszkodzenia materiału na podstawie geometrycznych charakterystyk powstałych pęknięć. Przykładem takiego podejścia są badania degradacji zmęczeniowej laminatu epoksydowo-węglowego o strukturze  $[0/\pm 45/90]_S$  opisane w [7]. Kwantyfikowano trzy rodzaje uszkodzeń - rozwarstwienia, pęknięcia poprzeczne oraz pęknięcia włó-

kien. Wskaźnikiem uszkodzenia wywołanego przez pęknięcia poprzeczne był iloraz  $a_T/A_T$  [ $\text{mm}^{-1}$ ]. Wielkość  $a_T$  oznaczała całkowitą długość pęknięć poprzecznych stwierdzonych pod mikroskopem na obszarze przekroju

## WYKORZYSTANIE WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWEJ DO OCENY STOPNIA USZKODZENIA KOMPOZYTU

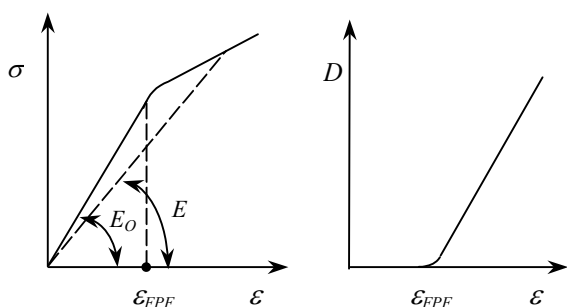
Degradacja mechaniczna kompozytów polimerowych



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie modelu powstawania uszkodzeń w materiale jednorodnym izotropowym (a) oraz w kompozycie UD (b)

Fig. 2. Schematic showing the way damage originates in homogeneous isotropic material (a) and UD composite (b)

o powierzchni  $A_T$  wynoszącej  $10 \text{ mm}^2$ . Podobnie kwantyfikowano gęstość rozwarstwień. Kwantyfikowano również gęstość pęknięć włókien. W tym przypadku próbki z uszkodzeniami poddawano częściowej pirolizie (podgrzewanie przez 1 h przy  $450^\circ\text{C}$ ) i następnie określano pod mikroskopem liczbę pękniętych włókien. Miarą nasilenia pęknięć włókien była liczba pęknięć odniesiona do całkowitej liczby włókien widocznych w polu



widzenia. Wydaje się, że użyteczność wskaźników stopnia uszkodzenia zdefiniowanych za pomocą nasilenia określonego typu pęknięć w rozwiązywaniu problemów inżynierskich związanych z oceną trwałości konstrukcji jest obecnie niewielka.

Rys. 3. Określanie parametru uszkodzenia  $D$  na podstawie pomiaru modułu Younga. Wykres rozciągania (a) oraz krzywa zmian  $D$  (b);  $\epsilon_{FFP}$  - odkształcenie inicjacji uszkodzenia

Fig. 3. Damage parameter  $D$  as determined from Young's modulus measurements: tensile plot (a) parameter  $D$  variation plot (b);  $\epsilon_{FFP}$  - damage onset strain

W ocenie stopnia uszkodzenia materiałów powinno się uwzględniać przede wszystkim zmiany wartości średniej wytrzymałości materiału oraz ewentualnie jej rozrzutu statystycznego (tj. odchylenia standardowego). Wielkości te wpływają w zasadniczy sposób na bieżący zapas wytrzymałości oraz trwałość i niezawodność elementów konstrukcji.

przejawia się m.in. w zmianach wartości średniej oraz odchylenia standardowego wytrzymałości materiału. Z analizy publikacji na temat oceny uszkodzeń w kompozytach wynika, że wytrzymałość resztkowa jest uznawana za parametr mało przydatny do monitorowania stanu materiału [8]. Pogląd ten uzasadnia się mniej równomiernym - w stosunku do zmian modułów sprężystości - przebiegiem krzywych zmian wytrzymałości. Ponadto nie istnieją nieniszczące metody pomiarów wartości wytrzymałości. Zmiany statystycznego rozrzutu wartości wytrzymałości spowodowane przez degradację są z reguły pomijane w ocenie stopnia uszkodzenia.

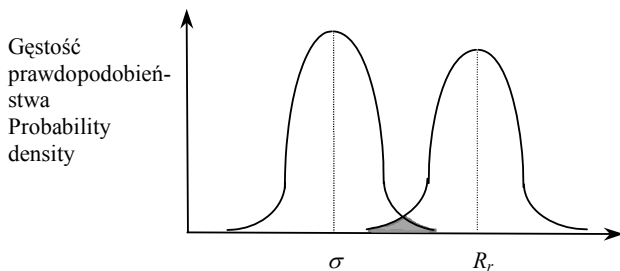
Współczesne metody oceny wytrzymałości materiałów i konstrukcji pozwalają uwzględnić związki pomiędzy wartościami średnimi przyłożonego naprężenia i wytrzymałości oraz dyspersją ich wartości a prawdopodobieństwem zniszczenia (rys. 4). Wspólne zaciemnione pole pod wykresami gęstości prawdopodobieństwa na rysunku 4 oznacza prawdopodobieństwo awarii elementu o danym rozkładzie wytrzymałości  $R_r$ , przenoszącym naprężenie  $\sigma$  o danym rozkładzie. Degradacja materiału, polegająca na spadku wartości średniej oraz wzroście statystycznego rozrzutu wytrzymałości, powoduje spłaszczenie i przesunięcie w lewo prawego wykresu na rysunku 4. Konsekwencją tego jest wzrost prawdopodobieństwa zniszczenia elementu.

Z badań własnych i analiz opisanych w [9, 10] wynika, że zmiany odchylenia standardowego wytrzymałości spowodowane przez degradację mogą obniżyć zapas wytrzymałości kompozytu w stopniu o rząd wielkości większym niż zmiany jej wartości średniej. Potwierdzają to między innymi badania autora dotyczące degradacji kompozytu jednokierunkowego (UD) epoksydowo-szklanego poddanego cyklicznemu trójpunktowemu zginaniu [9]. Materiał ten został wyprodukowany metodą pultruzji w postaci prętów o przekroju prostokątnym  $15 \times 8 \text{ mm}$ . Stosunek rozstawu podpór do wysokości próbki wynosił  $l/h = 16$ . Obciążenia realizowano w zakresie do 60% początkowej wytrzymałości materiału,

kontrolując wartość amplitudy siły. Współczynnik asymetrii cyklu wynosił 0,13, a częstotliwość obciążania 12 Hz. Próbkę były poddawane zadanej liczbie cykli obciążenia ( $10^4$ , 31 000,  $10^5$  itd.), po czym przeprowadzano statyczną niszczącą próbę zginania. Stosując 10÷13 próbek dla każdej liczby cykli, określano wartość średnią oraz odchylenie standardowe wytrzymałości resztkowej (rys. 5). Wykorzystując określone wartości wytrzymałości, obliczono naprężenie dopuszczalne  $\sigma_{dop}$ , zakładając stałe prawdopodobieństwo zniszczenia  $P_u = 10^{-5}$  oraz stałą wartość maksymalną działających naprężeń. Wartość charakterystyki bezpieczeństwa [6], odpowiadająca prawdopodobieństwu zniszczenia równemu  $10^{-5}$ , wynosi  $u_g = 4,2$  przy założeniu, że rozkład wytrzymałości można uznać za normalny. Dla wartości współczynnika zmienności nieprzekraczających 0,3 (co ma miejsce w przypadku badanego materiału) takie uproszczenie jest możliwe [6]. Wartość  $\sigma_{dop}$  obliczona wg zależności

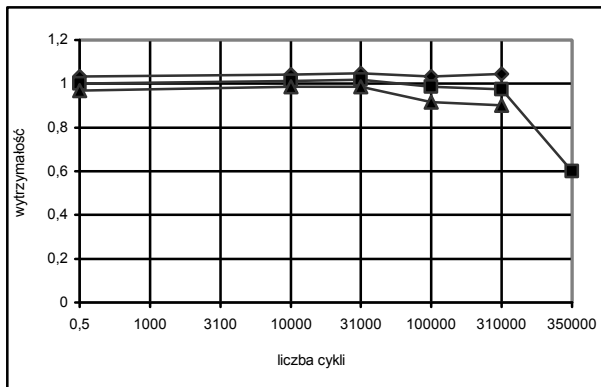
$$\sigma_{dop} = R_r(0) - (u_g \cdot SD) \quad (3)$$

uwzględnia degradacyjne zmiany zarówno wartości średniej, jak i odchylenia standardowego wytrzymałości materiału.  $R_r(0)$  oznacza wytrzymałość statyczną materiału nieuszkodzonego.



Rys. 4. Probabilistyczne ujęcie zagadnienia wytrzymałości

Fig. 4. Probabilistic approach to the strength concept



Rys. 5. Zmiany wytrzymałości na zginanie kompozytu UD wraz z rozrzutem statystycznym (wartość średnia  $R_r(n) \pm SD$ ) po cyklicznym zginaniu trójpunktowym na poziomie  $0,6R_r$ .

Fig. 5. Variation of flexural strength for UD composite (mean value  $\pm SD$ ) in three-point bending tests performed at  $0,6R_r$ .

Z tabeli 1 wynika, że zastosowanie  $10^5$  cykli obciążenia obniżyło wartość średnią wytrzymałości zaledwie o 1,5%, podczas gdy naprężenie dopuszczalne obliczone wg (3) zmniejszyło się aż o 9,9%, tj. 6,6 razy więcej. Spadek wytrzymałości stwierdzony po zastosowaniu  $3,1 \cdot 10^5$  cykli wynosił 2,7%, ale wartość  $\sigma_{dop}$  spadła aż o 23%, tj. 8,5 razy więcej. Wyniki te pokazują, że odchylenie standardowe może wpływać na spadek zdolności do przenoszenia naprężeń w stopniu nawet o rząd wielkości większym w stosunku do wpływu zmian wartości średniej. Z analizy literatury dotyczącej tego zagadnienia wynika, że możliwości uwzględnienia wpływu zmian rozrzutu wytrzymałości w zasadzie nie są przedmiotem zainteresowania specjalistów zajmujących się badaniami materiałów kompozytowych. Jest to zaskakujące, ponieważ wpływ zmian rozrzutu może być znaczny, a ponadto modele obliczeniowe opracowane w teorii niezawodności konstrukcji przenoszących obciążenia umożliwiają uwzględnienie zmian zarówno wartości średniej, jak i odchylenia standardowego wytrzymałości.

TABELA 1. Wytrzymałość na zginanie kompozytu UD z uszkodzeniem zmęczeniowym oraz wartości naprężeń dopuszczalnych  $\sigma_{dop}$  określone wg (3). Wartości unormowane względem statycznej wytrzymałości na zginanie

TABLE 1. Variation of flexural strength for UD composite with growing fatigue damage extent together with allowable stress values  $\sigma_{dop}$  determined from (3). The values are normalized with respect to the static flexural strength value

Liczba cykli	Średnia wytrzymałość $R_r(n)/R_r(0)$	Odchylenie standardowe $SD(N)/R_r(0)$	Naprężenie dopuszczalne $\sigma_{dop}/R_r(0)$
Próba stat.	1	0,032	0,865
$31\ 000 \approx 10^{4,5}$	1,017 (+1,7%)	0,030 (-7%)	0,890 (+3%)
$10^5$	0,985 (-1,5%)	0,049 (+53%)	0,779 (-9,9%)
310 000	0,973 (-2,7%)	0,073 (+128%)	0,666 (-23%)

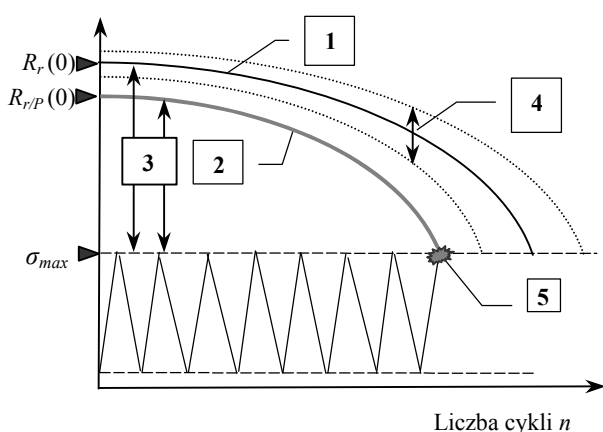
Przytoczone spostrzeżenia pozwoliły sformułować propozycję nowej definicji miary uszkodzenia materiału kompozytowego  $D$ , opartej o bieżącą wartość zapasu wytrzymałości materiału. Przyjęto następujące założenia:

- Zapas wytrzymałości w materiale bez uszkodzeń (degradacyjnych) odpowiada wartości parametru  $D = 0$ .
- Po spadku wytrzymałości do poziomu naprężenia dopuszczalnego przyjętego na początku  $D = 1$ .

Uwzględniając wymienione założenia, zaproponowano formułę oceny stopnia uszkodzenia (zużycia) materiału  $D$

$$D = \frac{R_{r/P}(0) - R_{r/P}(n)}{R_{r/P}(0) - \sigma_{max}} \quad (4)$$

Wyrażenia  $R_{r/P}(0)$  i  $R_{r/P}(n)$  oznaczają tzw. gwarantowaną wytrzymałość doraźną materiału nieuszkodzonego i materiału z uszkodzeniem wprowadzonym przez zastosowanie  $n$  cykli obciążenia. Wytrzymałość gwarantowaną oblicza się, przyjmując określony poziom ufności  $P_u$ . Wielkość  $\sigma_{max}$  jest maksymalnym naprężeniem cyklu. Wartości  $R_{r/P}(0)$  i  $R_{r/P}(n)$  określa się podobnie jak  $\sigma_{dop}$  wg wzoru (3), dostosowując wartość charakterystyki bezpieczeństwa  $u_g$  do założonego poziomu ufności. Przykładowo, dla poziomu ufności  $P_u = 0,95$  mamy  $u_g = 1,65$ , a dla  $P_u = 0,99$  otrzymuje się  $u_g = 2,33$  (wg tablic rozkładu normalnego). Wartość odchylenia standardowego występującą w zależności (3) określa się na podstawie badań wytrzymałości resztkowej. Przyjęta wartość poziomu ufności powinna odzwierciedlać wymagania odnoszące się do rozważanej konstrukcji w zakresie niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji. Rysunek 6 przedstawia schematycznie koncepcję miary uszkodzenia zdefiniowanej za pomocą zależności (4).

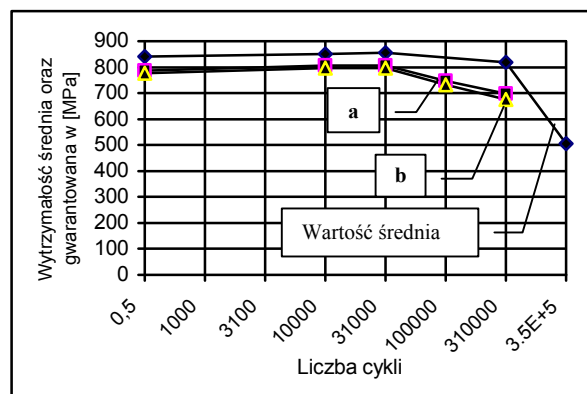


Rys. 6. Schemat przebiegu zmian charakterystyk materiału przyjęty w definicji miary uszkodzenia (wzór (4)): 1 - średnia wytrzymałość resztkowa materiału, 2 - wytrzymałość gwarantowana  $R_{r/P}(n)$ , 3 - zapas wytrzymałości średniej i gwarantowanej, 4 -  $R_r(0) \pm SD(n)$ , 5 - całkowite zużycie materiału

Fig. 6. Schematic representation of material characteristics variation as adopted in definition of the damage extent measure (formula (4)): 1 - average residual strength of material, 2 - guaranteed strength  $R_{r/P}(n)$ , 3 - the extent for the average and the guaranteed strength to be reached, 4 -  $R_r(0) \pm SD(n)$ , 5 - total loss of material usefulness

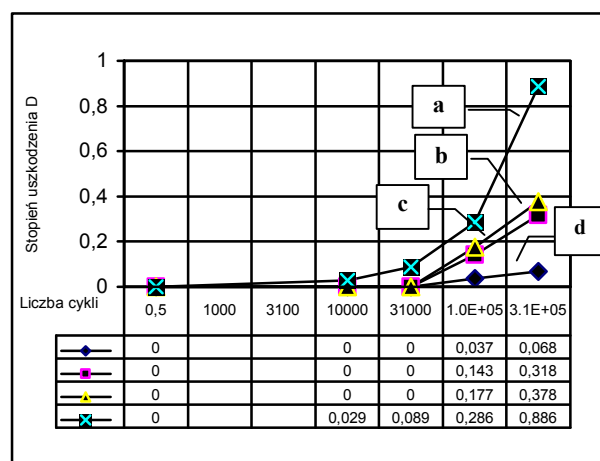
W celu dokonania oceny przydatności zaproponowanej miary stopnia uszkodzenia określono przebieg krzywych  $D(n)$  kompozytu UD poddanego degradacji zmęczeniowej. Dane wykorzystane w obliczeniach pochodziły z badań własnych nad zmianami wytrzymałości resztkowej przedstawionych częściowo w tabeli 1. Zmiany wytrzymałości resztkowej wraz z rozrzutem statystycznym przedstawiono na rysunku 5. Wytrzyma-

łość średnia oraz określone przebiegi zmian wytrzymałości gwarantowanych określonych dla poziomów ufności 0,95 i 0,99 pokazano na rysunku 7. Na rysunku 8 pokazano wykresy zmian parametru uszkodzenia  $D(n)$  określone wg wzoru (4) dla danych z rysunku 5. Wytrzymałości gwarantowane określono dla poziomów ufności 0,95 i 0,99. Obliczono również wartości stopnia uszkodzenia na podstawie zmian wartości średniej wytrzymałości oraz wg hipotezy Palm-greena-Minera (P-M) [11].



Rys. 7. Wykresy zmian wartości średniej wytrzymałości na zginanie kompozytu UD oraz zmiany wytrzymałości gwarantowanych określonych dla poziomów ufności 0,95 (a) i 0,99 (b)

Fig. 7. Plots of mean flexural strength variation and guaranteed strength variation determined at confidence levels of 0.95 (a) and 0.99 (b) in UD composite



Rys. 8. Zmiany parametru uszkodzenia  $D$  kompozytu UD w funkcji liczby cykli momentu zginającego obliczone wg różnych formuł: a) wg hipotezy Palmgreena-Minera, b)  $-P_u = 0,99$ , c)  $-P_u = 0,95$ , d) wg wartości średniej wytrzymałości

Fig. 8. Variation of the damage parameter  $D$  in UD composite as a function of the number of cycles of the applied bending moment as determined from different formulas: a) Palmgreen-Minera rule, b)  $-P_u = 0.99$ , c)  $-P_u = 0.95$ , d) mean strength value

## PODSUMOWANIE

Badany kompozyt o wzmocnieniu jednokierunkowym wykazuje kinetykę degradacji zmęczeniowej typu *sud-*

*den death* [11]. Charakteryzuje się ona powolnym, niekiedy trudnym do stwierdzenia spadkiem wytrzymałości z gwałtownym przyspieszeniem zmian pod koniec okresu trwałości (rys. 5). Przebieg zniszczenia przy naprężeniach normalnych równoległych do włókien jest w takich materiałach zdominowany przez własności włókien.

Wykresy parametru uszkodzenia  $D$  w funkcji liczby cykli (rys. 8) są monotoniczne, co jest zgodne z oczekiwaniem. Najbardziej surową (pesymistyczną) ocenę zaawansowania procesu degradacji otrzymano, stosując hipotezę Palmgreena-Minera. Wartości  $D$  określone wg zależności (4) z uwzględnieniem obliczonych wytrzymałości gwarantowanych są w przybliżeniu o połowę mniejsze (dla  $n = 10^5$  i  $3,1 \cdot 10^5$ ). Hipoteza P-M jest zależnością o charakterze umownym, podczas gdy zależność (4) ma solidne podstawy teoretyczne. Uwzględniając, że:

- hipoteza P-M daje bardziej pesymistyczną ocenę uszkodzenia od oceny wynikającej z zależności (4),
- zmiany wytrzymałości określone doświadczalnie mogą być mało czułym wskaźnikiem zmian degradacyjnych w początkowym, słabo zaawansowanym stadium rozwoju tego procesu

można stwierdzić, że hipoteza P-M jest bardziej bezpiecznym (w porównaniu do wzoru (4)) sposobem oceny stopnia uszkodzenia materiałów kompozytowych o kinetyce zużycia typu *sudden death*. W przypadku silnej presji na unikanie nadmiernych zapasów wytrzymałości i trwałości bardziej właściwe będzie stosowanie zależności (4).

Zaproponowana metoda oceny stopnia uszkodzenia materiałów kompozytowych stanowi dopełnienie metod wykorzystujących badania zmian sztywności, kwantyfikowanie pęknięć itd. Jako bardziej poprawna pod względem merytorycznym może być stosowana w ocenie stopnia uszkodzenia (zużycia) materiału oraz do kalibracji innych metod. Wyższa poprawność merytoryczna posiada ograniczenia wynikające z niszczącego charakteru badań wytrzymałości resztkowej. Stanowi to utrud-

nienie w przypadku monitorowania materiału rzeczywistej konstrukcji.

## LITERATURA

- [1] Tuttle M.T., A framework for long-term durability predictions of polymeric composites, *Progress in Durability Analysis of Composite Systems*, A.A. Balkema, Rotterdam 1996, 169-176.
- [2] Pritchard G., *Fabrication, inspection and durability, Reinforced plastics durability*, Woodhead Pub. Ltd. 1999.
- [3] Talreja R., *Fatigue of composite materials*, ed. Technomic Pub. Comp. Inc. 1987.
- [4] Harris B., *Fatigue behaviour of polymer-based composites and life prediction methods, Durability Analysis of Structural Composite Systems, Reliability, risk analysis and prediction of residual integrity*, Balkema, Rotterdam 1996, 49-84.
- [5] Kamimura K., *Modélisation théorique de la croissance d'en-dommagement appliquée à la théorie des plaques atratifiées*, *J. de Mécan, Théorique et Appliquée* 1985, 4, 2, 537-553.
- [6] Warszyński M., *Niezawodność w obliczeniach konstrukcyjnych*, PWN, Warszawa 1988.
- [7] Kobayashi A., Othani N., Choi K.B., *Microscopic internal materials damage due to two level fatigue in composites*, *ICCM 6*, 1987, 3176-3184.
- [8] Daniel I.M., Charewicz A., *Fatigue damage mechanisms and residual properties of graphite/epoxy laminates*, *Eng. Fract. Mech.* 1986, 25, 5/6, 793-808.
- [9] Bełzowski A., *Degradacja wytrzymałości kompozytu polimerowego pod wpływem obciążeń zmęczeniowych*, *Mat. IV Konf. Metody doświadczalne w budowie maszyn*, Szklarska Poręba 1999, 81-90.
- [10] Bełzowski A., *Badanie degradacji mechanicznej oraz ocena stopnia uszkodzenia polimerowych kompozytów włóknistych*, *II International Congress of Technical Diagnostics*, Warszawa 2000, płyta CD.
- [11] Topoliński T., *Analiza teoretyczna i badania kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych konstrukcyjnych kompozytów polimerowych*, *Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Rozprawy nr 82*, 1997.

Recenzent  
Kazimierz Puciłowski