

Lech STARCZEWSKI*
Jerzy SZUMNIAK
Robert NYC

UPROSZCZONY MODEL PREDYKCJI STANU ZDATNOŚCI ELEMENTÓW WYKONANYCH Z POLIMEROWYCH KOMPOZYTÓW

W artykule przedstawiono modelowe postępowanie w prognozowaniu parametrycznym własności trwałościowo – niezawodnościowych elementów wykonanych z polimerowego kompozytu fenolowo – formaldehydowego zbrojonego włóknem szklanym. Na podstawie wyników pomiarów wybranych parametrów fizykochemicznych (i ich statystycznego rozkładu) elementów kompozytu w stanie wyjściowym i po 30 latach magazynowania dokonano, dla pojedynczego elementu i zespołu (trzech elementów), prognozy następujących parametrów użytkowych: oczekiwanego czasu zdatności, niezawodności po 30 latach magazynowania i prognozowanej niezawodności na dalsze 10 lat użytkowania. Zdaniem autorów model ten może być stosowany także do wyznaczania niezawodności symptomowej.

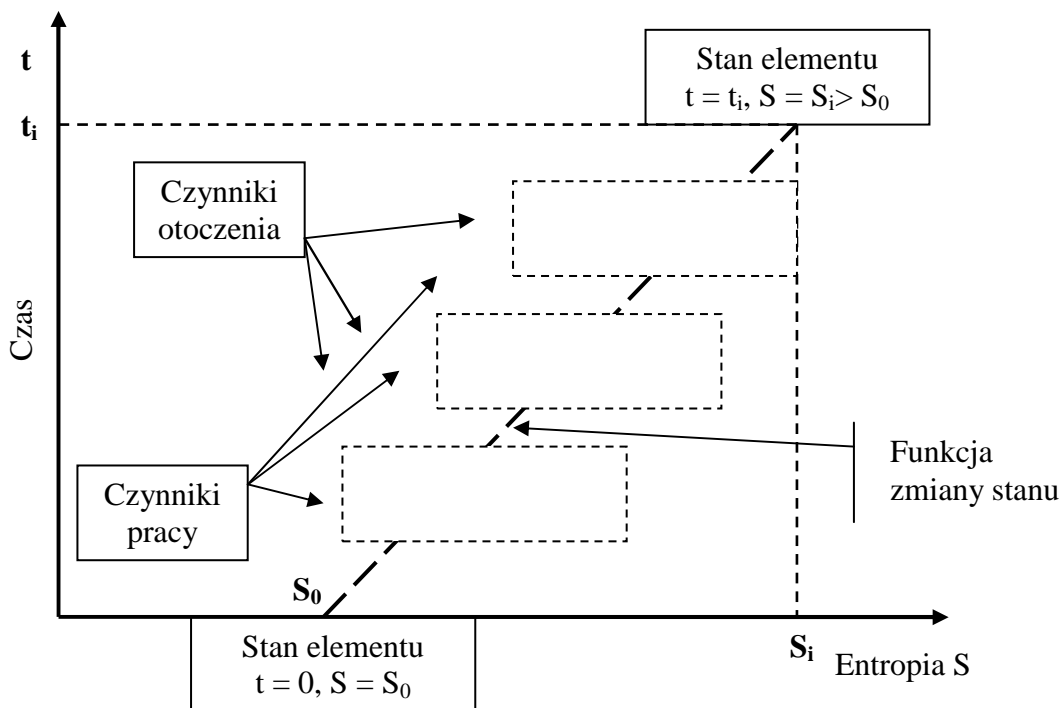
Słowa kluczowe: prognozowanie własności trwałościowo – niezawodnościowych, kompozyt fenolowo – formaldehydowy

WSTĘP

Charakterystyczne, w aktualnym rozwoju pojazdów mechanicznych jest, między innymi, wprowadzenie do ich budowy coraz więcej elementów wykonanych z polimerów i kompozytów polimerowych. Materiały te są znacznie bardziej podatne, niż materiały metalowe, na starzenie powodowane zarówno przez obciążenia mechaniczne, cieplne i inne wywołane pracą, jak i fizykochemicznym oddziaływaniem środowiska. W materiałach elementów następuje niekorzystna, nieodwracalna w czasie zmiana parametrów stanu (rys. 1), prowadząca do obniżenia potencjału użytkowego elementów, tj. do zmniejszenia zdolności do spełniania przypisanej elementowi funkcji na wymaganym poziomie efektywności. W analizie niezawodności elementów maszyn

* dr hab. inż. Lech STARCZEWSKI, dr hab. inż. Jerzy SZUMNIAK, mgr inż. Robert NYC -
Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej

idealizuje się warunki, w których pracują rzeczywiste obiekty, uwzględnia się wpływ procesów zachodzących w czasie spełniania roboczych funkcji, natomiast pomija się wpływ czasu i warunków przechowywania. Takie podejście jest do przyjęcia dla obiektów wykonanych z metali. Dla polimerów i polimerowych kompozytów procesy zachodzące w przedziałach czasu oczekiwania na pracę mogą istotnie wpływać na stan ich zdadności. Pomimo wielu proponowanych rozwiązań brakuje jednoznacznej metody oceny stanu zdadności takich materiałów „a priori”. W niniejszym artykule przedstawiono modelowe podejście do problemu na przykładzie analizy starzenia elementów wykonanych z kompozytu fenolowo – formaldehydowego zbrojonego włóknem szklanym, magazynowanego w okresie 30 lat.



Rys. 1. Schemat narastania entropii (stopnia degradacji) strukturalnej materiału elementu w procesie eksploatacji

Źródło: Opracowanie własne

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZAGADNIENIA

Elementy pojazdu podczas eksploatacji zmieniają swoje właściwości. Pogorszenie się właściwości polimeru – utrata potencjału użytkowego, spowodowane jest głównie procesami niszczenia (zmian) ich struktury. Niszczenie struktury wywołane obciążeniami warunków pracy (mechaniczne, cieplne, chemiczne, tarciove, itd.) przyjęto nazywać *zużywaniem* (zmęczeniowe, cieplne, tarciove, korozyjne). Zależy ono od liczby cykli obciążeń, wartości jego parametrów i rodzaju oraz własności materiału elementu. Zmianę wartości użytkowych, pogorszenie jakości, zmianę konsystencji w czasie określa się terminem *starzenie się* [1]. *Starzeniem* przyjęto nazywać *procesy wywołujące niekorzystne zmiany w strukturze, składzie chemicznym, własnościach mechanicznych i fizyko – chemicznych, zachodzących w materiale w wyniku wewnętrznych reakcji fazy gazowej, fazy ciekłej i stałej materiału oraz reakcji*

tych faz z czynnikami otoczenia (tlenem, ozonem, jonami substancji chemicznych). Procesy te przyspiesza oddziaływanie światła, ciepła, naprężeń mechanicznych.

Starzeniu, zgodnie ze sformułowanym jeszcze w starożytności przez greckiego filozofa Heraklita z Efezu w dziele „O przyrodzie” twierdzeniem „panta rei – wszystko płynie”, podlegają wszystkie materiały, ciała stałe, płynne i związki gazowe. Różnice występują w prędkości starzenia, która jest tym mniejsza, im większy jest stan skupienia materii (im większa jest energia wiązań), a jej struktura bliższa stanowi równowagi termodynamicznej.

Stymulatorami wewnętrznymi zmian struktury polimerów są potencjały chemiczne (różnice stężeń), elektrochemiczne (przepływ ładunków elektrycznych), fizyczne (różnice temperatury) i mechaniczne (gradient naprężeń wewnętrznych, wprowadzonych w procesie wytwarzania).

Stymulatorami zewnętrznymi degradacji struktury są głównie:

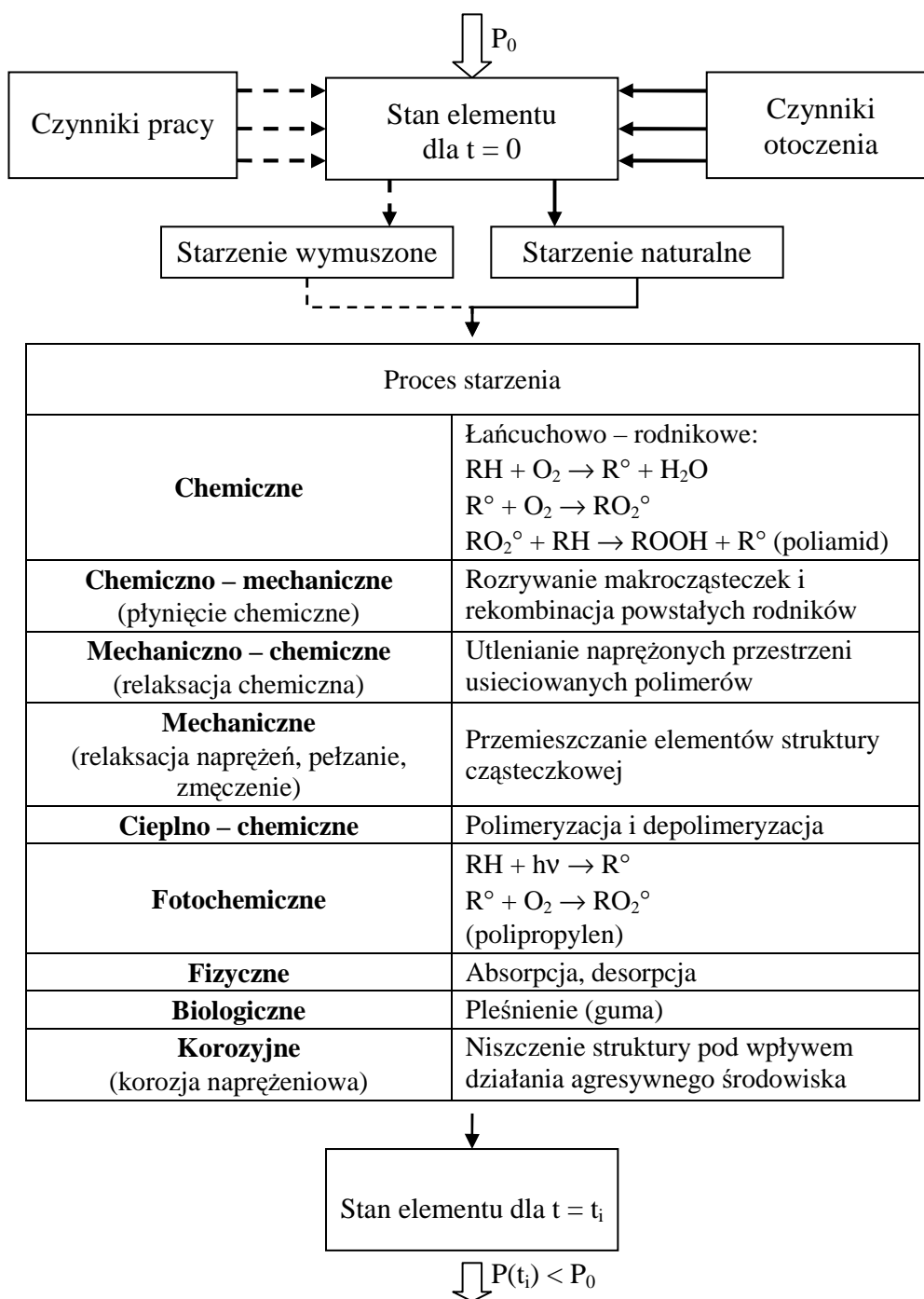
- oddziaływania gazów i cieczy podatnych do reakcji chemicznych ze składnikami struktury (tlen, ozon, ciecze eksploatacyjne);
- obciążenie wywołujące podwyższony stan naprężeń sprzyjających zrywaniu wiązań (pękanie łańcuchów) i pełzaniu materiału;
- zmienność wilgoci otoczenia uruchamiająca procesy nasycania i suszenia, które mogą niszczyć strukturę poprzez „rozpulchnianie”, a także korozyjnie zwłaszcza na granicach faz żywica – napelniacz;
- zmienność temperatury otoczenia wprowadzająca znacznej wartości naprężenia na granicy faz żywica – napelniacz, czemu sprzyja istotna różnica w rozszerzalności tych składników;
- oddziaływań promieniowania jonizującego, zwłaszcza ultrafioletu, stymulującego reakcje fotochemiczne.

Przykładowe procesy starzenia polimerów (zmiany $P(t)$ – potencjału użytkowego) ilustruje rysunek 2.

2. KONCEPCJA OCENY STOPNIA ZESTARZENIA – UPROSZCZONY MODEL

Obszar energetyczny elementu (obiektu) obejmuje pobieranie energii z otoczenia, jej przetwarzanie i akumulowanie oraz wydawanie do otoczenia. Przetwarzanie określonej ilości energii w określonym czasie ma przebieg zależny od wartości potencjałów i struktury dróg przepływu energii.

Gdy energia pobierana jest większa od sumy energii wydawanej, wówczas jej nadmiar jest akumulowany, np. wzrastają naprężenia. W sytuacji odwrotnej braku jej są uzupełniane z zasobów energii akumulowanej, np. powodują obniżenie poziomu naprężeń. Im większa jest pojemność „akumulatora”, tym większa jest jego odporność na destrukcyjne oddziaływanie otoczenia. Przetwarzanie energii jest możliwe dopóki utrzymuje się struktura systemu, jest więc zależne od trwałości tworzywa. Z kolei trwałość tworzywa jest zależna od utrzymania się w nim określonej koncentracji energii, której doprowadzenie przyczyniło się do jego powstania. Rozkład potencjałów spowodowany odpowiednią koncentracją energii w tworzywie można określić jako jakość tworzywa (p).



Rys. 2. Ilustracja procesu starzenia materiałów polimerowych

Źródło: Opracowanie własne

Ponieważ wszelka różnica potencjałów powoduje przepływy energii od miejsca o wyższym potencjale do miejsc o niższym, koncentracja energii wyrównuje się – zanika różnica potencjałów. Analogicznie, do równań Arrheniusa – Boltzmana możemy zmianę jakości tworzywa przedstawić w postaci:

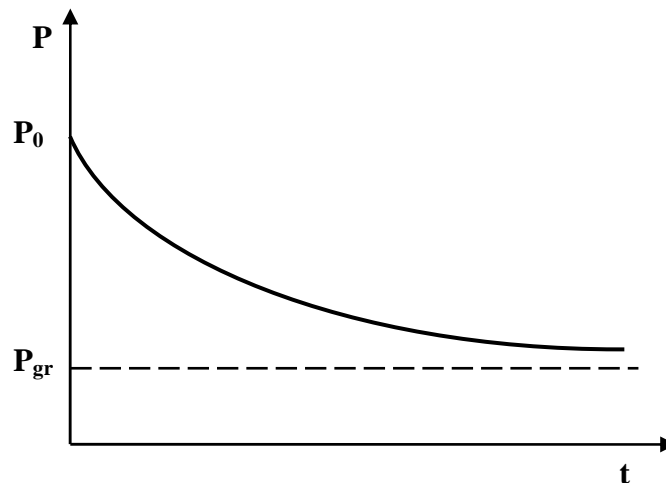
$$p = p_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad (1)$$

gdzie:

p_0 – początkowa jakość tworzywa charakteryzowana wartością parametru ocenowego,

k – współczynnik zmiany jakości (współczynnik starzenia).

Typowy przebieg starzenia ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Typowy przebieg starzenia

Źródło: Opracowanie własne

Do analogicznej zależności prowadzi następujące rozumowanie. Trwałość determinowana jest czasem, w którym parametry techniczne (charakterystyki, cechy) elementu spełniają wcześniej określone wymagania. Trwałość elementu (struktury) zależy od intensywności obciążeń. Dla każdego rodzaju obciążeń (mechanicznych, cieplnych, elektrycznych, chemicznych, klimatycznych i innych) istnieje zależność związująca je z czasem użytkowania (krzywe długowieczności). Jeśli przyjąć, że funkcja opisująca stan elementu uzależnia, przy określonym obciążeniu, jego parametry techniczne od czasu, to może być ona przedstawiona w postaci:

$$f(S, P, t) = 0 \quad (2)$$

gdzie:

S – obciążenie,

P – parametr techniczny (cecha) elementu,

t – czas.

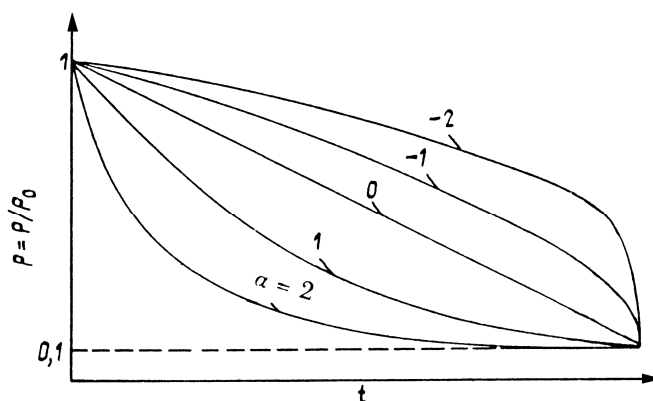
Geometrycznie funkcja ta reprezentuje powierzchnię, a przy przecięciu jej płaszczyznami $S = \text{const.}$ otrzymuje się krzywe opisujące zmienność parametrów technicznych elementu w czasie – funkcje degradacyjne. Postać tych krzywych zależy od analizowanego parametru i rodzaju obciążenia. Jeśli założyć, że funkcja $P(t)$ jest monotoniczna i zmniejsza się, zaczynając od wartości początkowej P_0 , i wprowadzić

zależność $p = \frac{p(t)}{p_0}$, to ogólne wyrażenie na zmianę tej zależności w czasie będzie miało postać:

$$\frac{dp}{dt} = -k \cdot p^a \quad (3)$$

gdzie:

a – wykładnik potęgi,
 k – prędkość starzenia.



Rys. 4. Wpływ wartości wykładnika potęgi „a” na kształtowanie się parametru p(t)

Źródło: Opracowanie własne

Ponieważ wartość wykładnika „a” zależy od temperatury i innych parametrów otoczenia, wyznaczenie jego wymaga obszernych badań eksperymentalnych. Przyjęcie wartości $a > 0$ jest zasadne, gdyż krzywa długotrwałej wytrzymałości szybko, z upływem czasu maleje, asymptotycznie zmierzając do pewnej wartości granicznej zwanej granicą wytrzymałości długotrwałej [3, 4]. Ponieważ w ocenie stanu elementów użytkowych określenie rzeczywistej wartości parametrów środowiska nastęrcza dużych trudności, do dalszych rozważań przyjęto $a=1$, czyli:

$$\frac{dp}{dt} = -k \cdot p \quad (4)$$

$$\ln p + c = -k \cdot t \quad (5)$$

dla: $t = 0, p = p_0$

$$c = -\ln p_0 \quad (6)$$

$$\ln p - \ln p_0 = -k \cdot t \quad (7)$$

Oczekiwany czas graniczny trwałości:

$$t_{gr.} = \frac{1}{k} \cdot (\ln p_0 - \ln p_{gr.}) \quad (8)$$

Prognozowana wartość po czasie $t = t_p$ (czas prognozy):

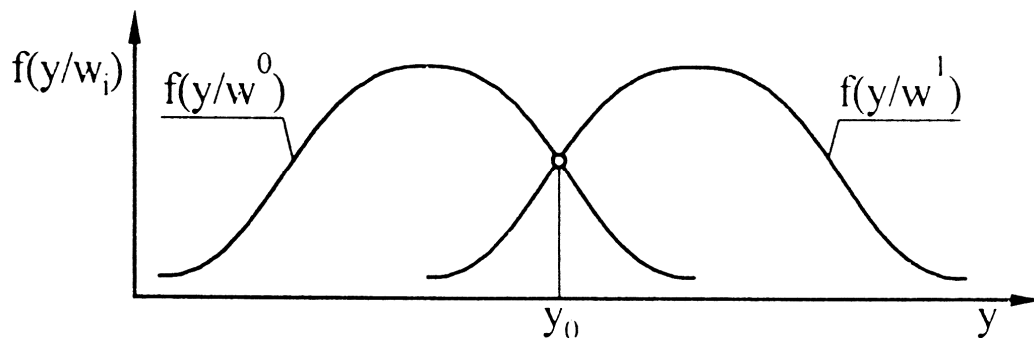
$$p_p(t) = p_0 \cdot e^{-k \cdot t_p} \quad (9)$$

gdzie:

$$k = \frac{p_0 - p_i}{t_i} \text{ dla } i = 1, 2, \dots, n.$$

Do wyznaczenia czasu bezpiecznej pracy i charakterystyk niezawodności elementu i układu elementów niezbędna jest znajomość nie tylko wartości p_0 i p_i (wyznaczonych z pomiarów wybranych parametrów), ale także wartości p_{gr} . W praktyce wartość ta jest najczęściej nieznana.

W diagnostyce, dla wyznaczenia wartości granicznej parametru, wykorzystywane są metody minimalnego ryzyka, metoda Neymana – Pearsona lub metoda zmodyfikowana przez Cempela, ale stosowanie ich wymaga znajomości funkcji gęstości prawdopodobieństwa odpowiadającego stanowi zdadności obiektu – rysunek 5.



Rys. 5. Graficzna ilustracja wyznaczania wartości y_0 parametru diagnostycznego

Źródło: Opracowanie własne

$$p(w^0) \cdot \int_{y_0}^{\infty} f\left(\frac{y_n}{w^0}\right) dy_n \leq \alpha_z \quad (10)$$

gdzie:

- w^0, w^1 – klasy stanów zdadności i niezdadności,
- α_z – zadana wartość dopuszczalna prawdopodobieństwa przyjęcia obiektu zdadnego za niezdadny (rzędu kilku procent),
- $p(w^0)$ – prawdopodobieństwo stanu zdadności,
- y_0 – wartość graniczna parametru.

Z powyższego wzoru wynika, że do określenia wartości granicznej parametru diagnostycznego należy znać jego funkcję gęstości prawdopodobieństwa odpowiadającą stanowi zdadności obiektu. Metoda zdefiniowana przez Cempela [6] umożliwia ustalenie wartości granicznej parametru diagnostycznego z wyrażenia:

$$y_0 = \bar{y} + \delta_y \cdot \sqrt{\frac{p(w^0)}{2\alpha_z}} \quad (11)$$

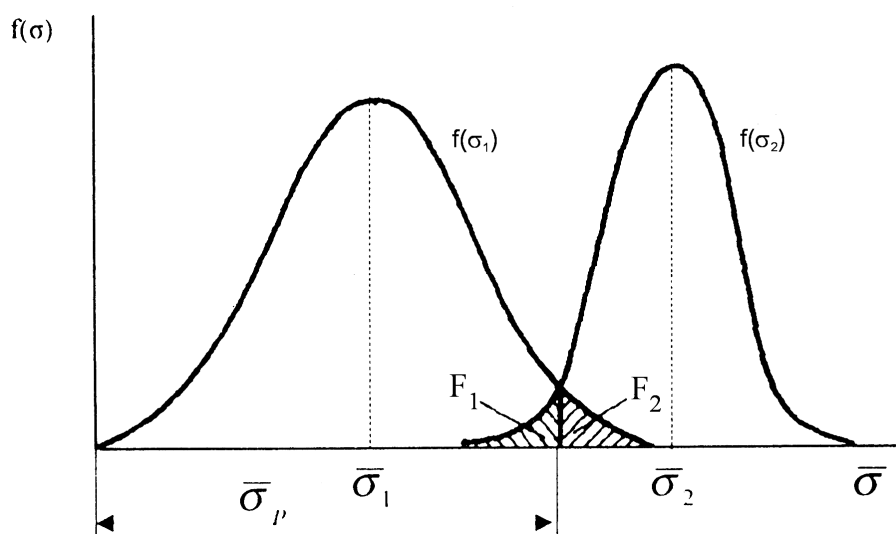
gdzie:

\bar{y} – wartość średnia parametru diagnostycznego w obserwowanej grupie obiektów,

δ_y – odchylenie standardowe parametru diagnostycznego.

W badaniach przyjęto, że jakość elementów, scharakteryzowana ich własnościami, jest wielkością losową. Badania pokazują, że właściwości materiału takie, jak wytrzymałości, granica plastyczności, udarność przebiegają zgodnie z rozkładem normalnym.

Jeżeli teraz wyrazi się obciążenie i wytrzymałość elementów w takich samych jednostkach, np. w jednostkach naprężenia, i określi się gęstości ich rozkładu w jednym układzie współrzędnych, to otrzymamy wykres, jak na rysunku 6.



Rys. 6. Krzywe gęstości rozkładu obciążenia $f(\sigma_1)$ i wytrzymałości $f(\sigma_2)$ w jednostkach naprężenia [7, 8]

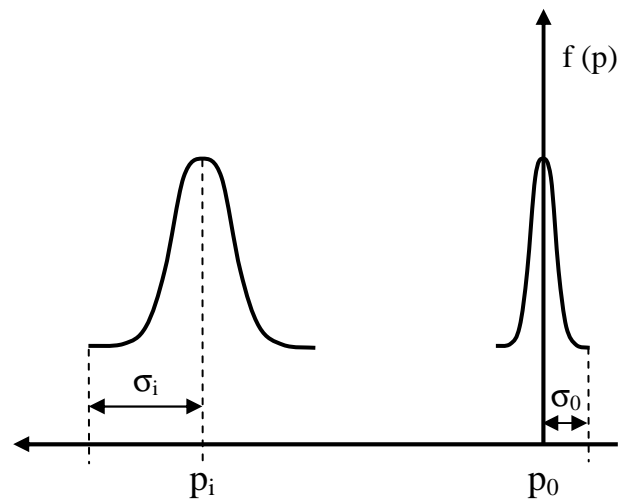
Źródło: Opracowanie własne

Wybrane obciążenie wynosi σ_p , to powierzchnia F_1 będzie odzwierciedlać prawdopodobieństwo tego, że wytrzymałość będzie mniejsza niż σ_p , natomiast powierzchnia F_2 – prawdopodobieństwo tego, że działające obciążenie będzie większe niż σ_p .

Ponieważ wyznaczenie granicznej wartości parametru ocenowego wyżej wymienionymi i innymi metodami jest trudne w realizacji, założono posłużyć się stosowanym przez konstruktorów współczynnikiem bezpieczeństwa b . Przy $b=2$ bezpieczna wartość parametru ocenowego powinna mieścić się w przedziale:

$$p_{gr.} \geq 0,5 \cdot p_0 - \sigma_0$$

Prawdopodobieństwo, że wartość zmiennej losowej X o rozkładzie normalnym różni się co do bezwzględnej wartości przeciętnej o mniej niż 3σ jest: $P(|X - m| < 3\sigma) \approx 0,997$; dla $2\sigma - 0,955$ i dla $\sigma - 0,683$.



Rys. 7. Interpretacja granicznych wartości ocenianego parametru (symptomu)

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku trudności w wyznaczeniu wartości parametrów technicznych elementu (np. dla elementów zamontowanych na obiekcie) przedstawiona metoda może być stosowana w odniesieniu do symptomów pracy elementu, np. temperatury, wówczas stosuje się zasady odnoszące się do niezawodności symptomowej [6].

3. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA METODY PREDYKCJI

Weryfikację metody przeprowadzono na elementach zespołu ilustrowanego na rysunku 8.

Zadanie: ocenić możliwość wprowadzenia do eksploatacji na gwarantowany okres 10 lat elementów uprzednio magazynowanych przez okres 30 lat.

Informacje znane: kompozyt z osnową z żywicy fenolowo – formaldehydowej, zbrojony włóknem szklanym; technologia wykonania; warunki magazynowania.

Informacje nieznane: początkowa i graniczna wartość parametrów ocenowych.

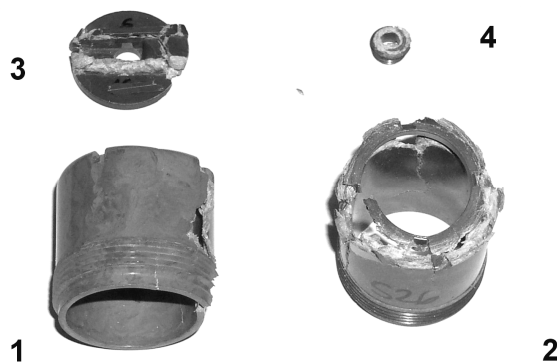
Metoda badań: wykonano elementy nowe wg znanej technologii i przeprowadzono porównawcze pomiary następujących parametrów ocenowych: nasiąkliwości, twardości, wytrzymałości (siły niszczenia), analizę spektralną w podczerwieni.

Warunkiem przeprowadzenia pomiarów i analiz było pozytywne zaliczenie fabrycznych testów w próbach odbiorczych (tj. testów na wytrzymałość elektryczną i funkcjonalność) na poziomie wiarygodności $\geq 0,99$. W tabeli 1 przedstawiono wyniki oceny w odniesieniu tylko do jednego parametru – siły niszczenia (próby na poziomie ufności 0,95). Na rysunku 9 przedstawiono części zespołu po próbach wytrzymałościowych.



Rys. 8. Części zespołu poddane badaniom: 1) tuleja, 2) talerzyk, 3) element gwintowany

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 9. Zniszczone w próbie wytrzymałości: tulejka przy obciążeniu promieniowym (1) i osiowym (2), talerzyk (3) i element gwintowany (4) przy obciążeniu osiowym

Źródło: Opracowanie własne

Na wstępie, dla zorientowania się o symetrii i rozmyciu gęstości rozkładu prawdopodobieństwa, obliczono jego skośność i kurtozę.

Skośność (wskaźnik asymetrii) wskazuje, czy rozkład prawdopodobieństwa jest symetryczny względem osi symetrii. Jeśli wskaźnik ten jest bliski zeru, to rozkład prawdopodobieństwa można przyjąć za symetryczny [9].

Wg [10] miarę skośności układu można wyznaczyć z zależności:

$$S_K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

S_K mieści się w przedziale -1 do $+1$.

Dla elementów badanych magazynowanych $S_K = 0,157$.

Dla elementów badanych nowych $S_{K0} = 0,306$.

Wartość wskaźnika skośności dla pozostałych próbek i parametrów (symptomów) była zbliżona lub mniejsza.

Kurtoza – stopień względnego nachylenia wzniesienia krzywej rozkładu prawdopodobieństwa w sąsiedztwie wartości modalnej. Nazywana często współczynnikiem spłaszczenia lub wskaźnikiem skupienia. Można ją wyznaczyć z zależności [10]:

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (13)$$

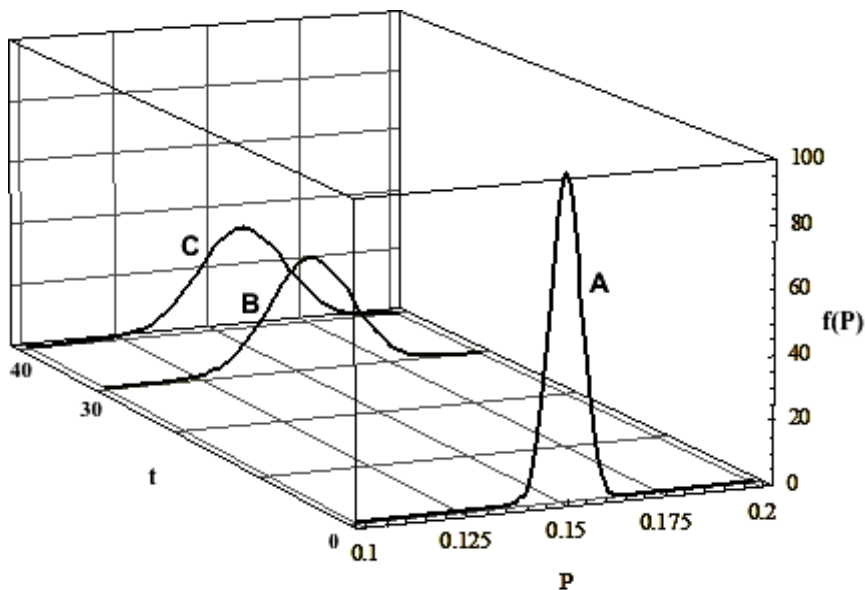
$K - 3 = \gamma$ - nazywany jest ekscesem.

Eksces dodatni wskazuje, że wykres badanego rozkładu jest wyższy i bardziej smukły (bardziej skupiony). Eksces ujemny ma znaczenie przeciwne.

Elementy nowe: $K_0 = 0,5967$; $\gamma_0 = -2,4033$.

Elementy magazynowane w okresie 30 lat: $K = 0,348$; $\gamma = -2,6519$.

Z powyższego wynika, że rozkład prawdopodobieństwa badanych obiektów jest znacząco rozproszony. Ilustruje to rysunek 10, wskazując istotnie gorsze wartości wskaźnika skośności i ekscesu dla elementów magazynowanych.



Rys. 10. Przykładowy zapis gęstości rozkładu twardości dla elementu nowego (A), magazynowanego w okresie 30 lat (B) i prognozowanego na okres następnych 10 lat użytkowania (C)

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki pomiarów i obliczeń ilustruje tabela 1 i 2.

Tabela 1. Siła niszczenia w zależności od czasu magazynowania

Element		Tuleja	Talerzyk	Element gwintowany
Parametr				
1		2	3	4
Zmierzona średnia siła niszczenia [MPa]	P_0	$4,036 \pm 0,249$	$24,27 \pm 0,54$	$3,88 \pm 0,33$
	P_{30}	$3,525 \pm 0,202$	$23,44 \pm 2,75$	$3,73 \pm 0,71$
Względna siła niszczenia $p = \frac{P}{p_0}$	p_0	$1,000 \pm 0,062$	$1,000 \pm 0,023$	$1,000 \pm 0,086$
	p_{30}	$0,876 \pm 0,063$	$0,969 \pm 0,117$	$0,961 \pm 0,191$
Współczynnik starzenia $k = \frac{(p_0 - \sigma_0)(p_t - \sigma_t)}{t}$ t = 30 lat		0,0043	0,0042	0,0047

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 2. Oczekiwany czas zdatności i prognozowana niezawodność.

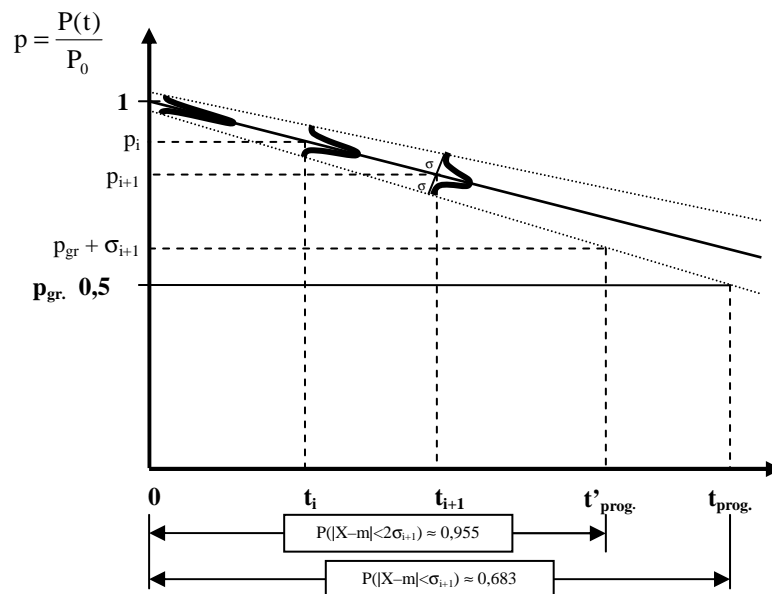
Element		Tuleja	Talerzyk	Element gwintowany
Parametr				
1		2	3	4
Oczekiwany czas zdatności elementu [12] $t_{gr.} = \frac{1}{k} \cdot [\ln p_{gr.} - \ln(p_{30} - \sigma_{30})]$ $p_{gr} = 0,5p_0 - \sigma_0$		145 lat	160 lat	126 lat
Oczekiwany czas zdatności zespołu [12] $t_s = \frac{1}{\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3}}$		~ 48 lat > 40 lat wymaganych		
Prognozowana siła niszczenia $p_{40} = p_{30} \cdot e^{-10k}$		$0,836 \pm 0,066$	$0,929 \pm 0,122$	$0,916 \pm 0,200$
Niezawodność elementu [11] $R_i = 1 - \varphi\left(\frac{p_{gr.} - p_i}{\sqrt{\sigma_{gr.}^2 + \sigma_i^2}}\right)$ $\sigma_{gr.} = \sigma_{30} \cdot e^{-k(t_{30} - t_{gr.})}$	R_{30}	0,996	0,950	0,902
	R_{40}	0,990	0,925	0,824
Niezawodność systemu [12] $R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$	R_{S30}	~ 0,853		
	R_{S40}	~ 0,755		

Źródło: Opracowanie własne

Charakterystyczna jest wysoka wartość oczekiwanego czasu zdatności elementów i istotnie niższa dla zespołu elementów, jednak spełniająca z nadwyżką wymóg zakładanego czasu życia (40 lat).

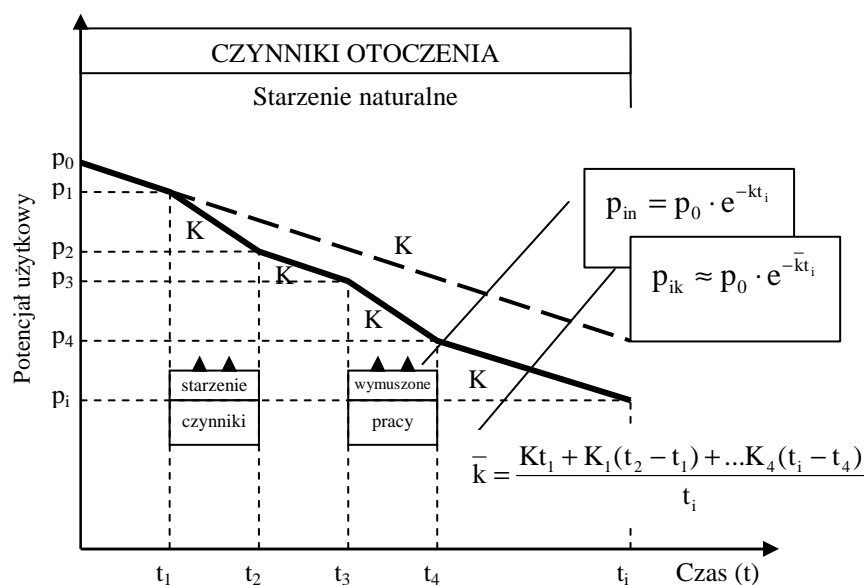
PODSUMOWANIE

Przeprowadzone analizy wykazały, że równie istotny wpływ na wartość wskaźników niezawodności mają: znaczące obniżenie wartości parametru przy niewielkiej wartości odchylenia standardowego (σ) i niewielkie obniżenie wartości parametru, ale znacząca wartość odchylenia standardowego (porównaj kolumnę 2 z kolumnami 3 i 4 tabeli 2). Dlatego przy tego typu porównaniach istotna jest wiarygodna ocena rozkładu gęstości prawdopodobieństwa mierzonego parametru. W przypadku braku informacji o wartości parametru dla $t = 0$, przedstawiony model może być wykorzystany poprzez pomiar wartości parametru (lub symptomu) w przedziale czasu odpowiedniej długości $t_i \div t_{i+1}$. Schemat graficzny takiego postępowania ilustruje rysunku 11.



Rys. 11. Schemat prognozowania czasu pracy elementu

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 12. Funkcja koincydencji starzenia naturalnego (p_{in}) i wymuszonego (p_{ik})

Źródło: Opracowanie własne

Dalszy rozwój tej metody powinien uwzględniać koincydencję starzenia naturalnego i wymuszonego – rysunek 12. Trudność wyznaczenia funkcji starzenia w tym przypadku sprowadza się do określenia stopnia wyętwienia materiału, który limituje prędkość starzenia zależną także od historii obciążeń trudnej do dokładnego odwzorowania.

LITERATURA

- [1] *Wielki słownik języka polskiego*, PWN, Warszawa 1998.
- [2] Simoni L., *Aging Theory of Engineering Materials*. [w:] „Alta freq.” No 10/1973.
- [3] Zawadzki J., *Problemy wyętwienia i znużenia polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych*. PWN, Warszawa 1978.
- [4] Zacharow K.V., *Dlitelnaja procznost stekloplastikow*. [w:] „Stroitel'naja mechanika korablja”, nr 110/1968.
- [5] Niziński S., *Eksploatacja obiektów technicznych*. Wydawnictwo ITE, Radom 2002.
- [6] Cempel C., *Life, Dynamics and Condition Monitoring of Mechanical Systems in Operation*. [w:] “II International Congress of Technical Diagnostics”, PW, 2000.
- [7] Bełzowski A., *Metoda prognozowania uszkodzeń rurociągu z kompozytu polimerowego*, [w:] „ZEM”, nr 4/2001.
- [8] Bełzowski A., *Ocena wytrzymałości długotrwałej kompozytów polimerowych z uwzględnieniem procesu degradacji i efektu skali*. [w:] „Archiwum Inżynierii Lądowej”, Warszawa 2001.
- [9] Gersternkorn T., Śródka T., *Kombinatoryka i rachunek prawdopodobieństwa*. PWN, Warszawa 1979.

- [10] Collins J. A., *Failure of Materials in Mechanical Design*, [w:] A Wiley – Interscience Publication, New York 1993.
- [11] Młynarski S., *Problemy określenia niezawodności w eksploatacji maszyn i pojazdów*, [w:] “Problemy Eksploatacji”, nr 2/2003.
- [12] Migdalski M., *Poradnik niezawodności*. Wydawnictwo WEMA, Warszawa 1982.

UPSTATE PREDICTION SIMPLIFIED MODEL OF ELEMENTS MADE OF POLYMER COMPOSITES

Summary

The paper presents the model proceeding in the case of parametric prediction of durability and dependability properties of elements made of the phenol formaldehyde polymer composite reinforced with fiberglass. On the basis of the results obtained from measurements of the selected physical and chemical parameters (and their statistical distribution) of the composite elements in the initial state and after 30 years of storage, there was a prediction made of the following operational parameters, for a singular and assembly of elements: mean upstate time, after 30 years of storage dependability and another ten years utilization durability prediction. In the authors' opinion the model can be also used to determine symptom dependability.

Key words: *durability and dependability properties prediction, phenol-formaldehyde composite*

Artykuł recenzował: dr hab. inż. Paweł DROŹDZIEL