

prof. dr hab. inż. Jan FIGURSKI
mgr inż. Piotr FONROBERT
mgr inż. Izabela MAZUR
mgr Agnieszka IGNACIUK
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

CYKL ŻYCIA AMUNICJI

Streszczenie: Amunicja jak każde urządzenie techniczne ulega w trakcie swego istnienia procesom mającym destrukcyjny wpływ na jej właściwości. Ponieważ w skład środka bojowego wchodzi materiały wysokoenergetyczne, ich niechciane zadziałanie może wywołać wydzielenie znacznej ilości energii. Biorąc pod uwagę, że ilości amunicji składowanej w Siłach Zbrojnych jest znaczna niekontrolowane zadziałanie automatycznie może spowodować wybuch masowy, przynoszący znaczne straty materialne, a także ludzkie. W niniejszym artykule przedstawiono czynniki mające wpływ na procesy destrukcyjne w materiałach składowych użytych do budowy środków bojowych, a tym samym wpływających bezpośrednio na długość życia amunicji.

Słowa kluczowe: cykl życia, środki bojowe, procesy destrukcyjne.

AMMUNITION LIFE CYCLE

Abstract: Munition, as every other device, in the course of its existence, is subject to processes, that have a devastating impact on its properties. As the composition of the combat consists of high-energy materials, its unwanted self-ignition may cause emission of a significant amount of energy. Considering the significant amount of munition stored in the Armed Forces, its' uncontrolled activation may result in a mass explosion, causing material damage and loss of life. This article presents the factors affecting the destructive processes in the materials used to build the components of munitions, directly influencing the life expectancy of munition.

Key words: life cycle, ammunition, destructive processes.

1. Wstęp

Amunicja będąca na wyposażeniu Sił Zbrojnych jest tym urządzeniem technicznym, które z uwagi na masowość występowania oraz zawartość materiałów wybuchowych w swej budowie, wymaga szczególnego nadzoru nad jej bezpiecznym eksploatacją. Wiele ośrodków naukowo-badawczych w świecie prowadzi badania aktualnego stanu technicznego składowanej amunicji by określić zachodzące w niej procesy starzeniowe. Ze szczególną uwagą traktuje się te spośród nich, które mogą obniżyć bezpieczeństwo własnych użytkowników poprzez nieprzewidziane zadziałanie („samoczynne”) lub niedziałanie w celu. Konieczna ilość amunicji przechowywanej w czasie pokoju jest znacznie większa od ilości niezbędnej w procesie wieloletniego szkolenia. Powoduje to, iż znaczne zbiorowości amunicji "dożywają" do końca okresu gwarantowanej przydatności technicznej. Wówczas przed organami, w których kompetencji jest nadzorowanie gospodarowania środkami bojowymi staje konieczność podjęcia decyzji co dalej z takimi zapasami. Ich wycofanie, ze względu

ekonomicznych, jest nieopłacalne. Aby podjąć decyzję o ewentualnym dopuszczeniu takich zasobów do dalszej eksploatacji wymagane jest opracowanie modeli ocenowych i prognostycznych. W ich opracowaniu bierze się pod uwagę wiedzę związaną z przebiegiem procesów starzeniowych. Niniejszy artykuł jest pierwszą częścią publikacji dotyczących metodologii opracowywania wyników badań diagnostycznych w oparciu o informacje z eksploatacji i istniejące modele procesów starzeniowych dla elementów składowych amunicji.

2. Modele spadku właściwości chemicznych

W reakcjach chemicznych zależność od temperatury definiowana jest przez energię aktywacji. Zmodyfikowane równanie Arrheniusa (1) przedstawia szybkość reakcji w zależności od temperatury:

$$F = (k_1/k_2) = e^{\{(-E/R) * [(1/T_1) - (1/T_2)]\}} \quad (1)$$

gdzie: F – współczynnik przyspieszenia reakcji;

k_1, k_2 – szybkość reakcji w różnych temperaturach T_1 i T_2 ;

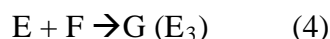
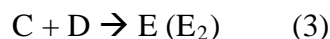
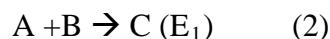
T_1 – temperatura testu (K);

T_2 – temperatura odniesienia (K);

E – energia aktywacji (J/mol);

R – uniwersalna stała gazowa (8,314/mol*K).

Przyjmuje się, że podczas starzenia się amunicji ma miejsce więcej niż jeden proces degradacji jej właściwości. Przyjęty model determinuje, które zdarzenie degradacji własności prawdopodobnie wystąpi. Główny proces dla każdego modelu jest reprezentowany przez następujące po sobie reakcje chemiczne (2)-(4):



gdzie E_n jest energią aktywacji n-tego stopnia w ciągu reakcji. Każdy ciąg będzie mieć jeden stopień, który kontroluje szybkość reakcji całego ciągu. Energia aktywacji dla stopnia kontrolującego szybkość reakcji musi być zmierzona lub oszacowana dla każdego potencjalnego trybu zmian/starzenia. Wtedy w równaniu Arrheniusa na szybkość reakcji używana jest najniższa energia aktywacji do wyznaczenia F, czyli minimalnego stosunku, który równy jest całkowitemu współczynnikowi „przyspieszenia” pomiędzy długością przyspieszonego dziennego/dobowego cyklu/okresu i odpowiadającego mu okresu użytkowania/przydatności.

Jeżeli magazyn w składzie środków bojowych jest poddany zmieniającym się temperaturom, takim np. jak dzienne, klimatyczne cykle temperaturowe, obliczenia komplikują się i konieczne jest obliczenie „wartości średniej” temperatury cyklu i cząsteczkowej energii aktywacji dla stopnia krytycznego. Każdy cykl określa najbardziej krytyczne warunki składowania, możliwe do zaistnienia w danej kategorii klimatycznej. Jako maksymalną temperaturę dla danego cyklu składowania przyjmuje się najbardziej prawdopodobną, podwyższoną chwilowo temperaturę powietrza w niewentylowanym obszarze składowania, który jest bezpośrednio narażony na ekspozycję promienia słonecznego, w najgorętszej części regionu/obszaru, w którym rozmieszczone są magazyny.

Przyjmowany średni czas takiej ekspozycji jest równy około 7-8 godzin w roku. Ponieważ ten cykl nie odpowiada średnim, rocznym warunkom przechowywania, może być on stosowany w badaniach przyspieszonego procesu starzenia w podwyższonej temperaturze, w stosunku do tej, która rzeczywiście występującej w procesie eksploatacji. Występujące w cyklu dobowym obniżenie temperatury nie wpływa na pogorszenie właściwości chemicznych, ponieważ obniżenie to z zasady obniża szybkość procesów fizyko-chemicznych. Wyłączeniem są możliwe zmiany faz i krystalizacja materiałów amorficznych, takich jak np. gumy.

Temperatura odniesienia (T_2) jest wartością średnią z zarejestrowanych warunków składowania. Jeśli taka informacja nie jest dostępna, T_2 przyjmuje się jako „uśrednioną” roczną temperaturę wyliczoną na podstawie danych STANAG 2895 dla zdefiniowanych klimatycznie regionów świata. Dla przykładu wynosi ona 20°C dla warunków składowania w Polsce i Wielkiej Brytanii¹.

Należy podkreślić, że wartości T_1 , T_2 i E znacząco wpływają na obliczoną wartość F ze względu na wykładniczy charakter równania.

Wpływ różnych wartości energii aktywacji na współczynnik przyspieszenia reakcji dla danych wartości T_1 (60°C) i T_2 (20°C) został przedstawiony w Tabelicy 1.

Wpływ na wartość F cząsteczkowej energii aktywacji, gdy temperatura badań jest stała i wynosi 60°C a temperatura odniesienia jest zmienna, przedstawia Tablica 2.

Realna prognoza „czasu życia” oparta na procesie przyspieszonego starzenia uzależniona jest od dokładności danych wejściowych.

Tablica 1. Wartości względnej szybkość F dla temperatury 20°C i różnych wartości energii aktywacji.

E_a (kJ/mol)	Względna szybkość (F)	Przybliżony czas życia (lata) w 20°C (test 15 tygodni w 60°C)
50	11,7	3
60	19,2	5
70	31,4	9
75	40,2	12
80	51,4	15
90	84,1	24
100	137,6	40

¹ Global Climatic Data for Developing Military Products, Department of Defense Handbook, June 1997

Tablica 2. Względna szybkość F w różnych temperaturach odniesienia T₂ dla stałej energii aktywacji 70kJ/mol⁻¹.

Temperatura T ₂ (°C)	Względna szybkość (F)	Czas życia (lata) w T ₂ przez 15 tygodni w 60°C
20	31,6	9
25	19,5	6
30	12,2	4
35	7,8	2

Wartości energii aktywacji dla układów wybuchowych zawierają się w zakresie 40-200 kJ/mol⁻¹. Obejmują one termiczny rozkład pierwszego rzędu materiałów wybuchowych i pseudo jednocząsteczkowych reakcji charakteryzujących oddziaływanie wilgoci na mieszaninę pirotechniczną.

W przypadku, gdy wnikanie i dalsze reakcje wilgoci doprowadzają do zniszczenia/uszkodzenia, wartość E będzie zależna od szybkości dyfuzji przez uszczelnienie.

Dla materiałów używanych w systemach uzbrojenia, reakcje o niskich wartościach energii aktywacji, przebiegają szybciej w temperaturze 20°C, niż w tych o wyższej wartości. Nawet bardzo podobne do siebie materiały, takie jak paliwa z konkretnej grupy, mogą wykazywać znaczne różnice w energiach aktywacji.

Tablica 3. Wartości energii aktywacji dla przykładowych rodzajów procesów destrukcyjnych mogących występować w środkach bojowych .

Tryb zmian	Energia aktywacji (kJ/mol)
Dyfuzja wilgoci przez uszczelnienie	70
Migracja plastyfikatora paliwa/ładunku napędowego	50-75
Starzenie się gum	85-95
Rozkład termiczny MW	150-200
Rozkład termiczny MW inicjujących	90-120
Pękanie paliwa	100

Do prognozowania bezpieczeństwa życia/użytkowania paliw/ładunków napędowych może być zastosowane Prawo Berthelota. Pomiar zużycia stabilizatora w różnych temperaturach dostarczy danych, które umożliwią wyznaczenie krzywej zależności temperatury (T) od czasu (log t) dla różnego stopnia zużycia stabilizatora. Jeżeli otrzymane wykresy są liniowe, proces następuje według prawa Berthelota (5), które może być wyrażone jako:

$$T = -1/a \log t + 1/a * (\log c - b) \quad (5)$$

gdzie:

a i b - są współczynnikami charakterystycznymi dla badanego materiału;
c - stężenie stabilizatora.

Nachylenie linii może być zdefiniowane przez współczynnik γ_{10} , odpowiadający wzrostowi szybkości reakcji spowodowanemu zmianą temperatury o 10°C.

3. Modele powstawania niezgodności mechanicznych

NIEZGODNOŚCI MECHANICZNE

- *Krucze pękanie*

Ma miejsce w przypadku, gdy występujące w materiale naprężenia są większe od wartości wytrzymałości materiału. Prowadzą one do pęknięcia. W zależności od wielkości naprężeń następować może szybkie powiększanie/rozszerzenie pęknięcia.

- *Zmęczenie*

Powstaje pod wpływem obciążenia cyklicznego prowadzącego do pojawiania się pęknięć.

- *Zerwanie ciągłości*

Występuje, gdy szczelina pęknięcia przekroczy wartość graniczną, wówczas wiązania międzycząsteczkowe pękniętej części są mniejsze od naprężeń pojawiających się w trakcie eksploatacji środka bojowego.

- *Uszkodzenie z powodu nieszczelności*

Występuje z warunkach braku hermetyczności pojemnika/opakowania.

- *Korozja, erozja, zmęczenie materiału korozją, naprężenia korozyjne*

Powstaje w wyniku czynników środowiskowych, które mogą spowodować uszkodzenie materiału (np. korozja).

- *Odkształcanie*

Powstaje wówczas, gdy siła destrukcyjna ma wartość większą od granicy plastyczności materiału (wytrzymałość materiału na odkształcanie jest niższa od występującego obciążenia).

- *Pełzanie*

Pełzanie to powolne, stałe rozszerzanie makroskopowe pęknięcia.

- *Wady wynikające z pierwotnych odstępstw*

Początkowe niedoskonałości/wady mogą spowodować, na skutek pojawiających się naprężeń mniejszych od krytycznych niezgodności w osłabionych obszarach.

- *Ścieralność*

Ścieralność jest zjawiskiem zużywania powierzchni, które obejmuje stopniowe straty materiału i zmniejszenie wymiarów po pewnym czasie trwania procesu.

Powyższe rodzaje procesów powstawania niezgodności są ich podstawowymi rodzajami. W warunkach eksploatacyjnych występują uszkodzenia, będące skutkiem występowania kombinacji wyżej wymienionych procesów.

ZMECZENIE

Zjawisko pęknięcia materiału pod wpływem cyklicznie zmieniających się naprężeń określane jest terminem zmęczenia materiału.

Obciążenia zmęczeniowe są obciążeniami zmiennymi w czasie, typowymi dla różnorodnych części i podzespołów. Odpowiadające im naprężenia nazywane są naprężeniami zmiennymi lub naprężeniami zmęczeniowymi. Przebieg obciążeń zmiennych w czasie jest określany jako widmo obciążenia. Może przebiegać nieregularnie, przypadkowo lub w sposób ustalony.

Gdy segmenty obciążenia powtarzają się, co jest charakterystyczne dla obciążenia okresowo zmiennego, nazywane są obciążeniem cyklicznym. W ciągu jednego okresu zachodzi pełen cykl zmian obciążenia, a analogicznie do tego - pełen cykl zmian naprężenia. Szczególnym przypadkiem obciążenia okresowo zmiennego jest obciążenie sinusoidalnie zmiennie. Obciążenie to zostało przyjęte za podstawę wyznaczania właściwości zmęczeniowych materiałów i elementów konstrukcji. Cykl naprężeń sinusoidalnie zmiennych jest opisany przez parametry: naprężenie maksymalne cyklu σ_{\max} , naprężenie minimalne cyklu σ_{\min} , okres zmian T lub jego odwrotność: częstotliwość zmian f .

Wytrzymałość zmęczeniowa to graniczna amplituda naprężeń, poniżej której materiał nie ulega zniszczeniu (przy danej liczbie cykli - liczba cykli to wynik pojedynczego badania zmęczeniowego).

Na poziomie mikrostruktury powstaje skumulowanie uszkodzenia, które może wiązać się z rozpoczęciem i postępowaniem pęknięcia. Wygodnym sposobem scharakteryzowania zachowania zmęczenia materiału jest użycie krzywej S-N, gdzie S jest stosowane w amplitudzie naprężenia o zerowym naprężeniu, a N jest liczbą cykli prowadzących do zmian/zniszczenia. Dla wielu materiałów, takich jak metale, krzywą S-N można określić przez następującą zależność (6):

$$N S^b = C \quad (6)$$

gdzie b i C są charakterystyczne dla danego materiału. Ponadto, amplituda naprężenia ma próg, poniżej którego zmęczenie nie występuje.

Krzywe S-N można znormalizować stosując schemat Goodmana.

Do prognozowania żywotności pod obciążeniem w różnych amplitudach naprężeń można użyć hipotezy Minera (7), w której po prostu dodaje się proporcję żywotności używania w różnych amplitudach naprężeń, aż do osiągnięcia wartości 1. W szczególności narażenie materiału na zniszczenie podczas stosowania połowy n_i cykli naprężeń z amplitudą s_i określa się według następującego równania:

$$d_i = (n_i s_i^b) / 2C \quad (7)$$

Do określenia łącznego wpływu różnych obciążeń, wykorzystuje się hipotezę zmęczeniową Minera. W myśl tej hipotezy, konstrukcja poddana działaniu naprężeń $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ i odpowiadającej im liczbie cykli obciążeń n_1, n_2, \dots, n_m ulega zniszczeniu, gdy szkoda zmęczeniowa D jest równa 1.

Podstawowe założenia hipotezy Minera:

- każde naprężenie σ_i bierze udział w uszkodzeniu elementu,
- uszkodzenia nie są zależne od lokalizacji σ_i w całym cyklu naprężeń,,
- całkowite uszkodzenie jest równe sumie uszkodzeń wywołanych przez każde σ_i oddzielnie.

Takie ujęcie jest najczęściej realizowane z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania metodą typu Rainflow do sumowania skumulowanego uszkodzenia.

Amunicja jest wykonana z różnych materiałów. Aby w pełni wykorzystywać to podejście, wymagane jest, aby naprężenia w danym miejscu, na przykład funkcji koncentracji

naprężeń występowały pod obciążeniem dynamicznym. Może to być oceniane przy użyciu modelu skończonego elementu do przewidzenia historii naprężeń ze względu na dynamiczne (lub termiczne) obciążenie amunicji.

MECHANIKA POWSTAWANIA PEKNIĘĆ

Odpowiednikiem zakresu naprężeń mechaniki pęknięcia $\Delta\sigma$ jest czynnik intensywności zakresu naprężeń ΔK . Współczynnik intensywności naprężeń zależy od przyłożonego naprężenia, geometrii i wielkości szczeliny. Paris i współpracownicy wykazali, że K jest przydatne do określenia parametru wzrostu pęknięć przez zmęczenie. Dla szczeliny w ramach cyklicznego ładowania wzrost pęknięć jest funkcją ΔK , K_{\max} i K_{\min} .

Dla wielu materiałów, takich jak metale, w niskich wartościach ΔK jest zauważalna wartość graniczna, poniżej której nie występuje wzrost pęknięć. Przy pośrednich wartościach ΔK liniowa zmiana tempa wzrostu pęknięcia da/dN jest przedstawiona zgodnie z prawem Parisa (8):

$$da/dN = C \Delta K^m \quad (8)$$

gdzie

C i m - stałe dla danego materiału;

ΔK - liniowa zmiana tempa wzrostu pęknięcia.

Przy wyższych wartościach ΔK szybkie zmęczenie występuje, gdy K_{\max} zbliża się do wytrzymałości materiału na pęknięcie K_{IC} .

Wiedza o zmęczeniu i pękaniu materiału można umożliwić nadzorowanie wielkości powstających niezgodności w niektórych zastosowaniach obciążeń mechanicznych i termomechanicznych. Istniejące pęknięcia są monitorowane, a ich wpływ na zmiany cyklu życia jest szacowany dla prowadzonych obserwacji. To podejście jest zwykle opisywane przez model elementu skończonego, lecz sposób nadzorowania pęknięć w wyrobie, jakim jest środek bojowy, jest niezwykle utrudniony.

TERMOMECHANICZNE MODELE POWSTAWANIA USZKODZEŃ

Ogólnie, naprężenia termiczne są zminimalizowane przez zastosowanie materiałów o podobnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej i wysokiej termicznej dyfuzyjności (przewodność cieplna podzielona przez iloczyn ciepła właściwego i gęstości).

Ilościowe przyspieszenie rozkładu spowodowanego efektami termomechanicznymi jest trudne do oszacowania. Testowanie na większym zakresie temperatur niż przewidywany w eksploatacji prowadzi do zwiększenia mocy testu i wcześniejszą identyfikację trybów zmian, jednak bez gwarancji, że takie zmiany będą miały miejsce w rzeczywistości. Podobnie zwiększenie szybkości zmian temperatury zwiększa uciążliwość testu, lecz może również spowodować, że nie będzie on odzwierciedlał zmian w realnym środowisku. Jest zatem wskazane, aby nie przekroczyć w testach starzeniowych temperatur lub szybkości ich zmian, wykraczając poza występujące w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

4. Modele procesów destrukcyjnych w materiałach i energia aktywacji

4.1. Ogólne

Ocena cyklu życia jest nierozdzielnie związana z identyfikacją mogących pojawiać się krytycznych stanów awaryjnych będących następstwem występowania procesów destrukcyjnych bezpośrednio związanych z energią ich aktywacji. Dla materiałów użytych do produkcji elementów składowych amunicji, w tym wysokoenergetycznych, jest niezbędne

badanie i ocena parametrów materiałowych elementów składowych i zachodzących w nich procesach starzeniowych, wpływających na „życiowe” parametry amunicji.

Stany określone jako niezgodności mogące wystąpić w materiałach energetycznych, w szczególności materiałach wybuchowych, mogą przyczynić się do powstania zdarzeń katastrofalnych. Istotnym więc jest poznanie wszystkich prawdopodobnych przyczyn ich powstawania, w tym wpływu energii aktywacji na powstawanie wybranych stanów uznawanych za niezgodne.

W tej części pracy zostaną opisane procesy destrukcyjne i sposób szacowania ich rozwoju oraz wpływ na cykl życia poszczególnych rodzajów materiałów użytych do wyrobu środków bojowych.

4.2. Wnikanie wilgoci

Jednym z najbardziej powszechnych czynników wywołujących procesy prowadzące do powstawania niezgodności środków bojowych jest wilgoć i jej oddziaływanie/reakcje z materiałem wybuchowym, elementami elektrycznymi, metalami i innymi komponentami użytymi do budowy danego elementu środka bojowego. Wnikanie wilgoci z zewnętrznych źródeł, w czasie jak i po produkcji, może odbywać się na przykład poprzez bezpośredni dostęp wilgoci w postaci ciekłej lub pary wodnej. Zjawisko naskórkowości odgrywa bezpośrednią rolę przy przedostawaniu się wody przez różnego rodzaju uszczelki i uszczelnienia. Ten sposób przedostawania się wilgoci uzależniony jest od różnicy ciśnienia pary wodnej przed i za systemem uszczelnienia. Do opisu zjawiska dyfuzji wilgoci dla materiałów polimerowych, takich jak np. prochy, zazwyczaj stosuje się drugie prawo Ficka (9). To prawo jest stosowane, gdy strumień dyfuzji zmienia się lokalnie w czasie:

(9)

gdzie:

D – współczynnik proporcjonalności dyfuzji w jednostkach [długość² x czas⁻¹], np.

;

φ – stężenie [ilość substancji x długość⁻³], np. ;

x – odległość od źródła dyfundującej substancji [długość], np. m (metr);

t – czas [s].

Prawo to jest wyprowadzane z pierwszego prawa Ficka oraz prawa zachowania masy (10):

(10)

Zakładając, że wartość współczynnika dyfuzyjności D jest stała (niezależna od stężenia) można otrzymać drugie prawo Ficka w postaci (11):

(11)

W przypadku dyfuzji w przestrzeni dwu- lub więcej wymiarowej drugie prawo Ficka (12) przyjmuje postać:

$$(12)$$

czyli sprowadza się do równania przewodnictwa cieplnego.

Jeśli wartość współczynnika dyfuzyjności D nie jest stała, zależy od położenia lub stężenia, drugie prawo Ficka przyjmuje następującą postać (13):

$$(13)$$

W przypadku, gdy stężenie φ nie zmienia się w czasie, wartość po lewej stronie powyższego równania przyjmuje 0. W przypadku jednowymiarowym przy stałym D , rozwiązaniem będzie liniowa zmiana stężenia wzdłuż odległości x . W przypadku przestrzeni dwu- lub więcej wymiarowej prawo Ficka przybierze postać (14):

$$(14)$$

a zatem jest to równanie różniczkowe Laplace'a. Rozwiązaniem tego równania są zawsze funkcje harmoniczne.

4.3. Zastosowanie

Równania bazujące na prawach Ficka są szeroko stosowane w modelowaniu procesów dyfuzji, np. tkankach, neuronach, biopolimerach, farmakologii, w domieszkowaniu półprzewodników, itd. Duża liczba eksperymentów (szczególnie przy modelowaniu polimerów) dowodzi, że należy brać pod uwagę dodatkowe zjawiska, jak np. zeszklenie. Prawa Ficka są też stosowane w modelach transportu masy Onsagera.

5. Zależność temperaturowa współczynnika proporcjonalności dyfuzji

Współczynnik proporcjonalności dyfuzji D (15) często można przybliżyć:

$$(15)$$

gdzie:

- D - współczynniki proporcjonalności dyfuzji - [długość² x czas⁻¹], np. ;
- D_0 - maksymalny współczynnik proporcjonalności dyfuzji (w nieskończonej temperaturze);
- E_A - energia aktywacji dla dyfuzji w jednostce [energia x (ilość)⁻¹], kJ mol⁻¹;
- T - temperatura (w skali Kelvina lub Rankine'a);
- R - stała gazowa w jednostkach [(energia) x temperatura⁻¹ x (ilość substancji)⁻¹].

Równanie to nosi nazwę równania Arrheniusa. Współczynnik proporcjonalności dyfuzji D jest w przybliżeniu 10000 razy większy w powietrzu niż w wodzie. Na przykład dwutlenek węgla (CO_2) posiada współczynnik proporcjonalności dyfuzji D równy $16 \text{ mm}^2/\text{s}$ w powietrzu, w wodzie natomiast $0,0016 \text{ mm}^2/\text{s}$.

6. Dyfuzja przez membranę

Z pierwszego prawa Ficka wynika równanie (16):

$$(16)$$

Z równania tego wynika, że szybkość dyfuzji gazu przez membranę zależy od:

D – współczynnika dyfuzji,

K – eksperymentalnie wyznaczonej stałej dla danego gazu w określonej temperaturze,

A – współczynnika proporcjonalności do powierzchni, na której zachodzi dyfuzja,

$P_2 - P_1$ – współczynników proporcjonalności zależny od różnicy ciśnień cząstkowych gazu po obu stronach membrany oraz

d - współczynników odwrotnej proporcjonalności do grubości membrany (drogi na której zachodzi dyfuzja).

Większość dostępnych informacji o dyfuzji wilgoci dotyczy żywicy epoksydowej, dla której zmierzona doświadczalnie energia aktywacji zawiera się w zakresie $40\text{-}70 \text{ kJ mol}^{-1}$.

Wchłanianie wilgoci zwykle uplastycznia strukturę lepiszcza lub strukturę polimerowe, co zmniejsza temperaturę zeszklenia, zmniejsza naprężenia i odkształcenia, co może wywoływać skutki zarówno sprzyjające powstaniu niezgodności w niepożądanym działaniu jak i uniemożliwić takie działanie. Wilgoć może również wypierać lepiszcze z przestrzeni między materiałami. W szczególności dotyczy to połączeń metali, które mogą reagować na wilgoć wytwarzaniem wodorotlenków lub tlenków, zmniejszając wytrzymałość połączenia.

7. Podsumowanie

Niniejszej praca to próba usystematyzowania wiedzy dotyczącej możliwości szacowania okresu życia urządzenia technicznego. Obecnie metody szacowania długości życia (czasu eksploatacji) urządzenia bazują na nagromadzonych doświadczeniach zdobytych podczas eksploatacji podobnego typu urządzeń (materiałów) i modelach statystycznej kontroli jakości.

Modele statystyczne i metody predykcji nie zawierają w sobie elementów związanych z wiekiem badanych/ocenywanych urządzeń. Identycznym modelom ocenywom podlegają środki bojowe nowe, wprowadzane do Sił Zbrojnych jak również te, które mają za sobą wieloletni okres eksploatacji – składowania, dyżurów, odnow itd.

Skutkiem tego jest powstawanie niezgodności krytycznych – wad w okresie przydatności technicznej. Podejmowania decyzji o okresie bezpiecznej eksploatacji środków bojowych powiązanych z cyklem życia powinno niedogodność tę zminimalizować.

Literatura

- [1] The scientific basis for the whole life assessment of munitions, AOP-46 (Edition 1), July 2006.
- [2] Global Climatic Data for Developing Military Products, Department of Defense Handbook, June 1997.
- [3] [http://pl.wikipedia.org/ Prawa_Ficka](http://pl.wikipedia.org/Prawa_Ficka).