

Jerzy SZUMNIAK*
Zbigniew SMOCZYŃSKI
Krzysztof SZCZEŚNIAK

STARZENIE POLIMEROWYCH KOMPOZYTÓW UZBROJENIA I SPRZĘTU WOJSKOWEGO

W planowaniu operacji wojskowych konieczna jest znajomość gotowości technicznej i bojowej pojazdów. Przy organizowaniu między innymi operacji transportowych istotnego znaczenia nabiera znajomość potencjału przebiegowego poszczególnych pojazdów. Dotychczas, w sytuacji, gdy elementy decydujące o zdolności pojazdu były wykonywane z metalu, potencjał taki szacowano na podstawie różnicy pomiędzy resursem pojazdu a wskazaniem licznika przebiegu (pracy). W niniejszym opracowaniu wykazano niewłaściwość takiego podejścia w odniesieniu do elementów wykonanych z polimerów. Na przykładzie przegubu gumowo – metalowego gąsienicy podano uproszczony sposób (na podstawie pomiarów symptomów pracy) oceny utraty potencjału przebiegowego. Między innymi stwierdzono, że w ciągu 8 lat magazynowania tych elementów utrata ich potencjału użytkowego dochodzi do 40% potencjału początkowego.

Słowa kluczowe: polimery, kompozyty, sprzęt wojskowy, starzenie polimerów, potencjał użytkowy

WSTĘP

Polimery i ich kompozyty zaliczane są do grupy tzw. „tworzyw sztucznych”, nazywane są materiałami przyszłości [7]. Wciąż wytwarzane nowe kompozycje typu polimer – metal, cerpolimery, a w zakresie polimerów ich modyfikowane i wzmocnione kompozycje typu kopolimerów, laminatów i struktur sandwichowych z tworzyw termo i chemoutwardzalnych, termoplastycznych, z napełniaczami, moderatorami, plastyfikatorami, barwnikami itp., zbrojonych włóknami, tkaniną z minerałów, ceramiki, metali lub innych polimerów włóknotwórczych charakteryzują się szeroką gamą specyficznych właściwości mechanicznych, chemicznych, cieplnych,

* dr hab. inż. Jerzy SZUMNIAK, mgr inż. Zbigniew SMOCZYŃSKI, mgr inż. Krzysztof SZCZEŚNIAK - Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej

elektrycznych itp. Objętościowo polimery stanowią ponad połowę światowej produkcji stali [4, 6, 8, 9].

Jednym z czynników wywierających wpływ na rozwój przemysłu polimerów na świecie jest wzrost produkcji pojazdów samochodowych i następujące w nich zmiany jakościowe. Jakkolwiek przemysł samochodowy zużywa tylko około 8% ogólnej produkcji polimerów, stanowi on jednak istotny nośnik postępu technicznego w rozwoju tych materiałów. Wiele nowych odmian polimerów i technologii ich przetwórstwa powstało wskutek stawiania przez konstruktorów samochodów coraz ostrzejszych i zarazem specyficznych wymagań. Dlatego wybór tworzywa do danego rodzaju konstrukcji musi być poprzedzony dokładną analizą jego wszystkich właściwości fizycznych.

W ciągu ostatnich 25 lat znacząco wzrósł udział polimerów w masie całkowitej pojazdu. O ile w 1965r. średniej wielkości samochód osobowy składał się wagowo z 95% różnego rodzaju metali i około 5% polimerów, to w 2005r. zawierał około 30% masy tworzyw sztucznych (głównie polimerów i ich kompozytów). W samochodach ciężarowych dynamika przyrostu masy elementów z tworzyw sztucznych jest niższa, jednak prognozuje się, że w tych pojazdach produkowanych po 2016r. udział tworzyw sztucznych osiągnie około 20% masy pojazdu [4, 6, 10].

Główną przyczyną szerszego stosowania polimerów w pojazdach samochodowych jest dążenie do obniżenia kosztów materiałów i kosztów wytwarzania pojazdów. Średni koszt wytworzenia jednostki objętościowej polimeru jest przeszło 10-krotnie mniejszy niż stali lub żeliwa.

Światowy kryzys energetyczny postawił przemysł samochodowy w sytuacji niejako przymusowej z uwagi na konieczność oszczędności paliw płynnych. Stąd też okazało się konieczne zmniejszenie masy produkowanych pojazdów.

Najważniejsze korzyści uzasadniające stosowanie polimerów jako materiałów konstrukcyjnych to:

- zmniejszenie ciężaru jednostkowego elementów konstrukcji; np. w przemyśle motoryzacyjnym zastosowanie tworzyw sztucznych powoduje zmniejszenie ciężaru o ok. 20%, co wpływa na oszczędności w zużyciu paliwa, szczególnie ważne przy szybko rosnących ich cenach;
- łatwe formowanie elementów o skomplikowanych kształtach;
- polepszenie właściwości eksploatacyjnych, np. odporności na korozję, zdolności tłumienia drgań, elementy nie wymagają smarowania;
- obniżenie kosztów materiałów i kosztów wytwarzania elementów.

Na ogół wśród użytkowników pojazdów uważa się, że elementy wykonane z polimerów, podobnie jak z metalu, uszkadzają się na skutek przeciążeń mechanicznych i cieplnych, zużyciu tribologicznych, korozyjnych. Nie uwzględnia się starzenia. Przyczyny takich opinii są następujące:

- polimery wprowadzane są masowo w pojazdach stosunkowo niedawno – od około 20 lat, brak jest więc praktycznej wiedzy o zachowaniu się ich w eksploatacji;

- przebiegające procesy utraty własności są na ogół zewnętrznie nie obserwowalne (za wyjątkiem zmian pokryć lakierowych i ogumienia kół);
- szybkość procesów starzeniowych zależy od bardzo wielu czynników, a skutki tych zjawisk dotyczą głównie struktury wewnętrznej elementu;
- uszkodzenia, zniszczenia występują w szczególnych okolicznościach: wysokiej wilgotności, przeciążeń mechanicznych, cieplnych, wysokiego poziomu wibracji;
- w powszechnym mniemaniu społeczeństwa polimery są materiałami trudnymi do zniszczenia (metale szybko niszczy korozja), a więc uważa się, że długo zachowują one swoje własności użytkowe.

Do elementów, których wykonanie trudno było sobie do niedawna wyobrazić z innych materiałów niż metalowych czy ceramicznych, należą między innymi wykonane z polimerów i ich kompozytów:

- szyby i osłony reflektorów z poliwęglanów (PC); obok innych zalet, np. obniżenie o 50% ciężaru, umożliwiły ponad 4-krotne zwiększenie powierzchni oszklonej (zwłaszcza w autobusach) oraz wykonanie oszkleń profilowanych, co obniżyło współczynnik oporu powietrza C_x;
- całkowite wyeliminowanie metalu z konstrukcji siedzisk (ABS, PA6 zbrojony włóknem szklanym, laminat poliestrowo – szklany SMC);
- pedały sprzęgła, hamulca oraz przyspieszenia (PA66);
- zderzaki (PP, laminat poliestrowy, PE-HD);
- kolektory dolotowe silników wysokoprężnych (PA66 zbrojony włóknem szklanym);
- koła zębate napędu wałka rozrzędu, prędkościomierza, osprzętu silników wielorzędowymi paskami (PP) i innych mechanizmów;
- zbiorniki paliwa, olejów, spryskiwaczy, cieczy chłodzącej (PA66, PA-HD, POM);
- elementy prądnic, rozruszników, alternatorów (PA6, PA66, FF);
- bezobsługowe łożyska ślizgowe (PA, POM, PFE, PV, FF);
- obudowy łożysk (PA6.6, POM);
- tarcze hamulcowe (kompozyt C-C);
- belki nośne (SMC, BMC, DMC);
- elementy zawieszenia – obudowy amortyzatorów pneumatycznych, przeguby gumowo – metalowe (GR-S, SBR, NBR, SJ);
- pióra resorów (kompozyt C-C);
- przewody hydrauliczne, paliwowe, układu chłodzenia, olejowego, itd. (PC, ABS);
- osłony balistyczne pojazdów wojskowych (Kevlar).

Z analizy jakościowo – ilościowej asortymentu polimerów i kompozytów polimerowych aktualnie stosowanych w samochodach i prognoz ich udziału wynika, że stanowią one podstawowe tworzywo konstrukcyjne z dynamicznie wzrastającym

udziałem w elementach decydujących o trwałości i niezawodności pojazdu. Zastąpienie metali polimerami generuje nowe problemy w eksploatacji – obniżenie potencjału użytkowego polimerowych elementów przez procesy ich starzenia [1, 2, 5, 16, 17, 18]. W pojazdach wojskowych, w odniesieniu do pojazdu cywilnego, czynniki sprawcze procesu starzenia istotnie wpływają na utratę potencjału użytkowego, gdyż czas życia pojazdu wojskowego jest 2-3 krotnie dłuższy niż cywilnego, pojazdy przechowywane są najczęściej na wolnej przestrzeni i narażone na oddziaływanie słońca, zmiennych temperatur (od -30°C do $+60^{\circ}\text{C}$), wilgotności (od 40 do 100%), zanieczyszczeń środowiskowych, a także poddane długotrwałym i znacznym obciążeniom statycznym (stymulującym specyficzne dla polimerów procesy pełzania i relaksacji naprężeń).

1. STARZENIE POLIMERÓW

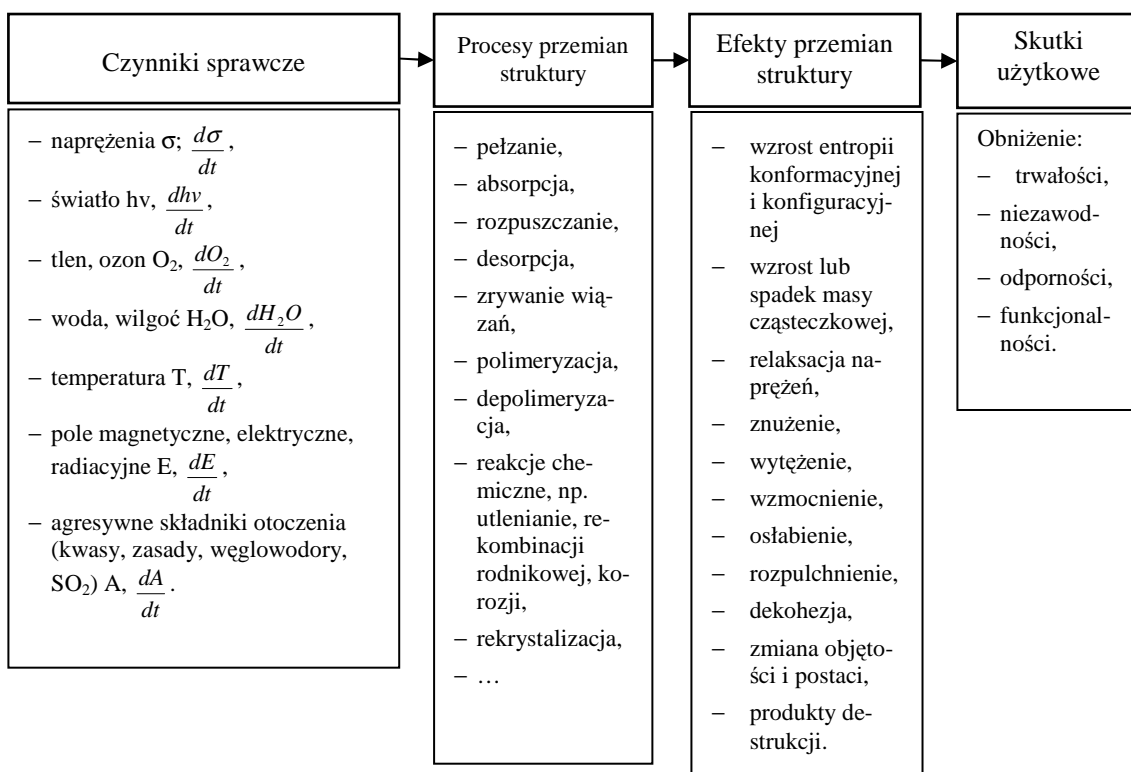
Polimery i kompozyty, w porównaniu z innymi materiałami, posiadają dużą odporność na korozję, dlatego są m.in. wykorzystywane do ochrony przed korozją innych materiałów (metali, drewna), jak również do budowy wielu elementów samochodu. Niemniej jednak podczas długotrwałego użytkowania, zwłaszcza w ekstremalnie trudnych warunkach, może następować stopniowa utrata ich pierwotnie dobrych właściwości fizycznych i chemicznych.

Starzenie jest procesem zmian strukturalnych, zachodzących w polimerze pod wpływem długotrwałego działania czynników zewnętrznych, prowadzących do pogorszenia właściwości użytkowych tworzywa. Pierwszym widocznym znakiem jest zmiana zabarwienia powierzchni, np. żółknięcie i zmatowienie.

Podczas starzenia w naturalnych warunkach klimatycznych najczęściej trudno wyodrębnić, który z czynników (rys. 1) ma wpływ dominujący, gdyż działają one jednocześnie, np. w obszarach przemysłowych w powietrzu znajdują się czynniki agresywne, takie jak di- i tritlenek siarki (SO_2 i SO_3), tlenki azotu, tlenek węgla, które w połączeniu z wilgocią tworzą mocne kwasy nieorganiczne.

Pod wpływem różnych czynników fizycznych i chemicznych w polimerach zachodzą nieodwracalne zmiany strukturalne, które powodują zmniejszenie ciężaru cząsteczkowego (degradację) lub zmianę składu chemicznego (destrukcję). Degradacja jest to rozkład polimeru polegający na rozrywaniu wiązań kowalencyjnych w łańcuchu głównym, co powoduje zmniejszenie jego ciężaru cząsteczkowego. W procesach niszczenia eksploatacyjnego zachodzi degradacja mechaniczna i termiczno-utleniająca pod wpływem naprężeń ścinających oraz ciepła i składników środowiska. Wszystkie wyżej wymienione przemiany chemiczne są bardzo złożone i często przebiegają jednocześnie.

Zmiany właściwości polimerów w czasie, prawie zawsze na gorsze w wyniku narażeń termicznych i starzenia, ograniczają i utrudniają stosowanie materiałów polimerowych w sprzęcie wojskowym. Źródłem takiego zachowania jest ich mikrobudowa na poziomie cząsteczek tworzących skomplikowane struktury, jak łańcuchy, pierścienie sieci i ich kombinacje krystaliczne, amorficzne i mieszane. Struktury te czynią polimery wrażliwe na oddziaływanie temperatury, światła widzialnego i ultrafioletu, a także wody (wilgoci), zanieczyszczeń atmosferycznych i chemicznych.



Rys. 1. Cybernetyczny schemat starzenia polimerów

Źródło: Opracowanie własne

Starzenie powodowane jest przyczynami zewnętrznymi (chemiczne i fizyczne oddziaływanie otoczenia) i wewnętrznymi (stanem nierównowagi termodynamicznej struktury molekularnej polimeru). W elemencie wykonanym z polimeru trwają zwykle bardzo powolne reakcje chemiczne, utlenianie w podwyższonej temperaturze i/lub pod wpływem światła widzialnego, ultrafioletu oraz hydroliza. Na właściwości fizyczne polimeru ma również wpływ woda i to w różny sposób: może powodować zmiany w siatce krystalicznej, trwałe mięknięcie polimeru i wyługiwanie wszelkiego rodzaju dodatków modyfikujących własności. Cykliczna sorpcja i desorpcja wody, w wyniku zmian wilgotności otoczenia, wywołuje wewnętrzne naprężenia mechaniczne dostatecznie silne, by inicjować pęknięcia. Działanie wody jest bardziej destrukcyjne, gdy w polimerze występują naprężenia wewnętrzne (własne i wywołane obciążeniem).

Polimerami podatnymi na degradację (pękanie łańcuchów), w wyniku której wydziela się monomer są: polimetakrylan metylu, poliwęglany, politetrafluoroetylen i poliacetale. Ten rodzaj degradacji nazywa się depolimeryzacją i zachodzi z dużą intensywnością głównie pod wpływem temperatury.

Należy zaznaczyć, że procesy starzenia zachodzą powoli w długim czasie. Dla tworzyw miękkich zauważalne zmiany występują po ok. 3 latach, a dla tworzyw twardych po około 5 latach.

Procesy wywołujące starzenie różnią się w sposób zasadniczy od wszystkich innych, np. korozji. Główna różnica polega na tym, że podstawowe pojęcia są słabo lub wręcz w ogóle niezdefiniowane. Zachodzi potrzeba zróżnicowania tych dwóch

podstawowych pojęć i ustalenia, który z nich nie ma charakteru nadrzędnego, więc czy np. korozja jest szczególnym przypadkiem starzenia czy może jest wręcz odwrotnie. Na ogół przyjmuje się, że są to procesy oddzielne, od siebie niezależne, co ilustruje tabela 1.

Tabela 1. Różnice między korozją a starzeniem

Wyróżnik	Korozja	Starzenie
1. Zdefiniowanie czynnika sprawczego	ściśle określone	słabo określone
2. Charakter czynnika sprawczego	chemiczny lub biochemiczny	fizykochemiczny lub fizyczny
3. Udział czynnika termodynamicznego	mało (mało istotny)	duży (podstawowy)
4. Miejsce działania	granica faz	masa materiału
5. Kierunek postępu	od powierzchni w głąb fazy	w całej objętości
6. Charakter procesu wg pozycji 4 i 5	proces powierzchniowy	proces objętościowy
7. Możliwości kontroli i ochrony	duże	małe (ograniczone)

Źródło: Opracowanie własne

W badaniach często posługujemy się pojęciami odporności i trwałości materiału. Obie te właściwości są ze sobą ściśle powiązane; odporność jest cechą pierwotną, a trwałość w stosunku do niej wtórną. Odporność jest to pewien opór materiału, jaki stawia on działaniu destrukcyjnemu jakiegoś określonego czynnika chemicznego, fizykochemicznego lub fizycznego, a nawet biologicznego. Jest ona na ogół niezdefiniowana i nie da się jej wyrazić określoną miarą. Natomiast trwałość wyraża się zawsze jednoznacznie za pomocą czasu, przy czym czas w tym przypadku traktuje się jako tzw. czas bezpiecznego użytkowania, a jego wartość można dość ściśle wyznaczyć, najlepiej metodami statystycznymi. Jest to ta właśnie właściwość materiału, która najbardziej interesuje zarówno użytkownika, jak i projektanta oraz producenta.

Czas wymieniany, jako jeden z czynników powodujących starzenie, jest wprawdzie jednym z parametrów zmiennych w tym układzie, należy jednak traktować go odmiennie – bowiem nie czas powoduje zmiany w tworzywie, lecz zmiany zachodzą w czasie.

Teoretyczny opis zachowania się polimerów w eksploatacji jest niezwykle złożony i wymaga znajomości teorii potencjałów termokinetycznych, opracowania modeli strukturalnych ciał lepko – sprężystych (Newtona, de Saint – Veneta, Kelvina – Voigta, Maxwela, Zenera), uwzględnienia teorii dziedziczności Boltzmanna, teorii wyężenia i znużenia, wibropełzania przy quasi – statycznych i dynamicznych obciążeniach [18].

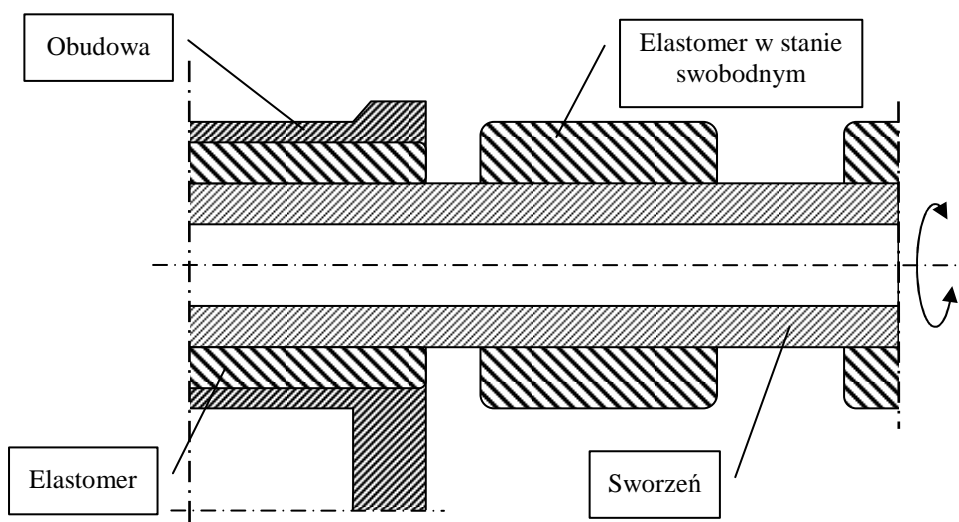
Do zmian nieodwracalnych należą przede wszystkim przemiany chemiczne zachodzące wskutek polimeryzacji, degradacji, sieciowania, utleniania oraz czynniki termodynamiczne, tj. krystalizacja i uporządkowanie makrocząsteczek. Do zmian odwracalnych zalicza się chłonność wody.

W stosunku do gotowego elementu znajdującego się w użytkowaniu rozumowanie takie wnosi tylko to, że suma tych zmian, przy dużej częstotliwości ich występowania, prowadzi do trwałych skutków pogarszających właściwości pierwotne. Oszacowanie przeprowadza się na podstawie określenia destrukcji tworzywa za pomocą

zmian wartości tej jego cechy, która najlepiej informuje o postępie destrukcji. Jest to tzw. cecha diagnostyczna, gdyż na jej podstawie wyznacza się cechę użytkową tego tworzywa.

2. OCENA STANU ZESTARZENIA POLIMERU I JEGO PROGNOZOWANIE NA PODSTAWIE OCENY ZMIAN SYMPTOMÓW

Symptom stanu jest miarą sygnału, który zmienia się istotnie wraz ze stanem obiektu [11, 12, 15]. Sygnał ten jest nośnikiem informacji o aktualnej jakości materiału elementu, układu materiałowego i może prezentować wybraną właściwość użytkową. Mierząc zmiany symptomów mechanicznych (siłę oporu), fizycznych (temperaturę, natężenie akustyczne, nasiąkliwość wodą), chemicznych (reaktywność), można określić utratę własności użytkowej, a przez to resztkowy potencjał użytkowy np. potencjał przebiegowy. Analizy zmian, w eksploatacji, jakości elementu polimerowego wykonano na przykładzie przegubu gumowo-metalowego (silentblock) powszechnie stosowanego w układach zawieszenia, sterowania i napędu (np. w gaśnicach) pojazdów. Pomiar nieniszczące symptomów wykonano na przegubie gaśnicy (rys. 2), magazynowanego w okresie 8 lat i eksploatowanego na przebieg 4000km i 6780km w okresie 8 lat. Jako bazę odniesienia przyjęto przegub o przebiegu według odbiorczych prób fabrycznych magazynowanego w okresie 2 lat. Badanie przeprowadzono według metody przedstawionej w publikacji [14].



Rys. 2. Schemat przegubu typu „silentblock”

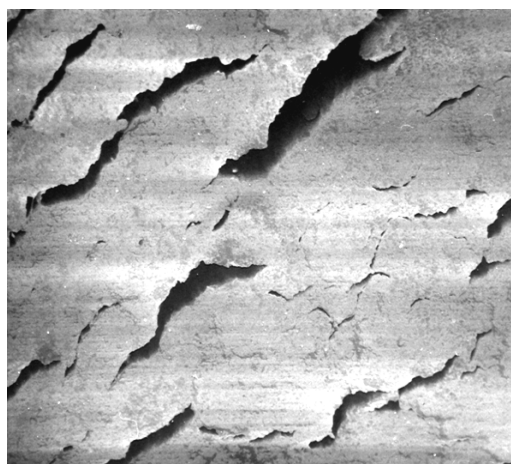
Źródło: Opracowanie własne

Wykonano następujące czynności:

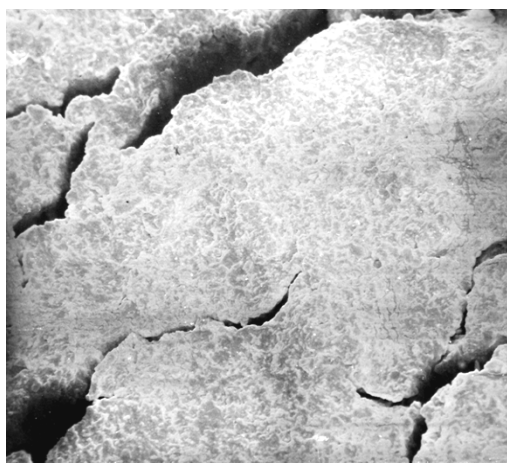
- oględziny zewnętrzne; na przegubach odniesienia powierzchnia gumy gładka (bez widocznych uszkodzeń), a na przegubach magazynowanych i po przebiegu $\geq 4000\text{km}$ w okresie 8 lat powierzchnia gumy silnie spękana (rys. 3) o rosnącej gęstości spękania ze wzrostem przebiegu;
- pomiar siły sprężystości przy kącie skręcenia $\alpha = 20^\circ$; pętlę histerezy oraz średnią siłę sprężystości przedstawia rysunek 4 ÷ 5 i tabela 2;
- pomiar temperatury przy stałej częstotliwości i amplitudzie skrętu (rys. 6, tabela 3).



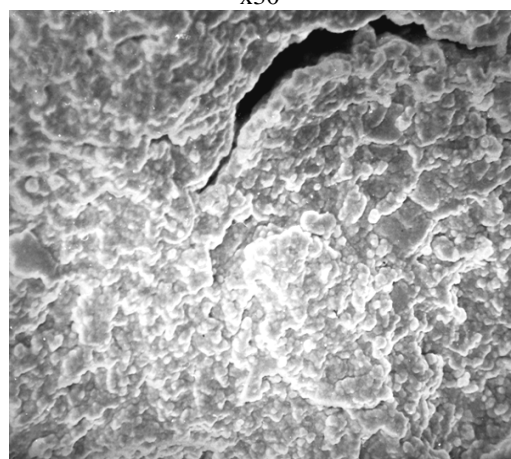
x0,75



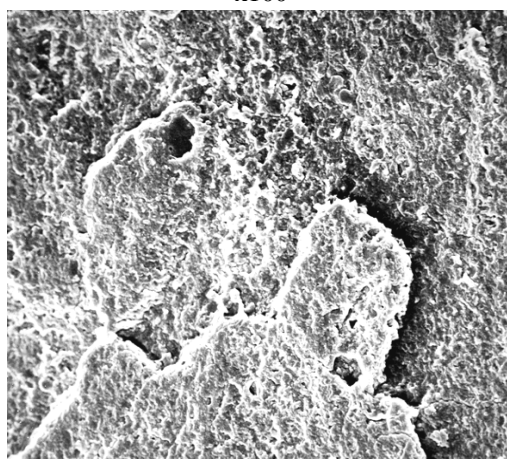
x30



x100



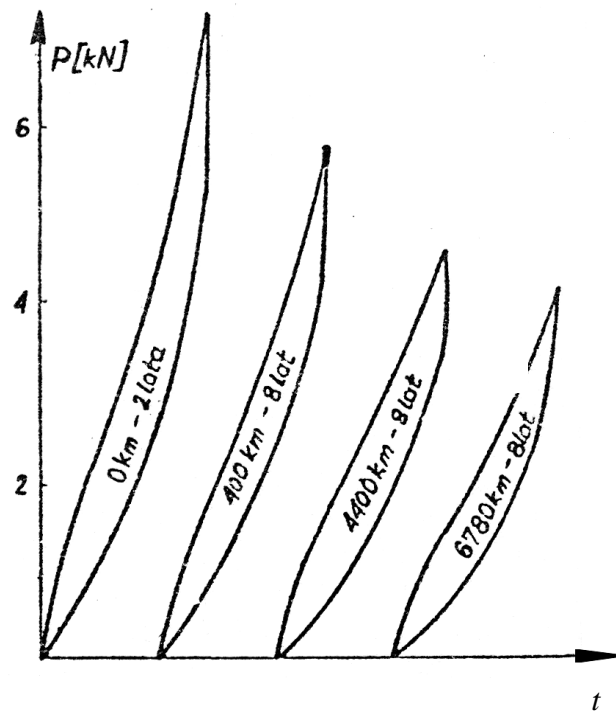
x300



x300

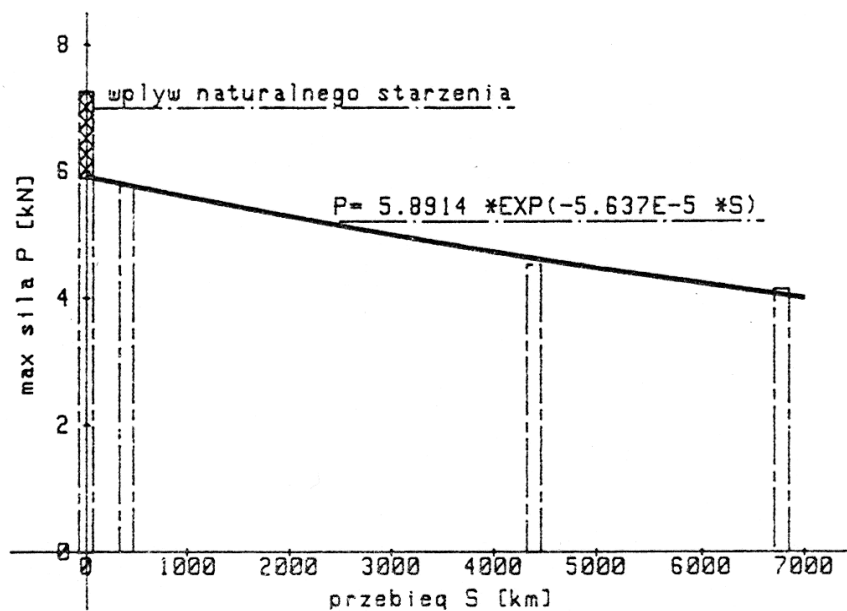
Rys. 3. Zewnętrzne oznaki (spękanie) powierzchni tulei gumowej przegubu gąsienicy po 8 letnim okresie składowania bez ochrony

Źródło: Opracowanie własne



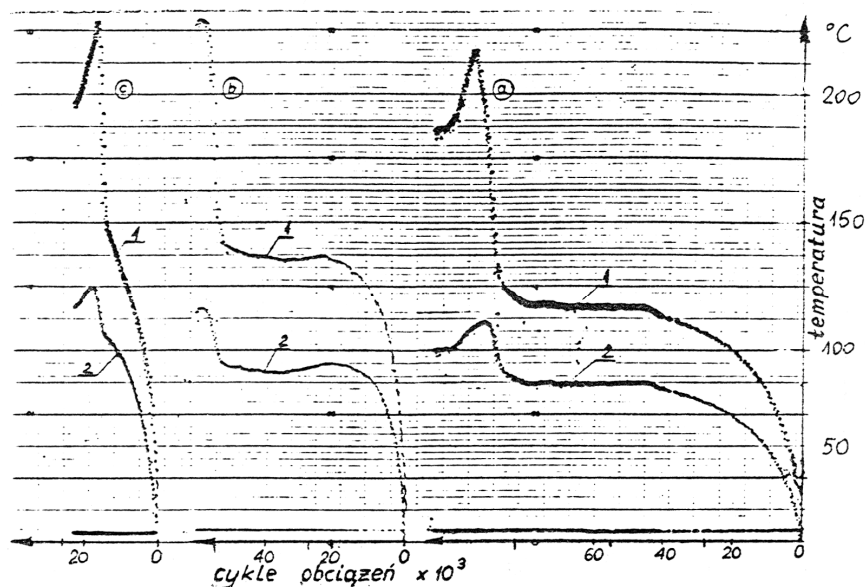
Rys. 4. Pętle histerezy przegubów gumowo – metalowych w zależności od czasu składowania i przebiegu

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 5. Zależność maksymalnej siły przy skręcaniu przegubu gumowo – metalowego w zależności od przebiegu

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 6. Przebieg temperatury w funkcji ilości cykli obciążeń wewnątrz trzpienia (1) i na zewnętrznej powierzchni obudowy (2) przegubu: a) nie eksploatowanego, b) po przebiegu 400km w ciągu 8 lat, c) po przebiegu 6780km w ciągu 8 lat

Źródło: Opracowanie własne

Resztkowy potencjał użytkowy wyznaczono przy założeniu przebiegu procesów starzenia według funkcji wykładniczej [13], tj.:

$$\frac{dp}{dt} = -k \cdot p^a \quad (1)$$

gdzie:

$$p = \frac{P(t)}{P_0}, \quad P_0 \text{ i } P(t) \text{ to wartość symptomu w chwili początkowej i po upływie}$$

czasu t ,

a – wykładnik potęgi,

k – prędkość zmiany wartości p ,

t – czas.

Krzywe zmienności parametru p dla różnego wykładnika a ilustruje rysunek 7.

Ponieważ wartość a zależy od trudnych do określenia parametrów otoczenia, przyjęto do analizy $a = 1$. Przyjęcie $a > 0$ jest zasadne, gdyż krzywe trwałości z upływem czasu z reguły maleją, zbliżając się asymptotycznie do wartości granicznej [13].

$$\frac{dp}{dt} = -k \cdot p \quad (2)$$

$$\ln p + c = -k \cdot t$$

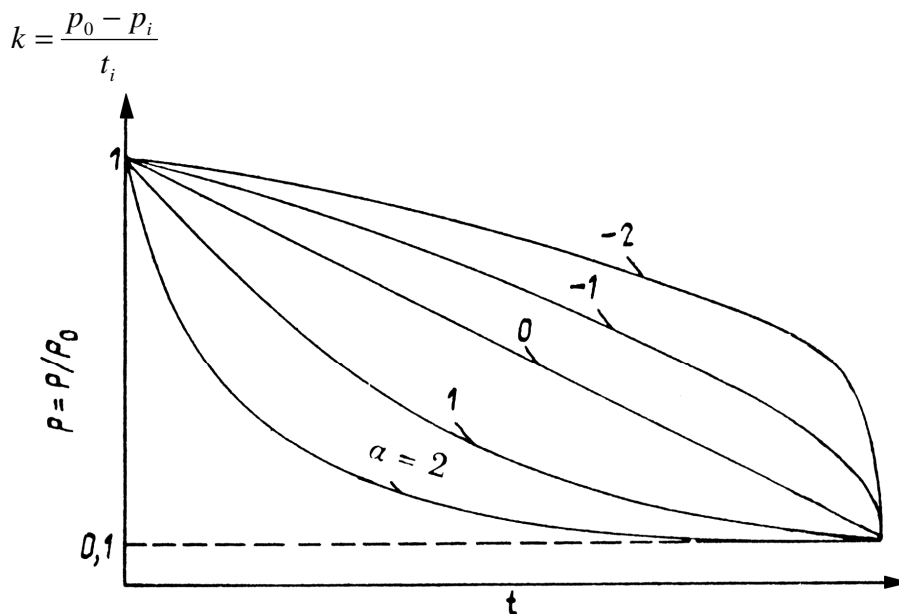
dla: $t = 0, p = p_0$

$$c = -\ln p_0$$

$$\ln p - \ln p_0 = -k \cdot t$$

$$t = \frac{1}{k} \cdot \left(\ln \frac{p_0}{p} \right) \quad (3)$$

gdzie:



Rys. 7. Wpływ wartości wykładnika potęgi a na kształtowanie się parametru $P(t)$ według [13]

Wyznaczenie symptomu p_{gr} jest żmudne i wymaga licznych badań eksperymentalnych (wysokie koszty) [12]. W dalszych analizach przyjęto współczynnik bezpieczeństwa – dla malejącej z czasem użytkowania wartości symptomu $p_{gr} = 0,5p_0$, a dla rosnącej $p_{gr} = 2p_0$. Uwzględniając rozrzut wyników pomiarów, przyjęto:

$$p_i = \frac{P_i - \sigma_i}{P_o + \sigma_o} \quad \text{dla } P \downarrow$$

$$p_i' = \frac{P_i' - \sigma_i'}{P_o - \sigma_o} \quad \text{dla } P \uparrow$$

gdzie:

σ – odchylenie standardowe zmiennej losowej

Resztkowy potencjał użytkowy (w przedmiotowych badaniach potencjał przebiegowy) τ wyliczono (tabela 2) z zależności:

$$\tau_1 = \frac{4000}{8(k_3 - k_2)} \ln \frac{p_1}{p_4} \quad (4)$$

$$\tau_{i(2,3)} = \tau_1 \ln \frac{P_{i(2,3)}}{p_4} \quad (5)$$

natomiast dla
$$\tau_1' = \frac{6780}{8(k_3' - k_2')} \ln \frac{p_1'}{p_4'} \quad (6)$$

$$\tau_{i(2,3)}' = \tau_1' \ln \frac{P_{i(2,3)}'}{p_4'} \quad (\text{tabela 3}). \quad (7)$$

Tabela 2. Prognozowana trwałość (w km) przegubu gumowo – metalowego gąsienicy na podstawie zmian wartości siły oporu skręcania i % utraty potencjału

Lp.	Parametr	Siła oporu skręcania o $\alpha=20^\circ$ P [kN]	Wyniki obliczeń		
	Historia eksploatacji:		p	k [1/r, 1/km]	Potencjał przebiegowy τ [km]
1	Elementy nowe	7,00 ± 0,05	1,000	–	16 758
2	Elementy magazynowane przez 8 lat	6,00 ± 0,07	0,841	0,0198 [1/rok]	9318 (44%)
3	Elementy użytkowane na drodze 4000km w okresie 8 lat	4,80 ± 0,10	0,667	0,0416	5438 (67%)
4	Granica bezpieczeństwa	3,50 ± 0,10	0,482	–	0,0

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 3. Prognozowana trwałość (w km) przegubu gumowo – metalowego gąsienicy na podstawie zmian temperatury na granicy polimer – metal % utraty potencjału po 10^3 cykli skręcania o kąt $\alpha = 20^\circ$

Lp.	Parametr	Temperatura pow. tulei p [°]	Wyniki obliczeń		
	Historia eksploatacji:		p'	k'	Potencjał przebiegowy τ' [km]
1	Elementy nowe	90 ± 2	1,00	–	16 843
2	Elementy magazynowane przez 8 lat	110 ± 3	1,28	0,035	9884 (40%)
3	Elementy użytkowane na drodze 6780km w okresie 8 lat	135 ± 5	1,59	0,07375	5160 (69%)
4	Graniczna temperatura pracy	180 ± 10	2,16	–	0

Uwaga: Potencjał przebiegowy elementu nowego wyznaczono na podstawie wyników pomiarów (poz. 3, tabela 2, 3) po odrzuceniu wpływu 8-letniego przechowywania (wzór 4 i 6). Pozwoliło to na wyznaczenie potencjału przebiegowego zarówno elementów tylko przechowywanych jak i łącznie po przechowywaniu i przebiegu (wzór 5, 7, tabela 2, 3 poz. 3).

Źródło: Opracowanie własne

WNIOSKI

Na podstawie studiów literatury i analiz wyników eksperymentów, które zilustrowano przykładowo dla przegubu gumowo-metalowego, można sformułować następujące wnioski:

1. Ze wzrostem udziału materiałów polimerowych w sprzęcie wojskowym, przy dotychczasowych metodach magazynowania (składowania) sprzętu, wzrastać będzie ubytek jego potencjału użytkowego.

Ponad 50% utraty potencjału użytkowego niektórych materiałów polimerowych (np. elastomerów) przechowywanych w niewłaściwych warunkach (bez osłon, atmosfera przemysłowa) może nastąpić w okresie < 10 lat.

2. Dla opóźnienia procesów starzenia materiałów polimerowych należy na szerszą skalę stosować między innymi niżej wymienione sposoby zapobiegania:

- odprężanie (odciążanie) naprężonych elementów polimerowych, np. zmniejszenie ciśnienia w oponach, obniżenie napięcia gąsienic z przegubem gumowo-metalowym, stosowanie podpór,
- chronienie przed światłem i promieniowaniem ultrafioletowym,
- przechowywanie sprzętu w miejscach o niewielkich dobowych wahaniami temperatury i wilgotności,
- unikanie przechowywania sprzętu w pomieszczeniach nadmiernie suchych (poniżej 40% wilgotności względnej); optymalne warunki to temperatura $15 \div 20^{\circ}\text{C}$, wilgotność $50 \div 60\%$,
- chronienie sprzętu przed oddziaływaniem agresywnych gazów i cieczy (węglowodory, kwasy, zasady inne płyny eksploatacyjne),
- przechowywanie sprzętu z dala od źródła ciepła,
- utrzymywanie sprzętu w stanie czystości, należy czyścić sprzęt bezpośrednio po pracy, stosować do mycia, czyszczenia i konserwacji tylko środki zalecane przez producentów sprzętu,

3. Systematycznie monitorować stan sprzętu (stopień zesterzenia) i na tej podstawie prognozować jego potencjał użytkowy. Wyniki prognozy powinny być podstawą do planowania nie tylko procesów transportowo-bojowych, ale także rotacji, napraw konserwacyjnych, regeneracji układów.

4. Zwiększyć wymagania dla producentów w zakresie stosowania, w sprzęcie wojskowym, materiałów polimerowych o zwiększonej odporności na starzenie, większej niż stosowanych w sprzęcie użytku cywilnego. W badaniach kwalifikacyjnych sprzętu testować elementy z materiałów polimerowych na trwałość starzeniową (metodami przyspieszonymi).

LITERATURA

- [1] Bełzowski A., *Metoda prognozowania uszkodzeń rurociągu z kompozytu polimerowego*, [w:] „ZEM”, nr 4/2001.

- [2] Bełzowski A., *Ocena wytrzymałości długotrwałej kompozytów polimerowych z uwzględnieniem procesu degradacji i efektu skali*, [w:] „Archiwum Inżynierii Lądowej”, 2001.
- [3] Cempel C., *Life, Dynamics and Condition Monitoring of Mechanical Systems in Operation*. [w:] II International Congress of Technical Diagnostics, PW, 2000.
- [4] Demmler A., *Trends in automotive materials*. [in:] “Automotive Engineering International”, No 12/1998.
- [5] Gębura A., Kowalska D., *Badania przyspieszonego starzenia przewodów elektrycznych*, [w:] Prace Naukowe ITWL, Zeszyt 17, 2003.
- [6] Głowacz J., Kaczmar J.W., Nakonieczny L., *Zastosowanie kompozytów polimerowych i tworzyw sztucznych w przemyśle samochodowym*, [w:] „Mechanik”, nr 7/2005.
- [7] Kasprzak W., Pelc K., *Wyzwania technologiczne - prognozy i strategie*. Wyd. Profesjonalna Szkoła Biznesu, Kraków 1999.
- [8] *Konstrukcyjne tworzywa sztuczne*, [w:] „MTM”, nr 1/2006.
- [9] Królikowski W., *Kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami Trendy rozwojowe*, [w:] „Inżynieria Materiałowa”, nr 1(126)/2002.
- [10] *Material Innovations*, [in:] „Automotive Engineering International”, nr 9, 10, 11, 2005; 5, 7, 10, 11, 2003.
- [11] Młynarski S., *Problemy określenia niezawodności w eksploatacji maszyn i pojazdów*. [w:] „Problemy Eksploatacji”, nr 2/2003.
- [12] Niziński S., *Eksploatacja obiektów technicznych*, Wyd. ITE, Radom 2002.
- [13] Simoni L., *Aging Theory of Engineering Materials*, [in:] “Alta freg.”, No 10/1973.
- [14] Smoczyński Z., *Trwałość gumowo-metalowych przegubów gąsienic pojazdów mechanicznych*, [w:] „Informator WITPiS”, 1987.
- [15] Starczewski L., Szumniak J., Nyc R., *Uproszczony model predykcji stanu zdatności elementów wykonanych z polimerowych kompozytów*, [w:] „Zeszyty Naukowe WITPiS”, 2004.
- [16] Tapoliński T., *Możliwość oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego w trakcie eksploatacji elementów wykonanych z tworzyw polimerowych*, [w:] „Problemy Eksploatacji”, nr 3/2001.
- [17] Zacharow K.V., *Dlitelnaja procznost stekloplastikov*, [w:] „Stroitel'naja mechanika korablja”, nr 110/1968.
- [18] Zawadzki J., *Problemy wyężenia i znużenia polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych*, PWN, Warszawa 1978.

**ARMAMENT AND MILITARY
EQUIPMENT POLYMER COMPOSITE AGEING**

Summary

In the process of planning military operations, it is necessary to know technical and combat readiness of vehicles. Knowledge of the pass mode potential of individual vehicles is very important while organizing transport operations. So far, in a situation where the elements determining the suitability of a vehicle were made of metal, such potential has been estimated on the basis of the difference between the service life of a vehicle and meter readings. The following study demonstrates the inappropriateness of such an approach in relation to elements made of polymers. A simplified way of assessing loss of the pass mode potential (based on measurements of the labor symptoms) has been presented based on an example of a rubber and metal joint of a caterpillar. It was found that during 8 years the storage of these elements, their utility potential loss is up to 40% of the initial potential.

Key words: *polymers, composites, military equipment, polymer ageing, utility potential*

Artykuł recenzował: prof. dr hab. inż. Jan GODZIMIRSKI