

WPLYW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI PODŁOŻA ZE STALI I GRUBOŚCI POWŁOKI KOMPOZYTOWEJ NA JEJ WYTRZYMAŁOŚĆ NA ODRYWANIE

Mirosław Walkowski

Instytut Podstaw Budowy Maszyn Okrętowych, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia

1 WSTĘP

Polimery są stosowane do łączenia konstrukcji lotniczych od lat pięćdziesiątych poprzedniego stulecia. Dla przykładu w samolocie Boeing 747, 62% powierzchni, a w samolocie Lockheed C5A, 3250 m² stanowią konstrukcje klejone [1].

Inaczej przedstawia się sprawa w okrętownictwie. W budowie statków o kadłubach stalowych rzadko stosuje się polimery, jedynie na podkładki fundamentowe przy posadawianiu silników lub do nakładania powłok chroniących przed korozją.

Szerzej natomiast stosuje się polimery przy remontach statków [9], a zwłaszcza:

- przy naprawie stożkowych i kołnierзовych połączeń urządzeń sterowych i wałów okrętowych,
- montażu łożysk linii wałów i urządzeń sterowych,
- remoncie i montażu śrub napędowych,
- przywracaniu szczelności konstrukcji okrętowych, utraconej wskutek uszkodzeń korozyjnych (za wyjątkiem konstrukcji tworzących wodoszczelny obrys kadłuba statku i grodzi wodoszczelnych),
- posadawianiu na fundamentach silników, mechanizmów i urządzeń okrętowych i odnawianiu powłok chroniących przed korozją.

Zastosowanie polimerów przyczyniło się do znacznego skrócenia czasu i zmniejszenia kosztów remontu [9]. Powyższe fakty pozwalają uznać za celowe podjęcie pracy nad rozszerzeniem stosowania polimerów w remoncie statków.

W wyniku przeglądu literatury [2, 4, 5, 6, 7, 8, 10] uzyskano następujące informacje:

- w budowie statków o kadłubach stalowych rzadko stosuje się polimery, szerzej natomiast są one wykorzystywane przy remontach statków,
- brakuje wystarczających danych o zachowaniu się polimerów w warunkach działania kawitacji,
- nie ma jednoznacznej oceny obróbki mechanicznej elementów ze stali dla przygotowania ich powierzchni do nałożenia polimerów,
- nakładanie powłoki polimerowej na elementy w polu działania ultradźwięków znacznie zwiększa gęstość, i wodoodporność powłoki polimerowej [3].

2 CEL PRACY

Informacje znalezione w dostępnej literaturze nie są wystarczające do wyjaśnienia zagadnień związanych z ochroną elementów konstrukcji okrętowych przed erozją kawitacyjną.

Stąd celem pracy było:

- 1 Przebadanie odporności powłok polimerowych blach ze stali niestopowych używanych do budowy okrętów na erozję kawitacyjną.
- 2 Podjęcie próby wyjaśnienia zależności przyczepności powłoki polimerowej od parametrów chropowatości podłoża stalowego.
- 3 Sprawdzenie, jak obróbka ultradźwiękami wpływa na wytrzymałość adhezyjną i odporność powłoki polimerowej na kawitację.

3 MATERIAŁY I METODYKA

Założone cele zrealizowano w dwóch etapach. Pierwszy etap obejmował wytypowanie materiałów powłokowych (dwóch z sześciu wybranych

do badań wstępnych) o największej odporności na erozję w zastępczej wodzie morskiej (3% roztwór NaCl w wodzie wodociągowej) oraz sprawdzenie, w jakim stopniu grubość powłoki wpływa na jej odporność na działanie erozyjne. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczenie zależności ubytku masy powłoki ochronnej od czasu ekspozycji na stanowisku badawczym i porównanie ich odporności na erozyjne oddziaływanie strumienia zastępczej wody morskiej. Badania przeprowadzono na stanowisku z uderzającym strumieniem cieczy.

W drugim etapie zbadano odporność na erozję kawitacyjną dwóch wytypowanych wcześniej materiałów na stanowisku magnetostrykcyjnym, wyznaczając zależności ubytków mas powłok ochronnych od czasu ekspozycji i porównano je. Określono przy tym wpływ oddziaływania polem ultradźwięków na odporność erozyjno-kawitacyjną badanych materiałów. Ponadto, w badaniach przyczepności powłok do podłoża stalowego, podjęto próbę wyjaśnienia wpływu parametrów chropowatości powierzchni podłoża na przyczepność badanych powłok oraz określenia wpływu pola ultradźwięków w czasie sieciowania powłok na ich adhezję do podłoża.

3.1 *Badane materiały*

Badano odporność na kawitację i przyczepność do podłoża stalowego powłok wykonanych z następujących materiałów:

- farba przeciwkorozyjna olejno – żywiczna do części podwodnej kadłubów okrętowych 13/XX/115,
- Epidian 5 utwardzany trójetylenoczteroaminą (TECZA) w stosunku 10 : 1,
- 1321 CERAMIC S-METAL,
- 1421 CAVIATION RESISTANT,
- 1341 SUPERMETAL GLIDE,
- 212 DiA Hi Coat.

Dla celów porównawczych, na stanowisku magnetostrykcyjnym, zbadano odporność stali 18G2A na erozyjne działanie kawitacji.

3.2 *Urządzenia badawcze*

3.2.1 *Stanowisko z uderzającą strugą*

Erozję kawitacyjną na stanowisku z uderzającą strugą uzyskuje się w wyniku wielokrotnych zderzeń badanego materiału ze strumieniem cieczy. Skutek tych zderzeń, w dużym uproszcze-

niu, zbliżony jest do zjawiska implozji pęcherzyków na powierzchni materiału. Analogia ta dotyczy nie tyle natury samego zjawiska, co skutków jego oddziaływania na materiał.

3.2.2 *Stanowisko magnetostrykcyjne*

Na stanowisku do badań odporności materiałów na erozję kawitacyjną, zjawisko kawitacji (tzw. wibracyjnej) wywoływane jest szybkozmiennymi drganiami wzdłużnymi próbki materiału zanurzonej w cieczy. Pod wpływem drgań na powierzchni próbki, jak również w jej pobliżu, następuje wzrost i implozje pęcherzyków parowo-gazowych, w wyniku których powierzchnia badanego materiału ulega erozji kawitacyjnej.

3.2.3 *Badanie przyczepności powłok.*

Przygotowanie próbek i oprzyrządowanie pomocnicze

Przyczepność powłok do podłoża ze stali badano w próbach odrywania złączy klejowych przeprowadzonych zgodnie z PN-59/C-89301.

Próbki wykonano z normalizowanego pręta o średnicy 28 mm ze stali 18G2A PN-86/H-84018, odpowiadającego prętom do budowy statków ze stali kategorii DH36 wg PN-89/H-93017. Powierzchnie sklejące próbek piaskowano kruszywem o granulacji 2÷3,2, rzucanym na czyszczone powierzchnie z dyszy o średnicy 8 mm, ustawionej prostopadle do czyszczonych powierzchni w odległości 25 cm, w strumieniu powietrza o ciśnieniu 0,6 MPa. Do czyszczenia powierzchni sklejących próbki ustawiono w specjalnym uchwycie o grubości $15^{+0,05}$ mm z pasowanymi otworami o średnicy 16H6, dla zapobieżenia zaokrągłaniu krawędzi powierzchni sklejących przy piaskowaniu.

Oczyszczone powierzchnie przemyto acetonem, a następnie za pomocą przyrządu Surtronic 3+, mierzono na sklejących powierzchniach: średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości R_a [μm], wysokość chropowatości z 10 punktów R_z [μm] i średnie odstępki chropowatości S_m wg PN-87/M-04256/02 i PN-87/M-04256/03. Następnie zestawiono sklejące części próbek w przyrządzie osiującym i mierzono ich łączną wysokość bez skleiny oraz po sklejeniu. W ten sposób w każdej próbce wyznaczono grubość skleiny.

Do sklejania próbek używano przygotowanych zgodnie z zaleceniami producenta dwuskładnikowych kompozycji polimerowych Bel-

zona 1421 i Belzona 1341. Poszczególne serie próbek różniły się czasem utwardzania od 30 do 460 godz. w temperaturze 20°C.

W trzech seriach próbek zagęszczono skleiny działaniem pola ultradźwięków (czas oddziaływania 20 min.) wytwarzanego przez dwie głowice ultradźwiękowe firmy UNIPAN typu 05 LN 25 wzbudzone przez Defektoskop Ultradźwiękowy typ DI-22, przy czym jednorazowo działaniu pola ultradźwięków poddawano jedną partię próbek

W każdej serii badano 8 próbek, a więc mniej niż wymaga PN-58/C-89301 – tzn. 10 próbek, ale za to nie odrzucono próbek o skrajnych wytrzymałościach, których według normy można odrzucić aż trzy.

Osiowość łączonych części próbek uzyskano w specjalnie do tego celu skonstruowanym przez autora oprzyrządowaniu, które jednocześnie zapewniło przygotowanie 16 próbek, regulowany docisk (0,05 MPa), zachowanie równoległości czołowych powierzchni części metalowych próbki podczas klejenia i oddziaływanie polem ultradźwięków w czasie sieciowania polimeru (dodatkowe zmienne w czasie ciśnienie 0,025 MPa).

Próby odrywania złączy klejowych wykonano na maszynie wytrzymałościowej FU-1000, na IV zakresie pracy (0÷10 kN). Do przeprowadzenia próby odrywania wykorzystano przyrząd własnej konstrukcji, w którym przeguby kuliste zapewniały współosiowość względem sił odrywających ustawienie się badanej próbki.

3.3 Metodyka badań

3.3.1 Metodyka badań na stanowisku z uderzającą strugą

W badaniach jako podłoża dla testowanych powłok użyto stali.

Po schropowaceniu i odtłuszczeniu powierzchni podłoża próbek pokryto powłokami ochronnymi. Do ich nakładania użyto pędzli i specjalnych aplikatorów. Polimery nakładano w temperaturze pokojowej 18÷20°C.

Badania erozji kawitacyjnej na stanowisku z uderzającą strugą [11] przeprowadzono w następujących warunkach:

- prędkość obrotowa wirnika z próbkami – 1812 obr/min;
- prędkość liniowa badanej próbki – 48,41 m/s;

- wielkość szczeliny pomiędzy wylotem dyszy doprowadzającej 3% roztwór soli (NaCl) a górną krawędzią badanej próbki – 0,85 mm;
- średnica dysz doprowadzających 3% roztwór soli (NaCl) – 6 mm.

Stanowisko przystosowano do jednoczesnego badania trzech próbek.

Powierzchnia próbek zamocowanych w gniazdach na stanowisku badawczym była usytuowana względem płynu wyphywającego z dysz równolegle.

Próbki były poddawane uderzeniom strumienia cieczy w określonych dla każdego badanego materiału przedziałach czasowych. Po każdej ekspozycji próbki zdejmowano ze stanowiska badawczego, dokładnie czyszczono, suszono i ważono na wadze analitycznej z dokładnością $\pm 0,05$ mg.

Całkowity czas ekspozycji badanych próbek był zróżnicowany i zależał od odporności badanych materiałów.

3.3.2 Metodyka badań na stanowisku magnetostrykcyjnym

Powłoki badane na stanowisku magnetostrykcyjnym położono na podłożu stalowym. Powierzchnie podłoża, przed nałożeniem badanych powłok, przygotowano w sposób analogiczny jak w badaniach przyczepności (rozdz. 3.2.3.).

Wymiary podłoża stalowego próbek z powłokami i próbek stalowych (18G2A) przeznaczonych do badań porównawczych przyjęto opierając się na PN-86/H-04427;

- dokonano pomiarów chropowatości piaskowanych powierzchni próbek przy pomocy przyrządu „Surtronic 3+” (średnie $R_a = 9,98 \mu\text{m}$, $R_z = 49,5 \mu\text{m}$);
- oczyszczono, odtłuszczono podłoża i nałożono powłoki polimerowe f. Belzona zgodnie z zaleceniami producenta;
- wydzieloną partię próbek bezpośrednio po nałożeniu powłoki polimerowej (w trakcie sieciowania) poddano działaniu pola ultradźwięków;
- próbki stalowe, przeznaczone do badań porównawczych, eksponowano na stanowisku magnetostrykcyjnym na przemian z próbkami pokrytymi powłokami w takich samych warunkach;
- usunięcie naddatków powłok polimerowych i zważenie próbek na wadze analitycznej z dokładnością $\pm 0,05$ mg;

- pomiary grubości nałożonych powłok w wyznaczonych punktach przy pomocy przyrządu Minitest 600;
- ekspozycja próbek na stanowisku badawczym w danych przedziałach czasowych i poddawanie powłoki polimerowej działaniu kawitacji w ustalonych warunkach;
- po każdej ekspozycji próbki dokładnie oczyszczono, suszono i ważono.

Stanowisko magnetostrykcyjne przy badaniu odporności na erozję kawitacyjną materiałów pracowało w następujących warunkach:

- częstotliwość - 19050 ± 50 Hz
- podwójna amplituda drgań - $50 \pm 2,5$ μ m
- ciecz robocza - 3% wodny roztwór NaCl
- temperatura cieczy - 20 ± 1 °C
- wysokość słupa cieczy - 115 ± 5 mm
- wymiary próbki - $h = 9,5 \pm 0,05$ mm;
- $\varnothing 14 \pm 0,05$ mm
- głębokość zanurzenia próbki - $4 \div 5$ mm.

4 WYNIKI BADAŃ EROZJI KAWITACYJNEJ NA STANOWISKU Z UDERZAJĄCĄ STRUGĄ

Krzywe ilustrujące wyniki badań przedstawione na rys. 1 i 2 wyznaczono metodą sumy najmniejszych kwadratów odchyłek od średniej.

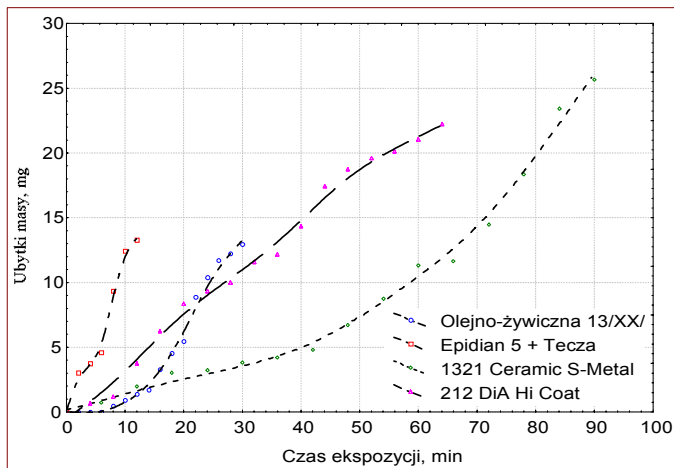
Ocenę odporności powłok na erozję kawitacyjną oparto na porównaniu przebiegów niszczenia próbek danych materiałów (ubytkach masy w funkcji czasu ekspozycji), przy czym w przypadku polimeru Belzona 1421 sprawdzono również jaki wpływ na odporność erozyjną ma grubość powłoki ochronnej.

Największą odporność na erozyjne oddziaływanie strugi zastępczej wody morskiej wykazują: Belzona 1421, Belzona 1341 i Belzona 1321 – z nich do dalszych, bardziej szczegółowych badań użyto dwóch wyrobów f. Belzona: 1421 Cavitation Resistant i 1341 Supermetal Glide.

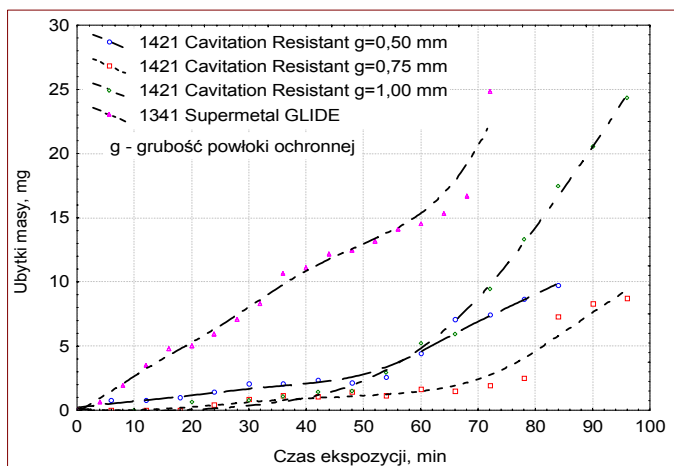
Jednym z kryteriów oceny odporności na erozję jest określenie okresu inicjacji badanych materiałów. Okres inicjacji obejmuje okres inkubacji i czas przynależny do początkowego etapu wzmożonego niszczenia.

Próbie analitycznego wyznaczenia okresów inicjacji dla Belzony 1421 i Belzony 1341 podjęto przy wykorzystaniu modułu estymacji nieliniowej wykorzystując regresję segmentową do

wyznaczenia wstępnych wartości współczynników estymacji liniowej, następnie przy użyciu funkcji własnej zbudowano model regresji liniowej, który linearyzuje przebieg zmian ubytków masy lub szybkości ubytków w funkcji czasu ekspozycji (rys. 3 i 4).



Rys. 1. Ubytki masy powłok ochronnych w funkcji czasu oddziaływania erozyjnego na ich powierzchni uzyskane podczas badań na stanowisku z uderzającą strugą.



Rys. 2. Ubytki masy powłok ochronnych w funkcji czasu oddziaływania erozyjnego na ich powierzchni uzyskane podczas badań na stanowisku z uderzającą strugą.

Przyjęty model regresji ma postać:

$$\Delta m = (b_0 + b_1 \cdot t_{ekspoz.}) \cdot (\Delta m \leq b_p) + (b_4 + b_5 \cdot t_{ekspoz.}) \cdot (\Delta m > b_p)$$

$$\frac{d(\Delta m)}{dt_{ekspoz.}} = (b_0 + b_1 \cdot t_{ekspoz.}) \cdot \left(\frac{d(\Delta m)}{dt_{ekspoz.}} \leq b_p \right) + (b_4 + b_5 \cdot t_{ekspoz.}) \cdot \left(\frac{d(\Delta m)}{dt_{ekspoz.}} > b_p \right) \quad (1)$$

gdzie:

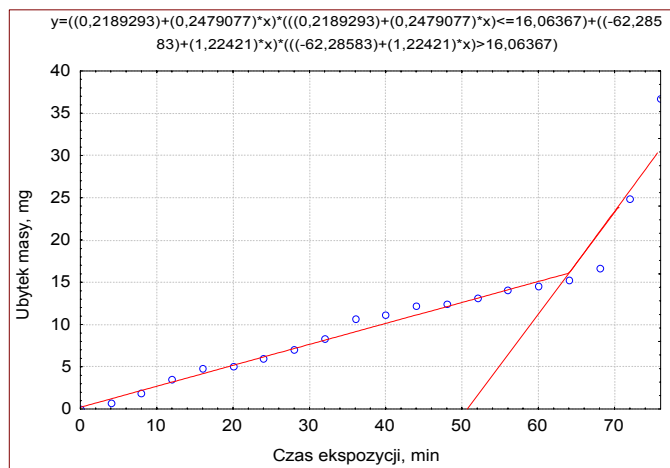
Δm – ubytek masy, mg;

$d(\Delta m)/dt_{ekspoz.}$ – szybkość erozji, mg/min;

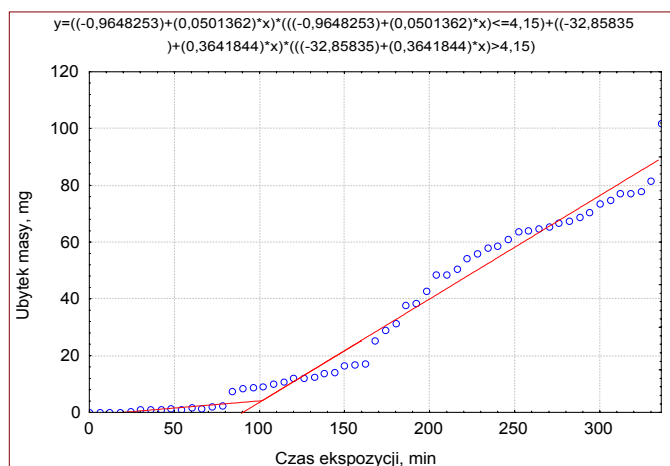
b_0, b_1, b_3, b_4 – współczynniki równań regresji obliczone przy pomocy programu komputerowego *STATISTICA*;

$(\Delta m \leq b_p); (\Delta m > b_p); (d(\Delta m)/dt_{ekspoz.}) \leq b_p; (d(\Delta m)/dt_{ekspoz.}) > b_p$ – wyrażenia określają warunki logiczne, które dają 0 – gdy są fałszywe, a 1 – gdy są prawdziwe;

b_p – punkt przełomu, w którym zmienia się szybkość przyrostu zmiennych zależnych;



Rys. 3. Średni ubytek masy powłoki Belzona 1341 w funkcji czasu ekspozycji linearyzowany przy pomocy modułu estymacji liniowej programu *STATISTICA* z wykorzystaniem funkcji własnej zamieszczonej na rysunku (wsp. korelacji $R = 0,93$, wyjaśniona wariancja – 86,1%).



Rys. 4. Średni ubytek masy powłoki Belzona 1421 w funkcji czasu ekspozycji linearyzowany przy pomocy modułu estymacji liniowej programu *STATISTICA* z wykorzystaniem funkcji własnej zamieszczonej na rysunku (wsp. korelacji $R = 0,99$, wyjaśniona wariancja – 98,6%).

Wyniki obliczeń ubytków masy i prędkości ubytków masy w funkcji czasu ekspozycji w oparciu o zależności (1) dla Belzony 1421 i Belzony 1341 przedstawiono na rys. 3 i 4. Na rysunkach zamieszczono dodatkowo równania prostych regresji z współczynnikami wyznaczonymi na podstawie uzyskanych w trakcie badań wyników pomiarów.

Punkt przecięcia przez przedłużenie linii przyspieszonego zużycia erozyjnego badanych powłok z osią odciętych pozwala określić przybliżony okres inicjacji, co z kolei umożliwia jakościowe porównanie odporności erozyjnej testowanych materiałów. Ponieważ okres inicjacji wg PN-86/H-04426 określa się jako czas obejmujący inkubację i początkowy etap wzmożonego niszczenia, a więc wynika z tego, że szybkość ubytków w rozpatrywanym przedziale czasu powinna być prawie stała.

Przeprowadzone obliczenia statystyczne wykazały, że powłoka z Belzona 1421 miała najdłuższy czas inicjacji erozji (90 min.).

Mniejszą odporność na erozję wykazała powłoka z Belzona 1341, która miała czas inicjacji erozji 50 min.

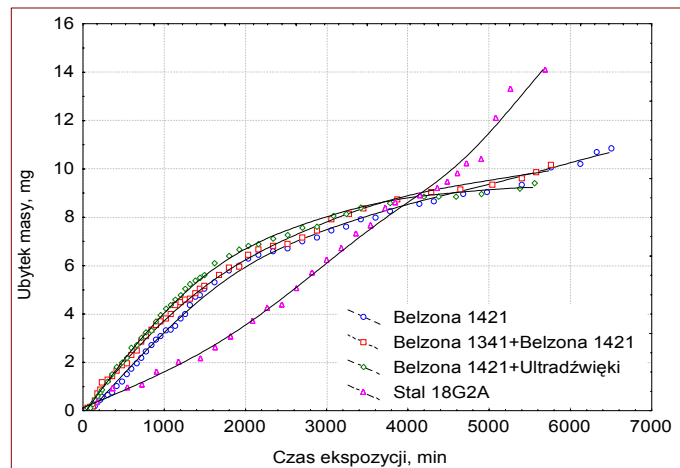
Przy różnych grubościach powłok Belzona 1421 wielkości ubytków mas i szybkości ubytków mas w funkcji czasu ekspozycji różnią się między sobą, co przedstawiono na rys. 2.

5 WYNIKI BADAŃ EROZJI KAWITACYJNEJ NA STANOWISKU MAGNETOSTRYKCYJNYM

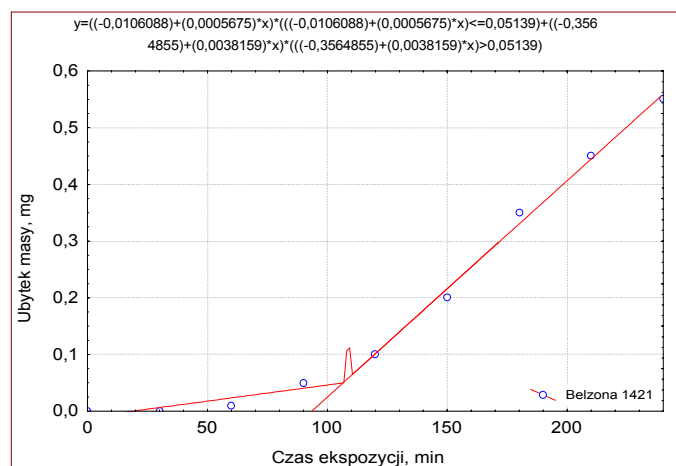
Ocenę odporności powłok na erozję kawitacyjną oparto na porównaniu przebiegów niszczenia próbek danych materiałów (ubytkach masy lub objętości w funkcji czasu ekspozycji), przy czym do badań użyto jednowarstwowej powłoki z polimeru Belzona 1421 i dwuwarstwowej, w której podkład stanowiła Belzona 1341 a warstwę wierzchnią Belzona 1421. Jedną partię próbek poddano działaniu pola ultradźwięków w czasie 20 min. podczas procesu sieciowania polimeru Belzona 1421.

Na rys. 5. przedstawiono przebiegi erozji kawitacyjnej masy powłok polimerowych wykonanych z Belzony 1421 położonych bezpośrednio na podłożu stalowe, na warstwę podkładową Belzony 1341 lub zagęszczonych ultradźwiękami i stali 18B2A.

Do sporządzenia rys. 6÷8 posłużono się tą samą metodą jak w rozdz. 4. Wykorzystując zależność (1) przeprowadzono analizę uzyskanych wyników badań w przedziałach czasu ekspozycji poszczególnych materiałów umożliwiającą wyznaczenie okresów inicjacji.



Rys. 5. Ubytki mas powłok ochronnych i stali 18G2A w funkcji czasu ekspozycji uzyskane na stanowisku do badań erozji kawitacyjnej metodą magnetostrykcyjną.

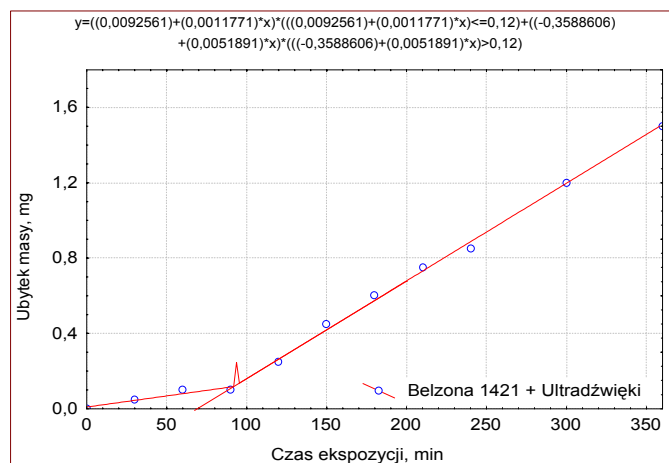


Rys. 6. Średni ubytek masy polimerowej Belzona 1421 w funkcji czasu ekspozycji linearyzowany przy pomocy modułu estymacji liniowej programu STATISTICA z wykorzystaniem funkcji własnej zamieszczonej na rysunku (wsp. korelacji R = 0,998, wyjaśniona wariancja – 99,67%).

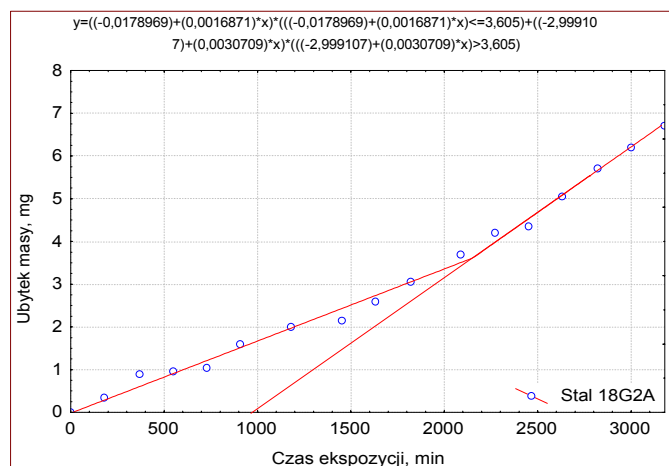
Widoczne na rys. 6. i 7. „piki” w otoczeniu punktu przełomu, są efektem ubocznym zastosowania w zależności (1) wyrażen określających warunki logiczne, ograniczające zakres prostych uśredniających ubytki masy w funkcji czasu ekspozycji i właściwości samego programu, przy pomocy którego wykonywano powyższe rysunki.

Wysokie współczynniki korelacji prostych regresji i procenty wyjaśnionych wariancji

w estymowanych przedziałach pozwalają wnioskować, że analiza statystyczna jest w badanych przedziałach istotna.



Rys. 7. Średni ubytek masy polimerowej Belzona 1421 poddanej oddziaływaniu pola ultradźwięków w funkcji czasu ekspozycji linearyzowany przy pomocy modułu estymacji liniowej programu STATISTICA z wykorzystaniem funkcji własnej zamieszczonej na rysunku (wsp. korelacji R = 0,999, wyjaśniona wariancja – 99,83%).



Rys. 8. Średni ubytek masy stali 18G2A w funkcji czasu ekspozycji linearyzowany przy pomocy modułu estymacji liniowej programu STATISTICA z wykorzystaniem funkcji własnej zamieszczonej na rysunku (wsp. korelacji R = 0,998, wyjaśniona wariancja – 99,51%).

6 BADANIE PRZYCZEPNOŚCI POWŁOK DO PODŁOŻA STALOWEGO

6.1 Opracowanie statystyczne wyników badań przyczepności powłok polimerowych do podłoża stalowego

Do obliczeń statystycznych mających ustalić zależność wytrzymałości na odrywanie sklejin od parametrów chropowatości sklejaných powierzchni

chni, ciśnienia docisku i grubości skleiny wprowadzono dla każdego złącza próbnego sumę ΣR_a lub ΣR_z średnią wartość S_m lub f_k z obu sklejących powierzchni, oraz ciśnienie wynikające z siły docisku łączonych powierzchni p (2). Ponieważ klej wciskany jest we wgłębienie obu łączonych powierzchni i to powinno mieć wpływ na uzyskiwaną wytrzymałość złącza na odrywanie. Analizę statystyczną z uwzględnieniem powyższych parametrów przeprowadzono dla każdych dwóch partii próbek (jednocześnie przygotowywanych), przy czym w trzech przypadkach jedna z nich (osiem sztuk) była poddawana działaniu pola ultradźwięków. Do analizy przyjęto następujące postacie równań regresji:

$$\begin{aligned} R &= a + b \cdot \Sigma R_a + c \cdot S_m + d \cdot p + e \cdot \lg G \quad [MPa] \\ R &= a + b \cdot \Sigma R_z + c \cdot S_m + d \cdot p + e \cdot \lg G \quad [MPa] \\ R &= a + b \cdot \Sigma R_a + c \cdot f_k + d \cdot p + e \cdot \lg G \quad [MPa] \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

- R – wytrzymałość na odrywanie, MPa;
- a, b, c, d, e – współczynniki równań regresji obliczone przy pomocy programu komputerowego *STATISTICA*;
- ΣR_a – suma średnich arytmetycznych odchyleń profilu chropowatości obu sklejących powierzchni, μm ;
- ΣR_z – suma wysokości chropowatości obu sklejących powierzchni, μm ;
- S_m – średni odstęp chropowatości obu sklejących powierzchni, μm ;
- $f_k = \Sigma R_z / S_m$ – średnia arytmetyczna liczba charakterystyczna kapilar na obu sklejących powierzchniach;
- G – grubość skleiny, μm .

W równaniach człony: ΣR_a i ΣR_z – charakteryzują rozwinięcie powierzchni klejonych, S_m i f_k – charakteryzują możliwość zwilżenia powierzchni klejonych, p – zastosowanie ciśnienia zwiększa działającą powierzchnię podłoża przez wciśnięcie polimeru we wgłębienia chropowatości powierzchni klejonej, G – charakteryzuje udział warstwy kohezijnej w skleinie.

Wiadomo, że wobec napięcia powierzchniowego i zamykania powietrza w dnach kapilar polimer nie zwilża całej rzeczywistej powierzchni sklejenia lecz tylko jej część – zwaną powierzchnią działającą. Powierzchnia działająca

przy stałej lepkości polimeru zależy od stosunku wysokości chropowatości do wielkości otwarcia kapilar. Jako wielkość otwarcia kapilar przyjęto w tych badaniach połowę średniego odstępu chropowatości $S_m/2$. Tak więc liczba charakterystyczna kapilar f_k może być miarą możliwości zwilżania kapilar przez ciekły polimer.

Uznano, że można w uproszczeniu przyjąć liniowy przebieg zmian wytrzymałości złączy klejowych na odrywanie ze zmianami R_a , R_z , S_m , f_k , p i $\lg G$ w badanym przedziale zmian ich wartości, jakkolwiek ściśle biorąc, przebieg tych zmian nie jest liniowy.

W tab. 1. przedstawiono przykładowe wyniki analiz wielokrotnej regresji zmiennej zależnej, którą jest wytrzymałość na odrywanie, od zmiennych niezależnych, którymi w rozpatrywanym przypadku były: parametry chropowatości podłoża stalowego, grubość skleiny, ciśnienia docisku statycznego – dla wszystkich próbek i docisku dynamicznego, będącego efektem oddziaływania pola ultradźwięków na wydzielone do tego celu partie próbek.

W tabeli 1., poza równaniami regresji, których współczynniki wyznaczono w oparciu o uzyskane wyniki badań przyczepności i pomiary w trakcie przygotowania złączy, pokazują również, jaki był wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych na wytrzymałość na odrywanie badanych złączy. W części tabel pokazującej statystyki cząstkowe *Beta* są takimi współczynnikami, jakie otrzymano by, gdyby przed wykonaniem obliczeń poddano standaryzacji wszystkie zmienne do wartości średniej równej 0 i odchylenia standardowego równego 1. Wartości bezwzględne tych współczynników pozwalają zatem porównać relatywne wkłady, jakie każda ze zmiennych niezależnych wnosi w predykcję zmiennej zależnej. Korelacje cząstkowe są korelacjami pomiędzy daną zmienną niezależną z uwzględnieniem jej skorelowania ze wszystkimi pozostałymi zmiennymi a zmienną zależną z uwzględnieniem jej skorelowania ze wszystkimi pozostałymi zmiennymi.

Korelacja cząstkowa reprezentuje unikalny wkład danej zmiennej niezależnej do wyjaśnienia zmiennej zależnej. Wartość poziomu – p stanowi malejący wskaźnik wiarygodności rezultatu. Im wyższy poziom – p tym mniej można być pewnym, że relacja obserwowana w próbce jest wiarygodnym wskaźnikiem relacji pomiędzy mierzonymi wielkościami w całej populacji.

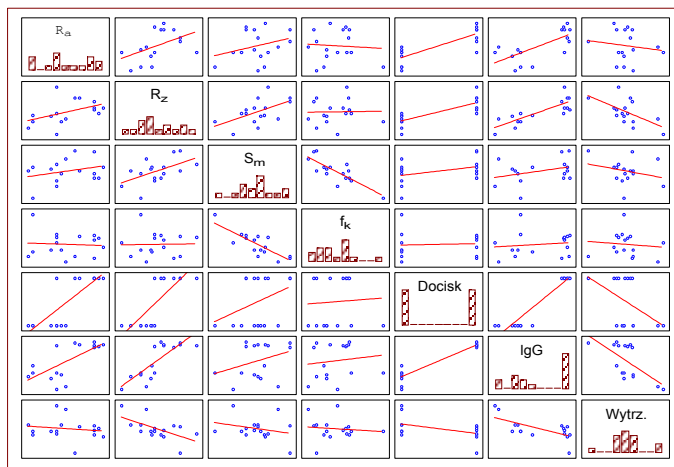
Statystyki sumaryczne przedstawiają parametry, których wartości pozwalają ocenić istotność analizy jako całości.

Tabela 1. Wyniki analizy wielokrotnej regresji wytrzymałości na odrywanie od parametrów chropowatości podłoża, ciśnienia docisku i grubości skleiny.

Lp.	Kompozycja polimerowa; utwardzanie	Równania regresji wytrzymałości złączy klejowych na odrywanie R [MPa]	Statystyki cząstkowe				Statystyki sumaryczne				Ocena regresji
			Parametr równania regresji	BETA	Cząstk. korelacja	Poziom - p	Współcz. korelacji	Błąd std. estymacji	Wartość testu Fishera	Prawd. przyp. wyniku p	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Belzona 1421:456 godz/20°C;	$R=69,78195+0,8374\Sigma R_a-+0,0216S_m+321,6171p-27,6294lgG$	lgG	-2,2053	-0,77199	0,00199	0,8613	1,5752	7,9019	0,00296	istotna
2			p	1,5643	0,5721	0,04105					
3			S_m	-0,1593	-0,2781	0,3575					
4			ΣR_a	0,1660	0,17299	0,57196					
5	Belzona 1421:456 godz/20°C + Ultrażw.	$R=78,4627-0,1394\Sigma R_z-+0,0156S_m+372,6171p-27,7334lgG$	lgG	-2,2136	-0,7691	0,00212	0,8603	1,5805	7,8311	0,003065	istotna
6			p	1,8119	0,7310	0,00453					
7			S_m	-0,1149	-0,1777	0,5613					
8			ΣR_z	-0,1562	-0,1531	0,6176					
9	Belzona 1421:456 godz/20°C + Ultrażw.	$R=63,49994+1,024\Sigma R_a+ +5,3093f_k+305,4658p-27,8573lgG$	lgG	-2,2235	-0,7644	0,00234	0,8549	1,6083	7,4684	0,003676	istotna
10			p	1,4854	0,5491	0,05193					
11			ΣR_a	0,2031	0,2047	0,5023					
12			f_k	0,1075	0,1955	0,5221					

Rys. 9. ilustuje w sposób graficzny wzajemne korelacje parametrów równań regresji zamieszczonych w tab. 1. Przedstawione na wykresach macierzowych korelacje wytrzymałości na odrywanie (Wytr.) z parametrami charakteryzującymi (7 wiersz wykresów macierzowych): stopień rozwinięcia powierzchni (R_a , R_z), możliwość zwilżania powierzchni rzeczywistych (f_k , S_m), ciśnienie docisku (Docisk) oraz grubość skleiny (lgG) – odzwierciedlają ich wpływ na zmienną zależną Wytr. Wpływ ten jest tym większy im większy jest kąt nachylenia poszczególnych prostych regresji do osi odciętych. Jeśli kąt nachylenia prostej regresji rozpatrywanego parametru do osi odciętych jest dodatni, to jego wzrostowi odpowiada przyrost wytrzymałości na odrywanie w rozpatrywanym przedziale; ujemne nachylenie prostej regresji do osi odciętych danego parametru pociąga za sobą spadek wytrzymałości na odrywanie złączy klejowych.

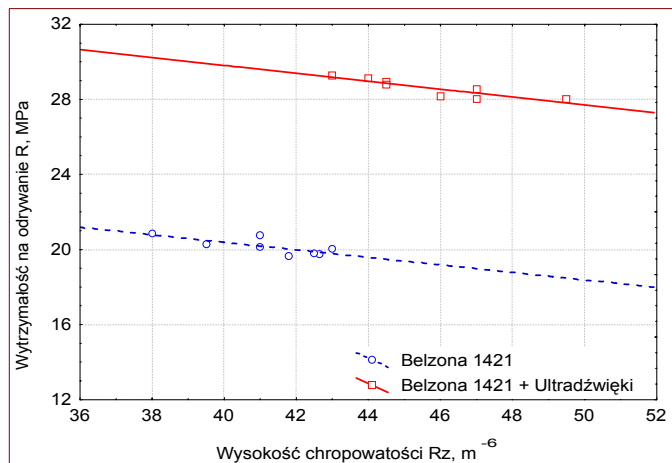
Pozostałe wiersze (tzn. 1÷6) wykresów macierzowych pokazują wzajemne korelacje ww. parametrów równań regresji dla poszczególnych partii próbek, przy czym niektóre wzajemne korelacje nie mają sensu fizycznego i dlatego nie były rozpatrywane (np. korelacja lgG z R_z).



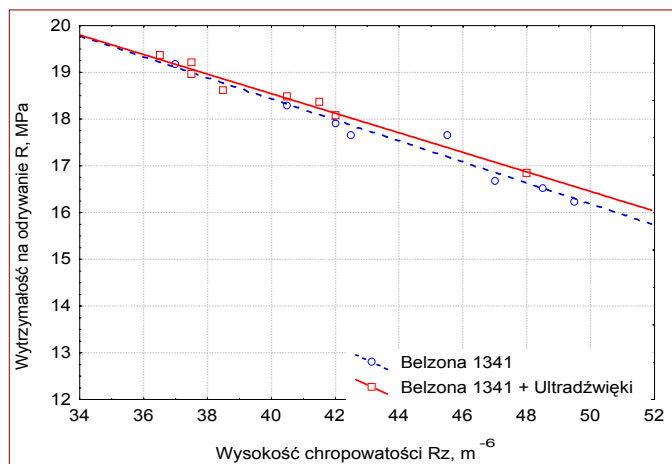
Rys. 9. Korelacje wytrzymałości na odrywanie z parametrami równań regresji dla polimeru Belzona – 1421, grubość powłoki 140 ÷ 520 μm, średni czas utwardzania 456 godz./20°C (tab. 1. wiersz 1 ÷ 3).

Aby określić, jaki jest wpływ oddziaływania pola ultradźwięków na wytrzymałość na odrywanie złączy klejowych porównano wartości średnich grubości sklein dwóch serii badanych próbek, okazało się, że średnie grubości sklein poddanych działaniu pola ultradźwięków

w dwóch przypadkach znacznie różniły się od średnich grubości sklein próbek nie poddawanych działaniu ultradźwięków. Celem zniwelowania tego wpływu wykorzystano równania regresji (tab. 1. wiersze 5÷8, kolumna 3) i podstawiając do nich średnie grubości sklein w poszczególnych partiach próbek sporządzono wykresy ilustrujące wpływ oddziaływania pola ultradźwięków na wytrzymałość na odrywanie klejowych złączy doczołowych w funkcji wysokości chropowatości R_z , rys. 10 i 11.



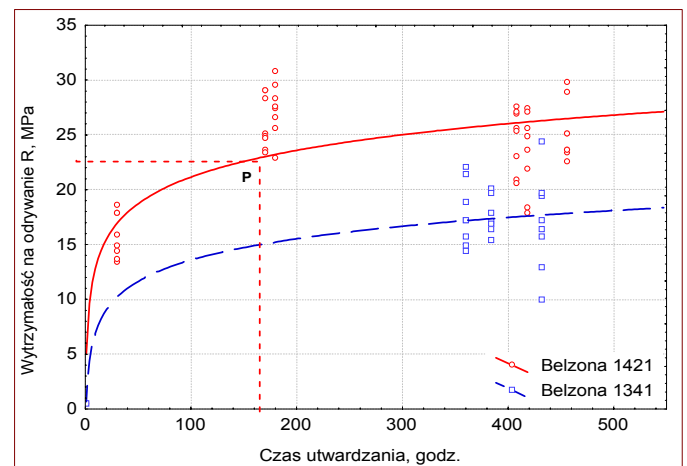
Rys. 10. Wytrzymałość na odrywanie złączy doczołowych klejonych polimerem Belzona 1421 – bez i z działaniem ultradźwięków.(tab. 1; czas utwardzania 456 godz./20°C, grubość skleiny $G = 0,30$ mm).



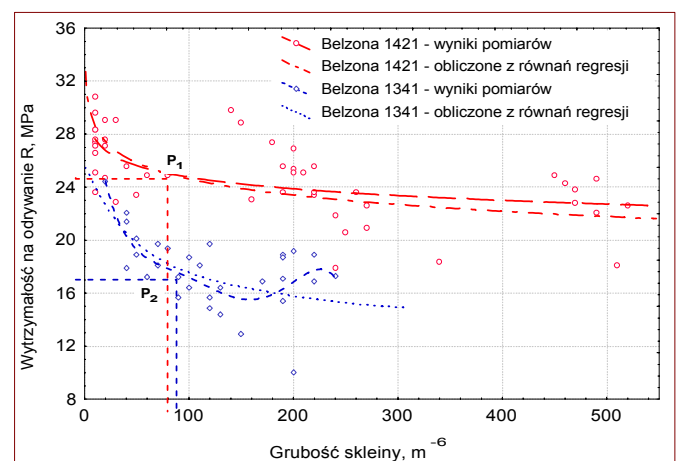
Rys. 11. Wytrzymałość na odrywanie złączy doczołowych klejonych polimerem 1341 Supermetal Glide – bez i z działaniem ultradźwięków.(czas utwardzania 384 godz./20°C, grubość skleiny $G = 0,15$ mm).

Różnice wytrzymałości na odrywanie kompozycji Belzona 1421 i Belzona 1341 są zbliżone z danymi zamieszczonymi w Katalogu Wyrobów f. Belzona.

Dzięki odrywaniu złączy o różnym stopniu utwardzenia sklein, na podstawie uzyskanych wyników badań można się zorientować o przebiegu utwardzania polimerów w złączach, jak to pokazuje rys. 12.



Rys. 12. Zależność wytrzymałości na odrywanie złączy stali 18G2A sklejanym polimerami Belzona 1421 i Belzona 1341 od czasu utwardzania.



Rys. 13. Zależność wytrzymałości na odrywanie złączy stali 18G2A sklejanym kompozycjami polimerowymi Belzona 1341 i Belzona 1421 od grubości skleiny.

Otrzymane wyniki badań dopasowano krzywymi logarytmicznymi.

W celu wyznaczenia czasu utwardzania, po upływie którego wytrzymałość na odrywanie złączy klejowych ulega nieznacznym zmianom wykonano analizę statystyczną. Wykorzystując moduł estymacji nieliniowej, a w nim regresję segmentową programu *STATISTICA*, wyznaczono punkt, w którym badane polimery uzyskują wystarczającą wytrzymałość na odrywanie. Jak widać na rysunku, po wytrzymaniu złączy przez 175 godz. w temperaturze 20°C skleiny z Belzony 1421 i Belzony 1341 można uznać za

wystarczająco utwardzone przy aktywności zastosowanego utwardzacza.

Przyjęty model regresji miał postać:

$$R = (b_0 + b_1 \cdot t_{utw}) \cdot (R \leq b_2) + (b_3 + b_4 \cdot t_{utw}) \cdot (R > b_2) \quad (3)$$

gdzie:

b_0, b_1, b_3, b_4 – współczynniki równań regresji obliczone przy pomocy programu komputerowego *STATISTICA*;

t_{utw} – czas utwardzania polimeru;

$(R \leq b_2); (R > b_2)$ – określają warunki logiczne, które dają: 0 – gdy są fałszywe, 1 – gdy są prawdziwe;

b_2 – punkt przełomu, w którym zmienia się szybkość przyrostu wytrzymałości złączy klejowych na odrywanie R.

Punkty P_1 i P_2 na rys. 13 określają strefę przejściową granicznej warstwy adhezyjnej w warstwy kohezyjne grubości sklejin, wpływających na wytrzymałość na odrywanie doczołowych złączy klejowych.

Wartości punktów P_1 i P_2 wyznaczono przy pomocy modułu estymacji nieliniowej wykorzystując regresję segmentową programu *STATISTICA*.

Model regresji ma postać:

$$\begin{aligned} R &= (b_0 + b_1 \cdot \sum R_a + b_2 \cdot S_m + b_3 \cdot p + b_4 \cdot \lg G) \cdot (R \leq b_5) + \\ &+ (b_6 + b_7 \cdot \sum R_a + b_8 \cdot S_m + b_9 \cdot p + b_{10} \cdot \lg G) \cdot (R > b_5); \\ R &= (b_0 + b_1 \cdot \sum R_z + b_2 \cdot S_m + b_3 \cdot p + b_4 \cdot \lg G) \cdot (R \leq b_5) + \\ &+ (b_6 + b_7 \cdot \sum R_z + b_8 \cdot S_m + b_9 \cdot p + b_{10} \cdot \lg G) \cdot (R > b_5); \\ R &= (b_0 + b_1 \cdot \sum R_a + b_2 \cdot f_k + b_3 \cdot p + b_4 \cdot \lg G) \cdot (R \leq b_5) + \\ &+ (b_6 + b_7 \cdot \sum R_a + b_8 \cdot f_k + b_9 \cdot p + b_{10} \cdot \lg G) \cdot (R > b_5). \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

b_0, \dots, b_4 i b_6, \dots, b_{10} – współczynniki równań regresji obliczone przy pomocy programu komputerowego *STATISTICA*;

b_5 – punkt przełomu, w którym zmienia się szybkość przyrostu wytrzymałości złączy klejowych na odrywanie R;

$(R \leq b_5); (R > b_5)$ – określają warunki logiczne, które dają: 0 – gdy są fałszywe, 1 – gdy są prawdziwe;

R – wytrzymałość na odrywanie, MPa;

$\sum R_a$ – suma średnich arytmetycznych odchyleń profilu chropowatości obu sklejaných powierzchni, μm ;

$\sum R_z$ – suma wysokości chropowatości obu sklejaných powierzchni, μm ;

S_m – średni odstęp chropowatości obu sklejaných powierzchni, μm ;

$f_k = \sum R_z / S_m$ – średnia arytmetyczna liczba charakterystyczna kapilar na obu sklejaných powierzchniach;

G – grubość skleiny, μm .

Wyniki uzyskane przy użyciu każdego równania (4) były bardzo zbliżone zarówno dla polimeru Belzona 1421 jak i Belzona 1341 mimo, że w przypadku tego drugiego polimeru przedział rozpatrywanych grubości sklejin był ponad połowę mniejszy.

7 WNIOSKI

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań i analiz można sformułować następujące wnioski:

- ◆ Parametry chropowatości R_a, R_z, S_m, f_k wyraźnie wpływają na przyczepność powłoki do podłoża ze stali. Zależność tą oddaje zaproponowane równanie regresji wielokrotnej (2).
- ◆ Oddziaływanie ultradźwiękami na kompozycję polimerową w trakcie sieciowania zwiększa przyczepność powłok do podłoża stalowego w granicach 2÷32%, jednak praktycznie nie ma wpływu na ich odporność na erozję kawitacyjną.
- ◆ Pomimo, że kompozycje polimerowe są mniej odporne na erozję kawitacyjną niż stal, to zabezpieczoną powierzchnię chronią w dostatecznie długim okresie potrzebnym do ich zniszczenia, przy czym odporność ta osiąga maksimum przy optymalnej grubości powłoki.

Wyniki badań i analiz wskazują, że zastosowanie badanych kompozycji polimerowych do ochrony lub wypełniania ubytków materiałów spowodowanych erozją kawitacyjną jest w pełni uzasadnione.

Ponieważ oddziaływanie ultradźwiękami na badane kompozycje polimerowe praktycznie nie wpływa na ich odporność na erozję kawitacyjną, a ich przyczepność do podłoża bez oddziaływania ultradźwiękami jest wystarczająco duża – stąd stosowanie ultradźwięków nie jest dostatecznie uzasadnione.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Baker A.A., Jones R.: Bonded repair of aircraft structures. Martinus Nijhoff Publ. Dordrecht – Boston – Lancaster 1988.
- 2) Kestelman V.N., Jevdokimov J.M.: Einige neue Gesichtspunkte zu Adhäsionsbeziehungen. Plaste u. Kautschuk, 1992, Jg. 39, H. 10.
- 3) Kestelman V.N., Marian G.F., Koljaska I.V.: Verwendung eines Ultraschallfelds zur Verbesserung der Haftung von Polymerbeschichtungen bei der Regenerierung von Lagerbohrungen in Gehäuseteilen. Plaste u.Kautschuk, 1990, Jg.37, H.12.
- 4) Kleinert H., Krimmling W.: Das Alterungsverhalten von Metallklebverbindungen in Abhängigkeit von der Oberflächenbehandlung der Fügeiteile. Plaste u. Kautschuk, 1965, Jg. 12. H.8.
- 5) Kotnarowska D.: Wpływ chropowatości powierzchni stalowego podłoża powłoki organicznej na jej odporność na zużycie erozyjne i korozyjne. Przegląd Mechaniczny 1994, nr 13.
- 6) Kotnarowska D.: Ocena szybkości zużywania starzeniowego powłoki epoksydowej na podstawie badań wytrzymałościowych. Polimery 1996, nr 4.
- 7) Kotnarowska D.: Kinetics of wear of epoxide coating modified with glass microspheres and exposed to the impact of alundum particles. Progress in Organic Coatings 31/1997.
- 8) Kotnarowska D.: Influence of ultraviolet radiation and aggressive media on epoxy coating degradation. Progress in Organic Coatings 37/1999.
- 9) Messer Griesheim.: Zusatzwerkstoffe zum Schweißen und Hartlöten. Frankfurt am Main 1978.
- 10) Praca zbiorowa.: Powłoki. Poradnik. WNT. Warszawa 1972.
- 11) Prowans S.: Metaloznawstwo. PWN. Warszawa 1988.

