

# ekomPAS

[www.belse.com.pl](http://www.belse.com.pl)

BELSE Partner BELZONA®

## Szanowni Państwo

Podejmowanie decyzji to ważny proces poszukiwania potwierdzeń na ich racjonalność. Powstaje wówczas pytanie - kto może potwierdzić, że dane rozwiązanie będzie mogło spełnić zakładane oczekiwania? Zarówno w życiu prywatnym, jak i zawodowym uwagę w tym momencie procesu decyzyjnego kierujemy w stronę autorytetów. Jest to potwierdzone w pracach psychologa prof. Cialdiniego, a jego zasada autorytetu jest powszechnie występująca.

Belse od lat współpracuje z ośrodkami naukowymi dla potwierdzenia zastosowań oraz ich skuteczności, które jako źródło wiedzy i doświadczenia stają się autorytetami w procesie podejmowania decyzji. To między innymi Uniwersytet Morski w Gdyni, Politechnika Warszawska, Politechnika Gdańska, Politechnika Wrocławska. Prowadzimy tam zajęcia dydaktyczne, warsztaty, badania laboratoryjne oraz różne projekty. W tym numerze znajdziecie Państwo ciekawą relację z ostatnich warsztatów, jakie miały miejsce w Uniwersytecie Morskim w Gdyni. Potwierdzenia skuteczności technologii Belzona na tak wymagającym rynku, jakim jest rynek morski, pozwala na pełną implementację rozwiązań na inne obszary i gałęzie przemysłu. Z rozwiązań na rynku morskim można skorzystać wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia z erozją kawitacyjną.

W opracowaniu „Metody ochrony powierzchni przed erozją kawitacyjną” prócz omówienia mechanizmu erozji kawitacyjnej, prezentujemy również skuteczne metody ograniczenia jej destrukcyjnych efektów na pracę takich elementów jak **łopatki pompy** czy **łopatki turbiny wodnej**. Skuteczność tych aplikacji potwierdzona jest poprzez okresowe kontrole i obserwacje. To co istotne, w przypadku wyerodowanych elementów rekomendujemy **odbudowę wizerów kompozytem Belzona®1311 oraz zabezpieczenie antykawitacyjne kompozytem Belzona®2141**. Pokazane efekty wprawiają w zachwyt!

W tym numerze zapowiadamy wyjątkowe wydanie specjalne Kompas, będące podsumowaniem ostatnich 30-tu lat aktywności partnerskiej Belse - Belzona na polskim rynku. Najciekawsze aplikacje, wiadomości prosto z Belzony, a także co najcenniejsze, opinie naszych klientów – partnerów i innych, dla których technologie Belzona są takim „Must have”.

Zapraszam do lektury.



Wiesław Kuczek Dyrektor Naczelny BELSE

## W numerze:

# Metody ochrony powierzchni przed erozją kawitacyjną

▶ W maszynach przepływowych można wyodrębnić obszary bądź przestrzenie o wzmożonej intensywności zaburzeń przepływu cieczy, których przyczyną jest napotkanie przepływającego strumienia na przeszkodę taką jak, krawędź natarcia: łopatki pompy, turbiny wodnej, śruby okrętowej itp. Zderzenie strugi z przeszkodą powoduje wyhamowanie strumienia i w konsekwencji obniżenie ciśnienia w tej przestrzeni. Spadek ciśnienia jest na tyle duży, że jest on powodem zapoczątkowania przemiany fazowej tj. powstania zarodków (pęcherzyków) pary wodnej i **jest to początek zjawiska kawitacji**.

Roman Masek  
Dyrektor Techniczny BELSE

# Metody ochrony powierzchni przed erozją kawitacyjną

Z uwagi na metodę generacji, pęcherzyki w procesie kawitacji mogą mieć następujące rodzaje:

- **parowy:** powstający w warunkach występowania ciśnień zbliżonych do wartości ciśnienia nasycenia (parowania) cieczy w danej temperaturze. Pęcherzyk wypełniony jest głównie parami danej cieczy
- **gazowy:** powstający w wyniku dyfuzji gazu z cieczy do wnętrza pęcherzyków kawitacyjnych
- **hydrodynamiczny:** powstający w wyniku spadku ciśnienia statycznego w cieczy poniżej ciśnienia krytycznego. Spadek ten może być wywołany lokalnym wzrostem szybkości strumienia lub poprzez zmianę warunków zewnętrznych
- **wibracyjny:** powstający w wyniku lokalnego spadku ciśnienia pod wpływem fali akustycznej rozchodzącej się w roztworze.

Biorąc pod uwagę powyższe zestawienie rozróżnia się kilka typów kawitacji, ale to co najważniejsze dotyczy dynamiki procesu, a ściślej rzecz biorąc oddziaływania na powierzchnie elementów znajdujących się w środowisku kawitacyjnym. Pęcherz po inicjacji rozrasta się aż do osiągnięcia pewnych krytycznych rozmiarów po czym zaczyna się zapadać a pod koniec zapadania, imploduje. Elementy stałe konstrukcji maszyny przepływowej znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie zjawiska są narażone na efekty (oddziaływanie) mechaniczne implozji. Naprężenia działające na powierzchnię w wyniku implozji mogą sięgać nawet poziomu 103MPa i więcej. Jest to poziom naprężeń przekraczających wartość granicy plastyczności większości metali i stopów konstrukcyjnych i z tego właśnie powodu obserwuje się stopniowe, ale systematyczne odrywanie się cząstek materiału powierzchni. Ten mechanizm nazywamy erozją kawitacyjną co oczywiście w kontekście trwałości powierzchni erodującej, jest procesem z pewnymi wyjątkami-niepożądanym. Skąd tak duża siła zdolna wywołać naprężenia niszczące w powierzchni (warstwie wierzchniej) metali?

Po pierwsze samo oddziaływanie wynikające z natury zjawiska kawitacji czyli cyklicznej sekwencji zdarzeń tj. nukleacji, rozrostu, zapadania i implozji pęcherzyków, wywołuje efekty zmęczenia zużycia, a po drugie - co w istocie jest głównym generatorem siły niszczącej- ciśnienie implozji choć krótkotrwałe, to osiąga ogromne wartości od kilkuset do kilku tysięcy megapaskali! Sama implozja pojedynczego pęcherzyka trwa bardzo krótko bo zaledwie 2-3  $\mu s$  i jest końcową fazą procesu zapadania się pęcherzyka kawitacyjnego. W „puste miejsca” niemal natychmiast napływa ciecz z ogromną prędkością rzędu 100-200 a nawet do 500 m/s. Wcześniej objętość pęcherzyka ( przed jego zapadnięciem) rośnie o kilka rzędów wielkości i wówczas ciśnienie panujące wewnątrz może się zmniejszyć do zakresu próżni wysokiej tj. spadek o sześć rzędów wielkości do poziomu 10-7MPa! Gdy gradient ciśnienia jest już zbyt duży aby utrzymać pęcherz, zaczyna się jego zapadanie. Zasadniczo zjawisko to zachodzi gdy rozrastająca się kawitacja wejdzie w strefę wysokiego ciśnienia



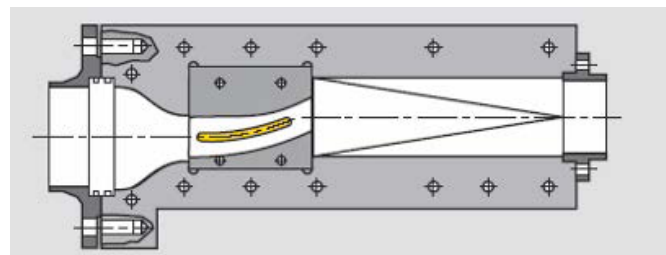
Rys.1. Przebieg zapadania się pęcherzyka z implozją w końcowej fazie procesu.

Reasumując kawitacja jest zjawiskiem wywołanym zmianą ciśnienia w cieczy polegającym na zainicjowaniu, rozroście i zaniku pęcherzyków zawierających parę danej cieczy, rozpuszczone w niej gazy lub mieszaninę wodno-parową. Proces wywołuje erozję kawitacyjną wskutek implozji pęcherzyków w pobliżu lub bezpośrednio na powierzchni materiału erodującego. Skutki erozji kawitacyjnej obserwowano już z końcem XIX w. na turbinach wodnych i śrubach okrętowych, ale wówczas jeszcze zniszczenia kawitacyjne powierzchni interpretowano jako skutki specyficznej korozji.

Oczywiście, że w rzeczywistości zjawiska takie jak korozja, kawitacja występują jednocześnie i nawet wzajemnie mogą się „napędzać”. Kawitacja np. generuje prąd o wartości kilku miliamper którego źródłem może być w szczególności wytworzenie naprężeń mechanicznych w warstwie wierzchniej metalu, który z kolei może być inicjatorem procesów korozyjnych (elektrochemicznych). Z drugiej strony produkty korozji zmieniają strukturę powierzchni oraz jako słabo związane z powierzchnią łatwo przedostają się do cieczy stanowiąc zanieczyszczenie cząstkami stałymi. Nierówności powierzchni oraz zanieczyszczenie cząstkami może być przyczyną nukleacji pęcherzyków kawitacyjnych w przepływie. Mamy zatem do czynienia z strefami w których zniszczenia powierzchni będą wyraźnie powodowane przez kawitację, strefami z dominacją efektów korozyjnych i obszarami zużycia mieszanego. Intensywność i charakter zarodkowania pęcherzy na granicy fazy ciecz/ciało stałe są również zależne od energii swobodnej (lub napięcia powierzchniowego) powierzchni ciała stałego. Powierzchnie gładkie o niskiej energii swobodnej zbliżonej co do wartości energii swobodnej cieczy (dla wody wynosi ona ok. 70 mJ/m<sup>2</sup> w temp. 20°C) czyli powierzchnie hydrofobowe przyczyniają się do zmniejszenia prawdopodobieństwa powstania pęcherzyków kawitacji co w konsekwencji prowadzi do osłabienia intensywności erozji. Gładkość, hydrofobowość oraz podatność na uderzenia hydrodynamiczne fali wywołanej implozją, to cechy powierzchni które mają bezpośredni wpływ na wytrzymałość erozyjną materiałów konstrukcyjnych.



Fot. 1a. Stanowisko testowe do pomiarów czasu zainicjowania erozji kawitacyjnej powierzchni.

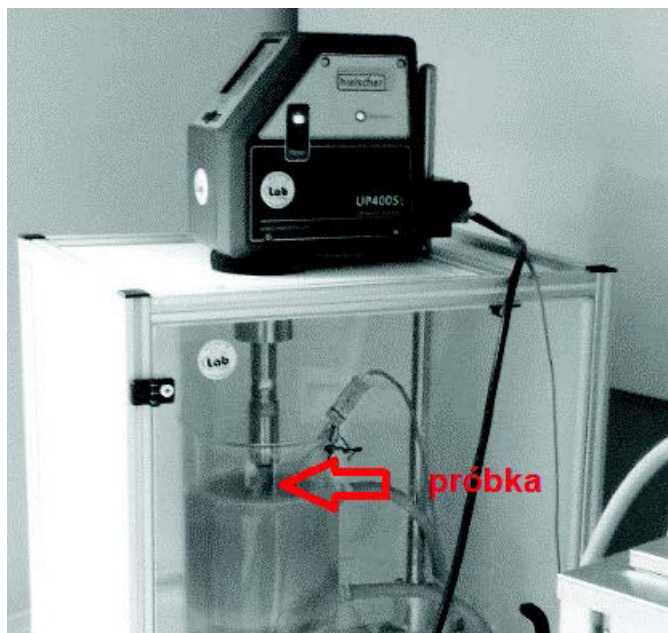


Fot. 1b. Przekrój kanału modułu przepływowego stanowiska testowego z fot. 1a. Próbką poddana działaniu kawitacji zaznaczona kolorem żółtym

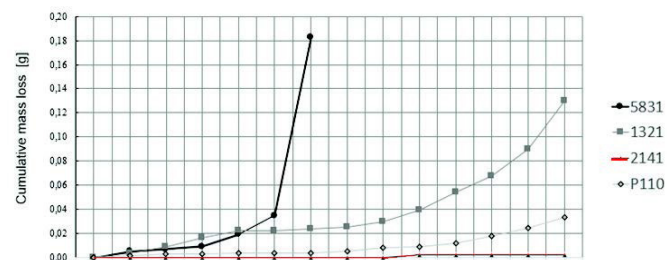
Jedną z metod zwiększenia wytrzymałości erozyjnej powierzchni jest zastosowanie do jej ochrony specjalnych powłok kompozytowych o osnowie polimerowej. Polimery są zbiorami o dużym ciężarze cząsteczkowym (104÷108) i określa się je jako makrocząsteczki w których jednostką podstawową jest mer. Mery są to powtarzające się wielokrotnie grupy tych samych tak samo powiązanych atomów. Co najciekawsze, to długość makrocząsteczki przewyższa wielokrotnie jej średnicę, a to umożliwia dużą swobodę zmian położenia merów w przestrzeni z zachowaniem



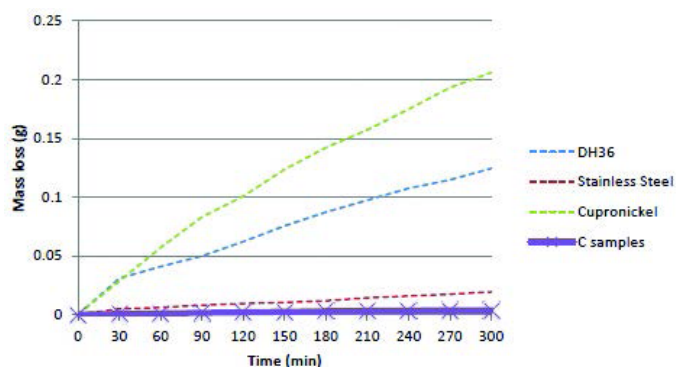
stabilności wiązań. Taka właściwość jest przyczyną giętkości makrocząstek i kompozytów zbudowanych na ich podstawie. Właśnie giętkość (której nie posiadają metale w tym stopy specjalne na kawitację), cecha powłok kompozytowych nadaje powierzchni dużą elastyczność oraz jest główną przyczyną relaksacyjnego mechanizmu odkształceń co w połączeniu z hydrofobowością ma przyczynia się do zwiększenia wytrzymałości erozyjnej w warunkach ekspozycji w środowisku kawitacji.



Fot. 2. Stanowisko do badań materiałów w kawitacji wywołanej ultradźwiękiem



Rys. 3. Krzywe erozyjne wyznaczone po badaniu kawitacyjnym w wodzie destylowanej



Rys. 3. Krzywe erozyjne do stopów metalowych i kompozytu Belzona®2141 po 5 godz. ekspozycji w kawitacji

Zastosowanie materiałów kompozytowych do odbudowy ubytków erozyjnych oraz do wytwarzania powłok ochronnych na podstawie licznych doświadczeń w eksploatacji przyniosło spodziewany efekt wydłużenia trwałości. Potwierdzają to również badania laboratoryjne jak i testy przeprowadzane na specjalnych instalacjach (Fot. 5a i b). Podczas badań w warunkach rozwiniętej kawitacji określano czas po upływie którego pojawiają się uszkodzenia erozyjne na powierzchni próbki badanego materiału. I tak dla stali stopowej z dodatkiem chromu i niklu (CrNi 134 „Turbine Alloy”) pierwsze ubytki erozyjne wystąpiły

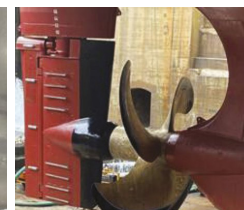
po ok. 470 godzinach testu natomiast nie zaobserwowano żadnych ubytków na próbce z kompozytu Belzona®2141 nawet po 500 godzinach testu w tych samych warunkach. Większą trwałość na zjawisko erozji kawitacyjnej wykazuje zatem kompozyt polimerowy w porównaniu do stali stopowej. Potwierdziły taki efekt również badania przeprowadzone w laboratorium Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Tym razem kawitacja została wywołana ultradźwiękowo w naczyniu bez przepływu cieczy (Fot. 6). Celem badań było sprawdzenie wytrzymałości różnych materiałów na erozję w warunkach kawitacji generowanej w technikach wiertniczych. Porównywano m.in. trwałość stali P110 (zawiera m.in. następujące dodatki stopowe: 0,26% węgla, 0,19% krzemu, 1,37% manganu, 0,148 chromu, 0,028% niklu i inne) oraz kompozytów Belzona®5831, 1321 i Belzona®2141. Wyniki testu zestawiono na wykresie nr.1. Krzywe erozyjne obrazują ubytek masy (w gramach) w funkcji czasu ekspozycji w środowisku kawitacji – im wyższy jest ubytek masy tym niższa jest wytrzymałość erozyjna materiału. Krzywa erozyjna kompozytu Belzona®2141 niemalże zlewa się z osią x na wykresie, co świadczy o bardzo dobrej odporności materiału, lepszej nawet w stosunku do osiągniętych stali P110 na kawitację. Nawet stopy metali bardziej „miękkich” i ciągliwych tzw. hydronali np. Cu-Ni czy Al-Cr wykorzystywanych w okrętownictwie, hydrotechnice właśnie ze względu na dobrą wytrzymałość na kawitację i korozję w badaniach erozyjnych nie osiągnęły poziomu wytrzymałości powłoki kompozytowej Belzona®2141. Krzywe erozyjne wyznaczone na podstawie wyników badań na stanowisku w którym kawitacja wywołana została falą ultradźwiękową o częstotliwości 20kHz. W badaniu testowano oprócz stopu Cu-Ni (na wykresie krzywa cupro-nickel) i Belzona®2141 (na wykresie C-samples) także stal DH36 tzw. stal okrętowa (C-0,18% Si-0,10% Mn-0,90% Cr-0,20% Ni-0,40% Cu-0,35% oraz klasyczną stal stopową (stainless steel na wykresie). Na tym stanowisku badawczym czas ekspozycji próbek w kawitacji wynosił po 5 godzin. Każda z próbek została dokładnie zważona przed i po badaniu a wyniki zestawiono na wykresie nr.2.



Fot. 3a. Próbkę stopu Cu-Ni. Widok po ekspozycji.



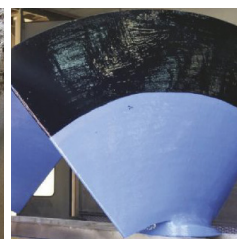
Fot. 3b. Próbkę kompozytu Belzona®2141. Widok po ekspozycji.



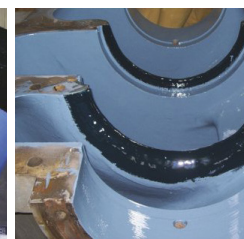
Fot. 4. Próbkę Belzona®2141 zastosowaną do ochrony przed kawitacją steru i śruby okrętowej.



Fot. 5. Wżery kawitacyjne w warstwie wierzchniej korpusu pompy



Fot. 6. Łopata turbiny wodnej z powłoką hydrofobową Belzona®1341 oraz zabezpieczeniem przeciwkawitacyjnym Belzona®2141



Fot. 7. Korpus pompy po odbudowie wżerów kompozytem Belzona®1311, modernizacji powłokowej Belzona®1341 i zabezpieczeniu przeciw kawitacji powłoką Belzona®2141

Kawitacja jako zjawisko związane z lokalnym zaburzeniem pola ciśnienia w cieczy, gdzie w wyniku tej nieciągłości wyzwala się krótkotrwale ogromna energia uderzająca w powierzchnię stałą, to prawdziwa „wodna armata”. Wydaje się na podstawie eksperymentów i zastosowań, że powierzchnia tym bardziej jest odporna na uderzenia „kul wodnych” im więcej jest w stanie pochłonąć energii tego uderzenia bez wyzwolenia niszczących naprężeń w materiale. Taki efekt może nam zapewnić materiał polimerowy w szczególności Belzona®2141, który znakomicie dopełnia wytrzymałość erozyjną oraz korozyjną elementów metalowych takich jak : śruby i stery okrętowe (fot. 6), łopaty i kanały turbin wodnych, wirniki i korpusy pomp wirowych (fot.3) i wiele innych.



## Czy wiecie że...



Belse od wielu lat współpracuje z prestiżowymi uczelniami wyższymi w Polsce, są to m.in. :

**Uniwersytet Morski w Gdyni,  
Politechnika Warszawska,  
Politechnika Gdańska,  
Politechnika Wrocławska.**

► **Technologie Kompozytowe Belzona w Okrętownictwie** to kolejna edycja warsztatów naukowo-technicznych, które odbyły się 1 marca 2022 roku na Uniwersytecie Morskim w Gdyni. Podczas części warsztatowej na Wydziale Mechanicznym UM, Inspektor Nadzoru Belse – **Kamil Ostaszewski** przeprowadził symulację naprawy/usunięcia wycieku na rurociągu. Naprawa została wykonana dwiema metodami: poprzez zatamowanie wycieku za pomocą materiału **Belzona®9611** oraz poprzez naprawę i regenerację uszkodzenia mechanicznego materiałem **Belzona®1111** z zastosowaniem stalowej nakładki. Uczestnicy warsztatów mieli również okazję zobaczyć wykonanie podlewki wibroizolacyjnej materiałem **Belzona®7111** oraz naprawę i regenerację gumowego poszycia łodzi pontonowej (RIB) materiałem **Belzona®2311**.

Dokumentacja filmowa dostępna jest na stronie [www.belse.com.pl](http://www.belse.com.pl)



## W następnym numerze:

► **30 wyjątkowych zastosowań Belzony w ciągu 30 lat współpracy z Belse** – aplikacje z polskich zakładów różnych branż – od napraw awaryjnych po modernizację sprawnościową i wiele innych.

**A także, jak nas widzą Klienci i dlaczego coraz chętniej kupują Belzonę.**



## Zapisz się!

► ...aby otrzymać wydanie specjalne w wersji drukowanej, napisz do nas na [belse@belse.com.pl](mailto:belse@belse.com.pl)

Bądź na bieżąco z nowymi technologiami, dzięki którym podniesiesz efektywność i bezpieczeństwo w zakładzie.

**Dla pierwszych 30 osób, które zgłoszą się do nas, mamy kultowe skarpety z limitowanej edycji.**

