



Korozja kawitacyjna – przyczyny, mechanizm i zapobieganie

Korozja kawitacyjna jest procesem niszczenia powierzchni materiału związanym z powstawaniem i gwałtownym zapadaniem się pęcherzyków pary w przepływającej cieczy. Towarzyszące temu lokalne impulsy ciśnienia i mikrouderzenia mogą stopniowo niszczyć powierzchnię metalu oraz znajdujące się na niej warstwy ochronne. Jeżeli kawitacja występuje jednocześnie w środowisku korozyjnym, mechaniczne niszczenie powierzchni może być dodatkowo wzmacniane przez procesy elektrochemiczne.

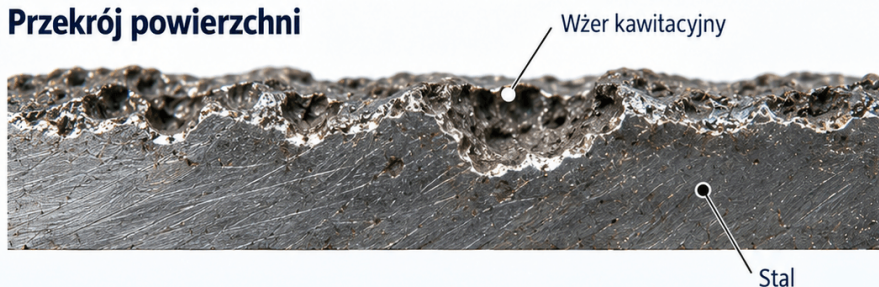


Korozja kawitacyjna

Uszkodzenia powierzchni wywołane zapadaniem się pęcherzyków pary w cieczy, powodującym lokalne mikrouderzenia.



Przekrój powierzchni



Efekt:

Liczne miejscowe ubytki materiału mogą prowadzić do osłabienia elementu i spadku sprawności urządzenia.

Problem występuje

przede wszystkim w **pompach, wirnikach, turbinach wodnych, zaworach, śrubach okrętowych i instalacjach hydraulicznych**, czyli wszędzie tam, gdzie występują duże prędkości przepływu oraz gwałtowne lokalne zmiany ciśnienia.

Co to jest kawitacja?

Kawitacja jest zjawiskiem fizycznym zachodzącym w cieczy, gdy lokalne ciśnienie spada do wartości równej lub niższej od ciśnienia pary cieczy w danej temperaturze. W takich warunkach ciecz zaczyna lokalnie przechodzić w fazę gazową i powstają niewielkie przestrzenie wypełnione parą – **pęcherzyki kawitacyjne**.



Pęcherzyki przemieszczają się wraz z cieczą.

Gdy docierają do obszaru, w którym ciśnienie ponownie wzrasta, para kondensuje, a pęcherzyk gwałtownie się zapada.

To właśnie gwałtowne zapadanie pęcherzyków jest podstawową przyczyną uszkodzeń kawitacyjnych.

Jak powstaje korozja kawitacyjna?

Mechanizm można przedstawić w kilku etapach:

1. w przepływającej cieczy następuje lokalny spadek ciśnienia,
2. ciśnienie osiąga wartość umożliwiającą powstanie pęcherzyków pary,
3. pęcherzyki przemieszczają się wraz z cieczą,
4. trafiają do obszaru o wyższym ciśnieniu,
5. para wewnątrz pęcherzyków gwałtownie kondensuje,
6. pęcherzyki zapadają się,
7. w pobliżu powierzchni powstają lokalne impulsy ciśnienia i mikrostrugi cieczy,
8. powierzchnia materiału jest wielokrotnie obciążana mechanicznie,
9. dochodzi do deformacji, mikropęknięć i stopniowego wykruszania materiału.

Jeżeli materiał pracuje jednocześnie w środowisku korozyjnym, uszkodzona powierzchnia może dodatkowo ulegać przyspieszonej korozji.

Dlaczego zapadanie się pęcherzyków niszczy metal?

Pęcherzyk kawitacyjny nie zawsze zapada się symetrycznie.

Jeżeli znajduje się w pobliżu powierzchni metalu, jego implozja może prowadzić do powstania bardzo szybkiej mikrostrugi cieczy skierowanej w stronę powierzchni.

Powstają również krótkotrwałe impulsy wysokiego ciśnienia.

Pojedyncze zdarzenie zwykle nie powoduje poważnego uszkodzenia.

Problemem są jednak tysiące lub miliony powtarzających się implozji działających na niewielki obszar powierzchni.

Materiał jest poddawany cyklicznym obciążeniom, które mogą prowadzić do:

- lokalnego odkształcenia plastycznego,
- zmęczenia powierzchni,
- powstawania mikropęknięć,



- wykruszania fragmentów materiału,
- powstawania kraterów i wżeropodobnych ubytków.

Ciśnienie pary a powstawanie kawitacji

Kluczowe znaczenie ma **ciśnienie pary cieczy**.

Każda ciecz w określonej temperaturze posiada charakterystyczne ciśnienie pary. Jeżeli lokalne ciśnienie statyczne w instalacji spadnie do tej wartości, mogą zacząć powstawać pęcherzyki pary.

Wzrost temperatury zwiększa ciśnienie pary cieczy.

Dlatego przy wyższej temperaturze kawitacja może pojawić się przy wyższym ciśnieniu bezwzględnym niż w przypadku tej samej cieczy o niższej temperaturze.

Gdzie najczęściej występuje kawitacja?

Kawitacja występuje przede wszystkim w miejscach gwałtownego spadku ciśnienia. Typowe przykłady to:

- pompy odśrodkowe,
- wirniki pomp,
- turbiny wodne,
- śruby okrętowe,
- zawory regulacyjne,
- przepustnice,
- dysze,
- zwężki,
- przewężenia rurociągów,
- instalacje hydrauliczne.

Kawitacja w pompach

Pompy należą do urządzeń szczególnie narażonych na kawitację.

Na stronie ssawnej pompy występuje obniżone ciśnienie.

Jeżeli ciśnienie przy wlocie do wirnika spadnie zbyt mocno, ciecz może zacząć lokalnie parować.

Powstające pęcherzyki przemieszczają się następnie do obszaru o wyższym ciśnieniu, gdzie gwałtownie się zapadają.

Uszkodzenia pojawiają się często na powierzchniach łopatek wirnika.



Objawy kawitacji w pompie

Kawitacja może powodować charakterystyczne objawy eksploatacyjne:

- nietypowy hałas,
- drgania,
- spadek wydajności pompy,
- niestabilną pracę,
- spadek wysokości podnoszenia,
- przyspieszone zużycie wirnika,
- uszkodzenia łożysk i uszczelnień wskutek zwiększonych drgań.

Charakterystyczny hałas silnej kawitacji bywa porównywany do przepływania przez pompę żwiru lub kamyków.

NPSH a kawitacja pompy

Przy projektowaniu instalacji pompowych jednym z podstawowych parametrów związanych z ryzykiem kawitacji jest **NPSH – Net Positive Suction Head**.

Rozróżnia się przede wszystkim:

- **NPSH available – NPSHa** – wartość dostępna w rzeczywistej instalacji,
- **NPSH required – NPSHr** – wartość wymagana przez pompę w określonych warunkach pracy.

Aby ograniczyć ryzyko kawitacji, dostępne NPSH powinno być odpowiednio większe od wartości wymaganej przez pompę, z zachowaniem właściwego marginesu bezpieczeństwa.

Jeżeli ciśnienie na ssaniu jest zbyt niskie, ryzyko kawitacji gwałtownie wzrasta.

Co zwiększa ryzyko kawitacji w pompie?

Do czynników zwiększających ryzyko należą:

- zbyt małe ciśnienie na ssaniu,
- zbyt duża wysokość ssania,
- zbyt mała średnica przewodu ssawnego,
- duże straty ciśnienia w przewodzie,



- zabrudzone filtry,
- częściowo zamknięte zawory,
- zbyt duża prędkość przepływu,
- zbyt wysoka temperatura cieczy,
- nieprawidłowy dobór pompy,
- praca pompy daleko od optymalnego punktu pracy.

Kawitacja w zaworach

Kawitacja może występować również w zaworach regulacyjnych.

Podczas przepływu przez przewężenie prędkość cieczy wzrasta, a ciśnienie statyczne spada.

Jeżeli spadnie poniżej ciśnienia pary, powstają pęcherzyki.

Za przewężeniem ciśnienie może ponownie wzrosnąć, powodując ich gwałtowne zapadanie.

Uszkodzenia mogą wtedy występować na:

- elementach zamykających zaworu,
- gniazdach,
- korpusie zaworu,
- rurociągu bezpośrednio za zaworem.

Kawitacja śrub okrętowych

Kawitacja jest również ważnym problemem w przypadku śrub napędowych statków.

Podczas szybkiego ruchu łopat śruby powstają obszary obniżonego ciśnienia.

Jeżeli ciśnienie lokalnie spadnie poniżej ciśnienia pary wody, pojawiają się pęcherzyki kawitacyjne.

Ich zapadanie może powodować:

- erozję powierzchni łopat,
- hałas,
- drgania,
- spadek sprawności śruby,
- stopniowe niszczenie materiału.



Jak wygląda uszkodzenie kawitacyjne?

Powierzchnia uszkodzona przez kawitację może mieć charakterystyczny wygląd. Początkowo pojawiają się niewielkie lokalne odkształcenia i mikrouszkodzenia. W miarę rozwoju procesu powstają:

- małe kratery,
- nieregularne wgłębienia,
- chropowata powierzchnia,
- obszary przypominające wżery,
- wykruszenia materiału.

Przy zaawansowanym procesie powierzchnia może mieć charakterystyczną gąbczastą lub „wyjedzoną” strukturę.

Korozja kawitacyjna a korozja wżerowa

Uszkodzenia kawitacyjne mogą wizualnie przypominać korozję wżerową, ale mechanizmy ich powstawania są inne.

Cecha	Korozja kawitacyjna	Korozja wżerowa
Główna przyczyna	zapadanie się pęcherzyków pary	lokalne uszkodzenie warstwy pasywnej
Znaczenie przepływu	bardzo duże	nie jest warunkiem koniecznym
Chlorki	nie są konieczne do powstania kawitacji	są jednym z najważniejszych czynników dla stali nierdzewnych
Charakter procesu	silny udział oddziaływania mechanicznego	proces elektrochemiczny



Korozja kawitacyjna a korozja erozyjna

Oba zjawiska są ze sobą związane, ale nie są identyczne.

W korozji erozyjnej głównym czynnikiem mechanicznym jest oddziaływanie przepływającego medium, turbulencji oraz często znajdujących się w nim cząstek stałych.

W kawitacji powierzchnia jest niszczona przede wszystkim przez gwałtowne zapadanie się pęcherzyków pary.

Cecha	Korozja kawitacyjna	Korozja erozyjna
Mechanizm mechaniczny	implozja pęcherzyków	przepływ, turbulencje i uderzenia cząstek
Cząstki stałe	nie są potrzebne	często znacznie zwiększają zużycie
Spadek ciśnienia	kluczowy	nie musi powodować powstawania pary
Typowe urządzenia	pompy, turbiny, zawory, śruby okrętowe	rurociągi, kolana, zawory, pompy

Stale nierdzewne a korozja kawitacyjna

Stale nierdzewne mogą wykazywać dobrą odporność na uszkodzenia kawitacyjne dzięki połączeniu właściwości mechanicznych i odporności korozyjnej.

Warstwa pasywna chroniąca stal nierdzewną jest jednak bardzo cienka.

Intensywna kawitacja może ją wielokrotnie niszczyć.

Po uszkodzeniu warstwa może się odtworzyć, czyli następuje **repasywacja** powierzchni.

Jeżeli jednak częstotliwość i energia oddziaływań kawitacyjnych są bardzo duże, kolejne uszkodzenia mogą następować szybciej niż skuteczna odbudowa powierzchni.



304L i 316L a kawitacja

Stale **1.4307 / 304L** oraz **1.4404 / 316L** mogą być stosowane w wielu instalacjach przepływowych.

316L dzięki obecności molibdenu wykazuje większą odporność na korozję lokalną w wielu środowiskach chlorkowych.

Nie oznacza to jednak automatycznie wysokiej odporności na silną kawitację.

Odporność kawitacyjna zależy również od właściwości mechanicznych materiału, jego mikrostruktury, twardości, zdolności do odkształcenia oraz intensywności samego zjawiska.

Stale duplex a kawitacja

Stale duplex, takie jak **1.4462 / duplex 2205**, łączą wysoką odporność korozyjną z większą wytrzymałością mechaniczną niż typowe stale austenityczne 304L i 316L.

Może to być korzystne w elementach narażonych jednocześnie na:

- agresywne środowisko,
- wysokie prędkości przepływu,
- erozję,
- kawitację.

W bardziej agresywnych środowiskach stosowane mogą być również stale superduplex, takie jak **1.4410 / 2507**.

Sam wybór wyżej stopowego materiału nie powinien jednak zastępować usunięcia przyczyny kawitacji.

Dlaczego twardszy materiał nie zawsze rozwiązuje problem?

Odporność na kawitację nie zależy wyłącznie od twardości.

Znaczenie mają również:

- wytrzymałość zmęczeniowa,
- plastyczność,
- mikrostruktura,
- umocnienie odkształceniowe,



- odporność korozyjna,
- stan powierzchni.

Materiał bardzo twardy, ale kruchy może reagować na powtarzające się uderzenia inaczej niż materiał zdolny do lokalnego odkształcenia i pochłaniania energii. Dlatego odporność kawitacyjna powinna być oceniana jako właściwość całego układu materiał-środowisko, a nie tylko na podstawie jednej wartości twardości.

Wpływ temperatury na kawitację

Temperatura wpływa na ciśnienie pary cieczy.

Wraz ze wzrostem temperatury ciśnienie pary rośnie.

Oznacza to, że w cieplejszej cieczy warunki umożliwiające powstawanie pęcherzyków mogą pojawić się przy wyższym ciśnieniu bezwzględnym.

Temperatura wpływa również na:

- lepkość cieczy,
- właściwości materiału,
- szybkość reakcji korozyjnych,
- zdolność stali nierdzewnej do repasywacji.

Wpływ chropowatości powierzchni

Stan powierzchni może wpływać na inicjację kawitacji oraz późniejsze niszczenie materiału.

Nierówności, uszkodzenia i istniejące kratery mogą tworzyć miejsca sprzyjające dalszej koncentracji oddziaływań.

W miarę postępu uszkodzeń powierzchnia staje się coraz bardziej nieregularna, co może dodatkowo zmieniać lokalne warunki przepływu.

Jak zapobiegać kawitacji?

Najskuteczniejszym sposobem ograniczenia korozji kawitacyjnej jest przede wszystkim **usunięcie lub ograniczenie samej kawitacji**.

Można to osiągnąć przez:

- zapewnienie odpowiedniego ciśnienia na ssaniu pompy,
- zapewnienie właściwego zapasu NPSH,



- zmniejszenie strat ciśnienia w przewodzie ssawnym,
- zwiększenie średnicy przewodu ssawnego,
- ograniczenie zbędnych przewężeń i oporów przepływu,
- utrzymywanie filtrów w czystości,
- prawidłowy dobór pompy,
- pracę urządzenia w odpowiednim zakresie wydajności,
- ograniczenie gwałtownych zmian ciśnienia,
- prawidłowe projektowanie zaworów i przewężeń,
- dobór materiału odpornego na warunki eksploatacji.

Dlaczego sama zmiana materiału może nie wystarczyć?

Zastosowanie materiału bardziej odpornego na kawitację może wydłużyć trwałość urządzenia, ale nie usuwa przyczyny problemu.

Jeżeli pompa pracuje przy niewłaściwym NPSH albo w instalacji występuje bardzo duży lokalny spadek ciśnienia, nawet materiał o wysokiej odporności będzie poddawany ciągłym uderzeniom.

Dlatego w pierwszej kolejności należy przeanalizować **hydraulikę układu**, a dopiero później dobór materiału.

Jak wykryć uszkodzenia kawitacyjne?

Do rozpoznawania problemu wykorzystuje się między innymi:

- oględziny powierzchni,
- kontrolę charakterystycznych kraterów i wykruszeń,
- pomiary grubości materiału,
- monitoring drgań,
- analizę hałasu urządzenia,
- kontrolę parametrów pracy pompy,
- analizę ciśnienia i przepływu.

W przypadku pomp ważną wskazówką może być jednoczesne występowanie uszkodzeń powierzchni wirnika, nietypowego hałasu, drgań oraz pogorszenia parametrów pracy.



Korozja kawitacyjna – najważniejsze wnioski

Korozja kawitacyjna związana jest z **powstawaniem i gwałtownym zapadaniem się pęcherzyków pary w cieczy**.

Pęcherzyki powstają, gdy lokalne ciśnienie spada do poziomu ciśnienia pary cieczy.

Po przejściu do obszaru o wyższym ciśnieniu gwałtownie się zapadają.

Powtarzające się implozje powodują lokalne impulsy ciśnienia, mikrostrugi cieczy, zmęczenie powierzchni oraz stopniowe wykruszanie materiału.

Kawitacja występuje szczególnie często w **pompach, wirnikach, turbinach, zaworach i śrubach okrętowych**.

W przypadku stali nierdzewnych uszkodzenia mechaniczne mogą wielokrotnie niszczyć warstwę pasywną. Jeżeli jednocześnie występuje agresywne środowisko, proces elektrochemiczny może dodatkowo zwiększać szybkość niszczenia.

Podstawowym sposobem ochrony nie jest samo zastosowanie droższego gatunku stali, lecz przede wszystkim **zapewnienie prawidłowych warunków przepływu i ciśnienia oraz wyeliminowanie przyczyny powstawania kawitacji**.

Rodzaje korozji stali i metali

Korozja może przebiegać według różnych mechanizmów zależnych od materiału, środowiska i warunków eksploatacji. Zobacz również pozostałe rodzaje korozji:

[Korozja równomierna stali i metali](#)

[Korozja wżerowa stali nierdzewnych](#)

[Korozja szczelinowa stali nierdzewnych](#)

[Korozja międzykrystaliczna stali nierdzewnej](#)

[Korozja naprężeniowa SCC](#)

[Korozja galwaniczna](#)

[Korozja erozyjna](#)

[Korozja kawitacyjna](#)

[Korozja zmęczeniowa](#)

[Korozja cierna](#)

[Korozja mikrobiologiczna MIC](#)

[Korozja wysokotemperaturowa](#)