

Zastosowanie stali nierdzewnych w energetyce jądrowej



Stale nierdzewne stanowią jeden z najważniejszych materiałów inżynierskich stosowanych w energetyce jądrowej, co wynika z wielu charakterystycznych własności tego materiału – pisze **Zbigniew Brytan**, ekspert Stowarzyszenia Stal Nierdzewna.

Kluczowe cechy stali nierdzewnych to odporność na korozję, ale też promieniowanie oraz wytrzymałość na wysoką temperaturę. Walory te pozwalają utrzymać bezpieczeństwo, efektywność i trwałość instalacji jądrowych.

Pożądane właściwości

Odporność na korozję materiałów stosowanych w energetyce jądrowej jest kluczową własnością, ponieważ eksploatowane konstrukcje są często wystawione na działanie agresywnych substancji, takich jak gorąca woda, para wodna i różne roztwory chemiczne używane w procesach chłodzenia. Stosowanie stali nierdzewnych zmniejsza ryzyko przecieków i awarii, które mogą prowadzić do katastrof ekologicznych i radiacyjnych.

Inną kluczową własnością stali nierdzewnych jest ich zdolność do zachowania integralności strukturalnej i parametrów mechanicznych w wysokich temperaturach. Stale nierdzewne, szczególnie stopy o strukturze austenitycznej, charakteryzują się dobrą wytrzymałością termiczną w szerokim zakresie temperatury i mogą efektywnie pracować w skrajnych warunkach cieplnych, zachowując wła-

szego złomu do produkcji stali, więc materiał staje się droższy i trudniejszy do pozyskania.

Jednym z największych wyzwań w energetyce jądrowej jest zarządzanie i kontrolowanie wpływu promieniowania na materiały konstrukcyjne. Może ono wpływać na strukturę krystaliczną metali, prowadząc do zjawiska zwanego rozpraszaniem promieniowania, które może osłabiać metal przez indukowanie defektów sieciowych oraz zmiany w mikrostrukturze. Stale nierdzewne, szczególnie te z dodatkami niobu i tytanu, wykazują zwiększoną odporność na degradację pod wpływem promieniowania. Takie dodatki pomagają w stabilizacji struktury mikrokryształicznej stali, zmniejszając negatywne skutki promieniowania.

W stalach nierdzewnych przeznaczonych do stosowania w energetyce jądrowej ogranicza się dodatek kobaltu, co wynika szczególnie z możliwości rozpraszania promieniowania. Kobalt-59, będący naturalnym izotopem tego metalu, pod wpływem bombardowania neutronami może przekształcić się w kobalt-60. Izotop ten jest promieniotwórczy i emituje promieniowanie gamma, co ma kluczowe znaczenie dla zastosowań stali w reaktorach jądrowych i wokół nich. W wielu przypadkach będą więc wymagane stale nierdzewne o kontrolowanym udziale kobaltu, który występuje w naturalny sposób w złomie stalowym, służącym do produkcji stali nierdzewnej. Dzięki starannemu doborowi złomu i zastosowaniu wysokiej czystości niklu i innych pierwiastków stopowych producenci stali są w stanie zaoferować gatunki o ograniczonej zawartości kobaltu w odpowiednich klasach bezpieczeństwa 0,2 proc., 0,05 proc. lub nawet niższych.

Konstrukcja reaktorów

Jednym z najważniejszych zastosowań stali nierdzewnych w energetyce jądrowej jest konstrukcja reaktorów. Są one używane do produkcji kluczowych elementów, takich jak obudowy paliwowe, pręty kontrolne oraz komponenty systemów bezpieczeństwa.

Producenci stali opracowali specjalne gatunki do zastosowań nuklearnych, gdzie oprócz ograniczenia udziału kobaltu polepsza się rozdrobnienie ziarna i stabilność struktury austenitycznej przez dodatek azotu, np. gatunek 304NG, który znajduje zastosowanie na rury i blachy w reaktorach typu CANDU [1].

W mechanizmach regulacyjnych prętów paliwowych CRDM (ang. Control Rod Drive Mechanism) stosuje się martenzytyczną stal nierdzewną typu 410. Urządzenia te są

umocowane do górnej części obudowy reaktora i tym samym pracują w ekstremalnie trudnych warunkach, są narażone na promieniowanie, wysoką temperaturę oraz wibracje [2].

Stal ferrytyczna typu 439 (1.4510) znalazła natomiast zastosowanie w systemach obiegu pary, a dokładniej jest stosowana na rury nagrzewnicy separatora wilgoci [2]. Konstrukcje wsporcze rur w nowych wytwornicach pary są obecnie wytwarzane z ferrytycznych stali nierdzewnych z 12-proc. dodatkiem chromu typu 409 (1.4512), 410 (1.4003) lub 405 (1.4724) [3].

Systemy chłodzenia

Stale nierdzewne odgrywają kluczową rolę w konstrukcji systemów chłodzenia w elektrowniach jądrowych (np. rurociągi, wymienniki ciepła). Systemy te muszą efektywnie odprowadzać ciepło generowane w procesie reakcji jądrowych, aby zapobiegać przegrzewaniu się reaktora.

Systemy wody chłodzącej zarówno w obiegu pierwotnym (między zbiornikiem reaktora, wytwornicą pary, pompą wody, stabilizatorem ciśnienia), jak i wtórnym (wytwornica pary, turbina parowa, skraplacz oraz pompa wody zasilającej) są budowane ze stali typu 316/316L [2].

Systemy chłodzenia (obudowy, rury skraplaczy) wykorzystujące jako medium chłodzące wodę morską są budowane z superaustenitycznych stali nierdzewnych typu 1.4547 (254SMO), 1.4529, 1.4565 i 1.4652 (654 SMO).

Betonowe baseny z wodą do przechowywania wypalonego paliwa są w całości wyłożone blachą ze stali nierdzewnej grubości nawet do 10 - 13mm na dnie oraz 4 - 6 mm na ścia-

■ ■ ■
Stale nierdzewne są kluczowym materiałem konstrukcyjnym, który zapewnia bezpieczeństwo, trwałość i niezawodność w skrajnie trudnych warunkach pracy występujących w energetyce jądrowej. Stosowane są m.in. do budowy reaktorów, systemów chłodzenia, ale też obiektów, w których przechowywane są odpady radioaktywne.

nach zbiornika. Wyłożenia ścian wykonuje się najczęściej ze stali typu 304L o niskim udziale kobaltu.

Kontenery na odpady radioaktywne

Stale nierdzewne są używane do produkcji kontenerów na odpady radioaktywne, co jest kluczowe dla bezpiecznego przechowywania i transportu tych materiałów. Kontenery te muszą być niezwykle trwałe i odporne na działanie czynników zewnętrznych, w tym korozji chemicznej i radiacyjnej. W pojemnikach do przechowywania odpadów integralność elementów jest wymagana przez bardzo długi czas, często od 50 do 150 lat, a czasem nawet dłużej. W takim zastosowaniu powszechnie stosuje się gatunki 304L i 316L, a w ostatnich latach widać także rosnące zastosowanie stali duplex typu 2205.

Stale do przechowywania odpadów radioaktywnych mogą zawierać izotop B10 jako część boru zawartego w stali, który zapewnia absorpcję neutronów, a tym samym gwarantuje zwiększoną ochronę przed promieniowaniem. Dostępne są modyfikacje stali 304L z zawartością boru w zakresie od 1 do 2 proc., np. gatunek 304L z dodatkiem boru. Takie stale są stosowane w obszarach, w których zużyte paliwa jądrowe muszą być przechowywane w basenach reaktorów lub poza elektrowniami w tymczasowych miejscach przechowywania. Z takiej stali wykonane są również pojemniki do specjalnych zbiorników transportowych.

Pojemniki do przechowywania zużytego paliwa z reaktorów typu Magnox wytwarza się ze stali nierdzewnej typu duplex gatunków 1.4462 i 1.4410. Wybór stali typu duplex wynika z konieczności spełnienia jednocześnie wysokich wymagań wytrzymałościowych oraz odporności korozyjnej. W tym przypadku kryteria projektowe wymagają odporności na korozję od środka pojemnika - kwas azotowy i produkt korozji paliwa, jeśli paliwo nie jest suche, oraz możliwy atak korozji z zewnątrz, czyli przechowywanie w środowisku morskim przez okres do 150 lat. Dodatkowo pojemnik musi spełniać wysokie własności mechaniczne oraz wymagania normy ciśnieniowej.

Infrastruktura wsparcia i bezpieczeństwa

Stale nierdzewne są również niezbędne w budowie infrastruktury wsparcia w elektrowniach jądrowych, w tym w konstrukcjach nośnych, platformach serwisowych i innych

strukturach pomocniczych. W takich zastosowaniach szczególnie odpowiednie są gatunki austenityczne 304L i 316L, co wynika z ich dobrej odporności korozyjnej na różnorodne media oraz łatwości w przetwarzaniu - formowaniu i spawaniu. Dla elementów nośnych o wyższych wymaganiach wytrzymałościowych preferencyjnie wybiera się stale duplex 1.4462 (2205), a ostatnio także lean duplex, np. 1.4162. W grupie wyrobów dostępne są typowe belki (HEB, IPE, IPN), ceowniki (UPN, UPE, PFC), kątowniki, prostokątne i kwadratowe profile zamknięte (RHS/SHS) do zastosowań konstrukcyjnych spawane laserowo.

Problemy z korozją

Stale nierdzewne, mimo swojej ogólnej odporności na korozję, mogą podlegać różnym formom degradacji w środowiskach reaktorów jądrowych, takich jak korozja naprężeniowa, korozja wodorowa, korozja międzykryształiczna czy lokalna. Promieniowanie neutronów lub naładowanych cząstek powoduje utwardzanie, zmęczenie radiacyjne, kruchość radiacyjną, pęcznienie radiacyjne i skrócenie trwałości pelzania, co skutkuje pogorszeniem właściwości stali. Właściwości mechaniczne stali nierdzewnej mogą ulegać zmianie pod wpływem promieniowania. Głównymi obserwowanymi zjawiskami są pęcznienie i pelzanie wywołane promieniowaniem. Zjawisko pęcznienia zależy od temperatury roboczej i poziomu strumienia neutronów. W przypadku konstrukcji reaktorów występujące warunki są znacznie poniżej warunków, w których pęcznienie staje się znaczące. Podobnie pelzanie wywołane promieniowaniem jest w akceptowalnym zakresie bezpieczeństwa. W trakcie projektowania uwzględnia się te efekty i zapewnia wystarczające marginesy bezpieczeństwa. Różnorodne efekty degradacji wymagają ciągłej uwagi i odpowiednich strategii zarządzania i konserwacji w elektrowniach jądrowych, aby zapewnić długoterminową bezpieczną pracę stosowanych materiałów. W tym kontekście stale nierdzewne zapewniają wysoki stopień bezpieczeństwa w warunkach możliwych zjawisk korozyjnych oraz promieniowania.

Literatura

- [1]. Stainless steel for the nuclear industry, Outokumpu, 1479EN-GB: 1. Lönnberg, Finland. May 2011
- [2]. Pipes and Tubes for Nuclear application, Nippon Steel Corporation 2019
- [3]. IAEA Nuclear Energy Series, Technical Reports Stress Corrosion Cracking in Light Water Reactors: Good Practices and Lessons Learned No. NPT-3.13