

Główne przyczyny uszkodzeń wanien elektrolitycznych stosowanych w hutnictwie miedzi

Dr hab. inż. Jakub Marcinowski, Uniwersytet Zielonogórski

1. Wprowadzenie

Miedź otrzymywana z rud miedziowych w wieloetapowych procesach hutniczych to miedź surowa, zwana czarną lub konwertorową. Zawiera ona około 1–2 % zanieczyszczeń, które należy usunąć w procesie rafinacji elektrolitycznej. Polega ona na uformowaniu

płyt anodowych z miedzi surowej oraz przygotowaniu katod z blach wykonanych z czystej miedzi elektrolitycznej. Zanurzenie elektrod w kwaśnym roztworze siarczanu miedzi, spełniającym rolę elektrolitu oraz podłączenie elektrod do prądu stałego rozpoczyna proces elektrolizy. Atomy czystej miedzi wędrują od anody do katody.

Zanieczyszczenia opadają na dno wanny tworząc szlam. Po 9–15 dniach prąd jest wyłączany, a katody o wadze około 136 kg i zawartości czystej miedzi na poziomie 99,95–99,99% są gotowe do sprzedaży w postaci tzw. miedzi katodowej. Jest to cenny surowiec wykorzystywany np. w elektronice czy produkcji kabli.

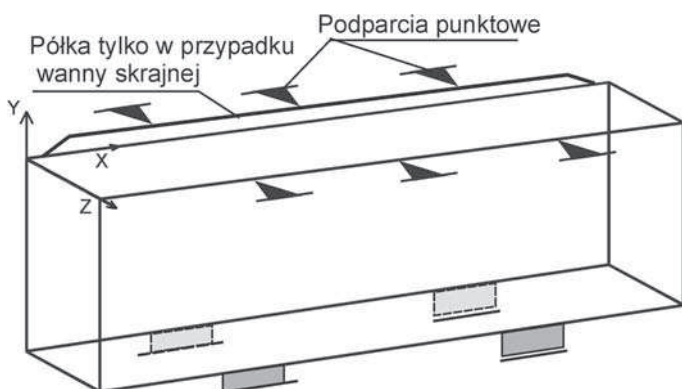
Wanny wykorzystywane w procesie elektrorafinacji miedzi mają kształt skrzyń prostopadłościennych (por. rys. 1) i są wykonywane z polimerobetonu.

W polimerobetonie można wyróżnić trzy grupy składników: kruszywo w postaci mieszaniny naturalnych składników, głównie kwarcowych z mikrowypełniaczami, żywica syntetyczna z utwardzaczem decydującym o czasie wiązania i dojrzewania oraz inne dodatki stanowiące często tajemnicę firmy produkującej wyroby z polimerobetonu [1], [2].

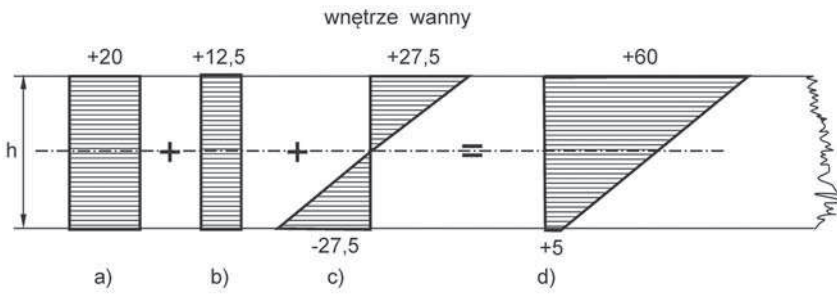
Wykorzystanie żywicy zamiast tradycyjnego spoiwa pozwala uzyskać szereg cennych właściwości, takich jak wysoka odporność chemiczna oraz wysoka wytrzymałość mechaniczna. W betonie zwykłym cechy wytrzymałościowe stwardniałego zaczynu cementowego są co najmniej kilka razy mniejsze od odpowiednich cech skał rodzimych kruszywa, a przyczepność spoiwo-kruszywo jest stosunkowo niewielka i to ona determinuje wytrzymałość betonu. Odmiennie przedstawia się sytuacja w odnie-



Rys. 1. Wanny elektrolityczne z polimerobetonu



Rys. 2.
Wanna elektrolityczna



Rys. 3. Ustalony rozkład temperatury na grubości ścianki wanny

sieniu do betonów żywicznych: wytrzymałość utwardzonego spoiwa żywicznego na rozciąganie jest znacznie większa, a na ścisaniu wręcz zbliżona do wytrzymałości skał, z których pochodzi kruszywo. Szczególnie dobrze widać zalety polimerobetonu w zestawieniu z właściwościami betonu na spoiwie cementowym: wytrzymałość na ściskanie R_c wyższa trzykrotnie, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu R_g wyższa dziesięciokrotnie.

O przydatności polimerobetonu do wykonawstwa wanien elektrolitycznych decydują ponadto następujące właściwości: nieprzepuszczalny dla cieczy, z małą ilością porów, całkowita szczelność, dobra izolacja elektryczna, wysoka odporność na agresywne substancje chemiczne, w tym kwasy i zasady, wysoka odporność na zarysowania, nie łuszczy się, nie odpryskuje.

W artykule zaprezentowano analizy numeryczne, których celem było

zdiagnozowanie przyczyn uszkodzeń polimerobetonowych wanien elektrolitycznych. Uszkodzenia te polegały na początkowych pęknięciach powierzchniowych od strony wewnętrznej wanien. Pęknięcia te pojawiały się głównie w pobliżu naroży. Agresywne oddziaływanie elektrolitu penetrującego w głąb doprowadzało w efekcie do perforacji wanny. Łatwo dostrzegany wyciek zewnętrzny sygnalizował konieczność naprawy lub wręcz wymiany wanny.

W analizach, których wyniki zaprezentowano w artykule, wykorzystano system COSMOS/M bazujący na metodzie elementów skończonych. Uwzględniono parametry materiałowe polimerobetonu wynikające z badań laboratoryjnych próbek wyciętych ze zniszczonych wanien. W obliczeniach uwzględniono wszystkie czynniki wpływające na stan wyężenia wanien.

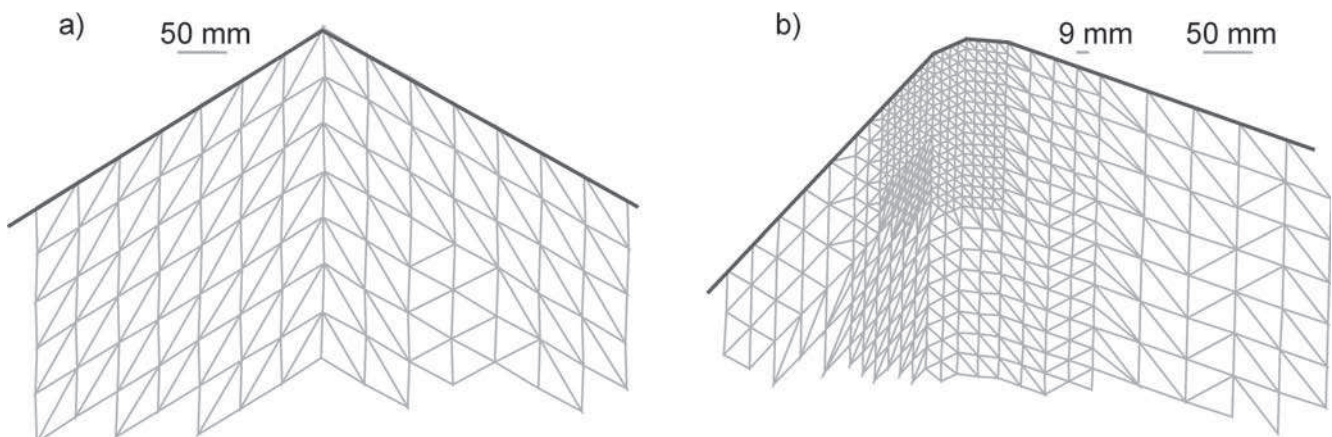
W artykule zamieszczono wnioski płynące z przeprowadzonych analiz.

2. Model numeryczny i obliczenia statyczne

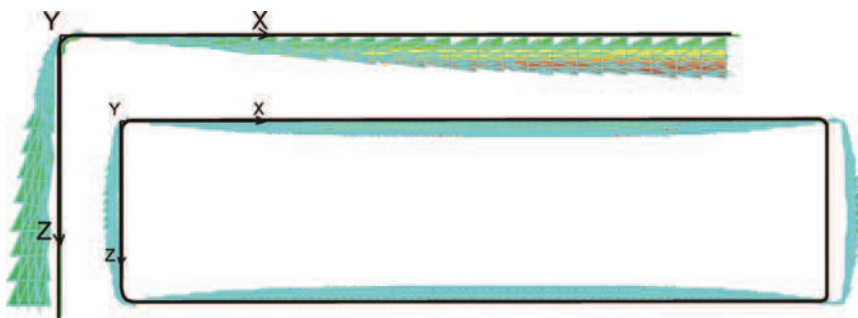
Przedmiotem szczegółowych analiz były wanny-skrzynie o długości około 4,30 m, głębokości zmieniającej się liniowo od 1250 mm do 1300 mm i grubościach ścianek zmieniających się w granicach od 70 mm do 90 mm. Dno wanny było podparte na czterech podporach gwarantujących swobodę deformacji wywołanych zmianami temperatury (rys. 2). Krawędzie ścian wzdłużnych zostały podparte punktowo w sposób wykluczający przemieszczenia poziome prostopadłe do płaszczyzny tych ścian. Dla polimerobetonu przyjęto następujące dane materiałowe wynikające z badań przeprowadzonych na próbkach wyciętych z uszkodzonych wanien: moduł Younga $E=21$ GPa, gęstość materiałowa $\gamma=2400$ kg/m³, współczynnik Poissona $\nu=0,24$, współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej $\alpha_t=2,1 \cdot 10^{-5}$ 1/deg.

Wanny są obciążone ciężarem własnym elektrolitu o ciężarze objętościowym $\gamma_e=12$ kN/m³. Ponadto na krawędziach dłuższych podwieszono są elektrody o ciężarze całkowitym 99,12 kN. W obliczeniach uwzględniono także ciężar własny wanien. Do obliczeń przyjęto ciężar objętościowy polimerobetonu $\gamma=24$ kN/m³.

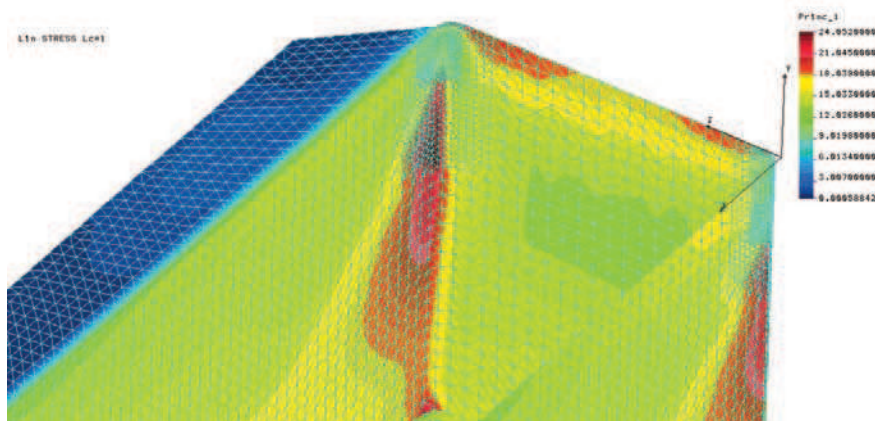
Istotnym czynnikiem wpływającym na stan naprężeń w ściankach



Rys. 4. Siatka elementów skończonych w narożach wanny



Rys. 5. Deformacje ścian pionowych wanny



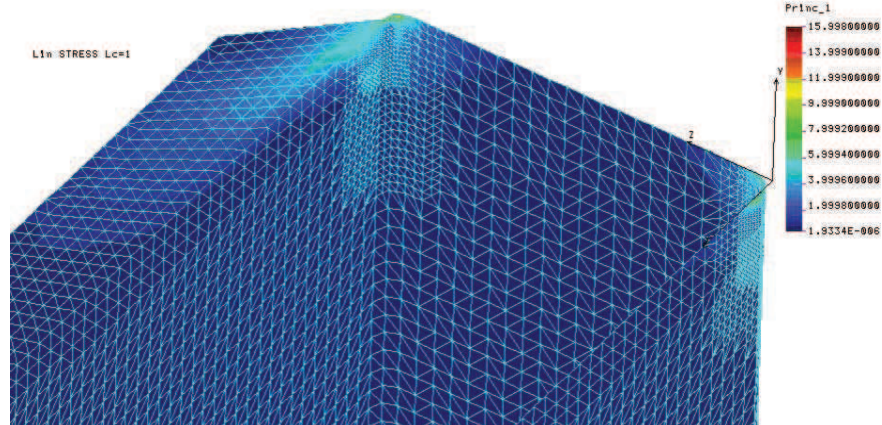
Rys. 6. Rozkład naprężeń głównych w warstwach zewnętrznych wanny σ , [MPa]

wanny jest temperatura. Przyjęto, że elektrolit posiada temperaturę $+60^{\circ}\text{C}$, podczas gdy na powierzchniach zewnętrznych ścianek wanień może wystąpić temperatura $+5,0^{\circ}\text{C}$. Taka sytuacja może się zdarzyć zimą. Jeśli przyjąć, że wanny były wyprodukowane w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ (rozkład jak na rys. 3a), to o stanie naprężenia będzie decydowało równomierne ogrzanie o $+12,5^{\circ}\text{C}$ (rys. 3b) i dodatkowy gradient na grubości ścianek $\Delta T=55^{\circ}\text{C}$ (rys. 3c). Stan pokazany na rysunku 3d jest końcowym rozkładem ustalonym.

Obliczenia wykonano za pomocą systemu COSMOS/M. Wanne skrzynię zamodelowano za pomocą powłokowych elementów skończonych z rodziny SHELL3T [3]. Element ten dobrze oddaje pracę powłok grubych.

Końcowy model dyskretny wanny składał się z 18604 elementów i liczył 56609 stopni swobody. Warunki podparcia odpowiadały sposobowi podparcia pokazane-

mu na rysunku 2. Dodatkowo podparto krawędzie wzdłużne wanny zakładając, że będą one opierały się na krawędziach wzdłużnych wanień sąsiednich za pośrednictwem odpowiednich przekładek. Krawędzie swobodne wanień skrajnych są wzmocnione dodatkową półką, która będzie opierała się punktowo na specjalnie wykonanej konstrukcji wsporczej (rys. 2).



Rys. 7. Rozkład naprężeń głównych w warstwach wewnętrznych wanny σ , [MPa]

Naroża wanień, w których zbiegają się ścianki pionowe, wyokrąglono promieniem 57 mm zgodnie z faktycznym kształtem. W miejscach gdzie wystąpiły koncentracje naprężeń znacznie zagęszczono siatkę elementów skończonych, aby precyzyjnie określić wartości tych koncentracji. Na rysunku 4 pokazano siatkę elementów skończonych w pobliżu naroża wanny. Rysunek 4b ukazuje siatkę po ukształtowaniu wyokrąglenia naroża oraz po lokalnym zagęszczeniu.

Na rysunkach 5–7 zaprezentowano graficznie wyniki obliczeń dla przypadku pełnego obciążenia obciążeniami od elektrolitu, elektrod, ciężaru własnego i od rozkładu temperatury wanny skrajnej. Na rysunku 5 pokazano rozkłady przemieszczeń na konfiguracji odkształconej, którą otrzymano 100 razy przeskalowując przemieszczenia. Maksymalne przemieszczenia występują na środku krawędzi krótszej i wynoszą 2,03 mm w tym miejscu, które zgodnie z warunkami podparcia dna wanny mogło się przemieszczać swobodnie (rys. 2). Ściany długie deformują się w taki sposób, że wybrzuszą się ku wnętrzu wanny, natomiast niepodparte ściany krótkie wyginają się na zewnątrz. Na rysunku 5 pokazano jedynie elementy skończone wyselekcjonowane z górnego fragmentu ścian pionowych nieco poniżej krawędzi górnej wanny.

Na kolejnych rysunkach pokazano rozkłady naprężeń w warstwach zewnętrznych i wewnętrznych ścianek wanny. Naprężenia σ_1 to maksymalne naprężenia główne. To one decydują o ewentualnym zarysowaniu polimerobetonu. Na rysunku 6 pokazano rozkład naprężeń σ_1 na zewnętrznych powierzchniach wanny w pobliżu naroża. Maksymalne wartości tych naprężeń pokazano kolorem czerwonym, a wartość ekstremalna wyniosła 24,05 MPa.

Na rysunku 7 pokazano rozkład naprężeń σ_1 na wewnętrznych powierzchniach wanny w pobliżu naroża. Maksymalna wartość tych naprężeń występuje na samej krawędzi i wynosi 16,0 MPa. To te naprężenia mogą zainicjować pęknięcie powierzchniowe umożliwiające penetrację elektrolitu w głąb ścianek wanny i prowadzące do ich przyspieszonej destrukcji.

Stan przemieszczeń wanny środkowej jest niemal identyczny ze stanem przemieszczenia wanny skrajnej. Naprężenia lokalnie mają jednak jeszcze większe wartości niż to było w przypadku wanny skrajnej i także występują w pobliżu naroży.

4. Wnioski

Stwierdzone w obliczeniach naprężenia rzędu 24 MPa muszą doprowadzić do spękania powierzchniowego materiału, którego wytrzymałość na rozciąganie jest rzędu 20 MPa. Należy zatem rozważyć ewentualność dozbrojenia naroży za pomocą mat z włókien szklanych lub prętów GFRP.

Górną krawędź wanny należy wzmocnić konstrukcyjnie przez zwiększenie grubości na wysokości do około 100 mm. Należy przy tym unikać gwałtownych zmian przekroju, a wszelkim wyokrągleniom należy nadać promień nie mniejszy niż 60 mm.

Ponieważ zdecydowanie głównym czynnikiem wywołującym tak duże wartości naprężeń jest gradient temperatury, należy rozważyć możliwości jego redukcji np. drogą izolacji termicznej ścianek wanny, bądź zapewnienia w pomieszczeniu stałej temperatury rzędu 15–18 °C.

W obliczeniach założono podparcie obu krawędzi podłużnych wanien, należy zatem zagwarantować, aby w trakcie eksploatacji warunek ten był bezwzględnie spełniony. Brak takiego podparcia skutkować może nawet trzykrotnym wzrostem naprężeń w pobliżu naroży, co musiałoby doprowadzić do powstania pęknięć.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hop T., *Betony polimerowe*, Wydawn. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1992
- [2] Czarnecki L., *Betony żywiczne*, Arkady, Warszawa, 1982
- [3] COSMOS/M, *Finite Element Analysis System, Version 2.9*, Structural Research and Analysis Corporation, Electronic Manual, Los Angeles, California, 2002

**Przedsiębiorstwo „PREBEX”
Spółka z o.o. we Wrocławiu**
50-073 Wrocław
ul. św. Antoniego 21
tel. 71 787-50-50, fax 71 343-00-32
e-mail: poczta@prebex.com.pl
www.prebex.com.pl



PREBEX

Rok założenia 1988



Projektujemy i kompleksowo realizujemy obiekty o konstrukcji stalowej, żelbetowej i tradycyjnej, a także wykonujemy remonty kapitalne budynków przemysłowych i budownictwa ogólnego.

