



SZCZEPAN LUTOMIRSKI, *s.lutomirski@il.pw.edu.pl*

MARTA LUTOMIRSKA, *m.lutomirska@il.pw.edu.pl*

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

ANALIZA PRZYCZYŃ AWARII POKRYW OSADNIKÓW WSTĘPNYCH

THE ANALYSIS OF THE ORIGINS OF FAILURE OF THE COVERS FOR SEWAGE TANKS

Streszczenie Przedmiotem referatu jest analiza przyczyn awarii pokryw w modernizowanej oczyszczalni ścieków w Warszawie. Pokrywy były wykonane z kompozytu GRP jako obrotowe samonośne konstrukcje o skomplikowanej geometrii przestrzennej. Kontrolne obliczenia statyczne wykonano przy użyciu programu Abaqus zakładając model materiału izotropowego, liniowo-sprężysto-plastycznego. Stwierdzono, że nawet dla najkorzystniejszych warunków pracy pokryw ich stan graniczny nośności i stan graniczny użytkowalności są lokalnie przekroczone. Zatem pokrywy zostały zaprojektowane niepoprawnie.

Abstract In this paper the origins of the failure of the covers over sewage tanks in Warsaw is analyzed. The covers were made of GRP (Glass Reinforced Polyester) as self-supporting structures with a complex spherical geometry. The analysis was performed using Abaqus software. It was assumed that the material is isotropic and elasto plastic. It was found that even for the most favorable work conditions the ultimate and serviceability limit states were locally exceeded. The conclusion is that the covers were designed incorrectly.

1. Opis konstrukcji pokrywy osadnika

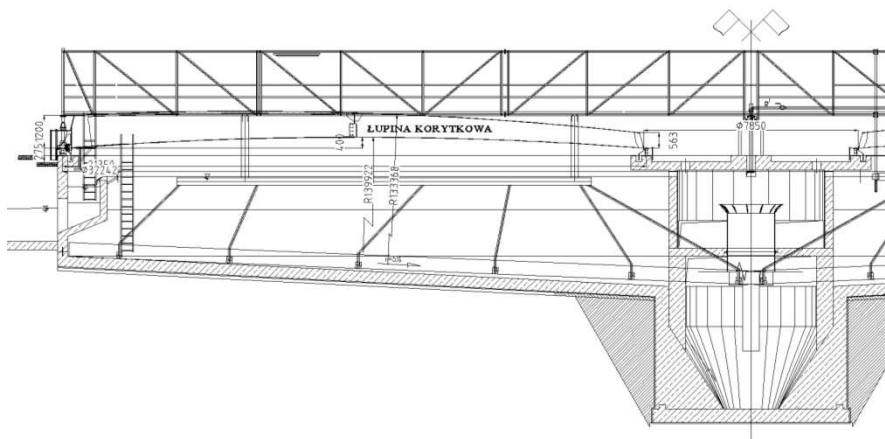
Osadniki wstępne wybudowane zostały w ramach modernizacji Oczyszczalni Ścieków w Warszawie (rys. 1). Są to zbiorniki, częściowo zagłębione w gruncie. W procesie sedymentacji następuje w nich usunięcie zawieszin łatwo opadających, jak również zawieszin lżejszych od wody – tłuszczu i części pływających, które nie zostały oddzielone w poprzedzających urządzeniach oczyszczalni. Wstępnie oczyszczone ścieki odprowadzane są na kolejne etapy technologiczne oczyszczania. Natomiast osady powstałe w wyniku sedymentacji w osadniku wstępnym są zgarniane przy pomocy zgarniacza do komory osadowej (leja), skąd są odprowadzane do dalszego oczyszczania.

Ściany boczne osadników wstępnych są powłokami cylindrycznymi o średnicy wewnętrznej 50,0 m i grubości 350 mm (rys. 2). Pojemność osadnika wstępnego wynosi ok. 5700 m³. Wysokość napełnienia ściekami przy ścianie bocznej wynosi 2,89 m, zaś spadek dna jest 5%. W środku osadnika znajduje się cylindryczna kolumna centralna, w której zlokalizowano system kanałów przelewowych i lej osadowy. Średnica leja osadowego wynosi ok. 5,0 m, a jego głębokość ok. 9,50 m. Na koronie kolumny centralnej znajduje się bieżnia dla systemu obrotowego zgarniacza i pokrywy osadnika.

Osadniki wstępne przykryto obrotowymi samonośnymi pokrywami wykonanymi z laminatu poliestrowo – szklanego GRP.



Rys. 1. Widok osadnika wstępnego ze zgarniaczem, kolumną centralną i pomostem



Rys. 2. Przekrój pionowy typowego osadnika wstępnego

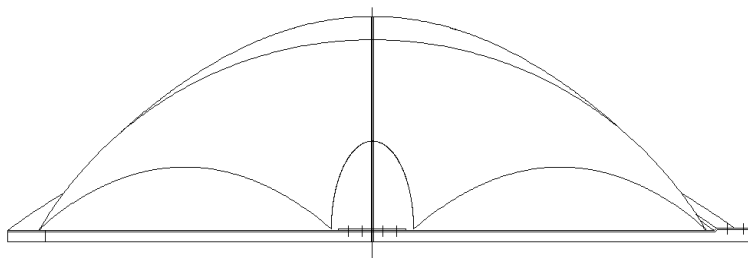
Przekrycie zbiorników ma na celu ograniczenie rozprzestrzeniania się odorów i aerozoli bakteryjnych emitowanych z osadnika. Składa się ono z 36 powtarzalnych łupin usytuowanych promieniście nad osadnikiem.

Łupiny korytkowe wykonano metodą kontaktową, podobną do metody „chałupniczej”, układając na formie kolejne warstwy maty i tkaniny nasączone żywicą poliestrową. Do laminowania zastosowano żywicę izoftalową ze specjalnymi dodatkami. Dla ochrony przed warunkami atmosferycznymi i przed korozją zastosowano odpowiednie preparaty ochronne. Grubości kompozytu w łupinie są następujące: pokrywa 4,5 mm, części skrajne kołnierzy bocznych 7 mm, środkowa ich część 7,99 mm. Każda łupina usztywniona jest na końcach przeponą (deklem). Na kolumnie centralnej łupiny połączone są za pomocą pier-

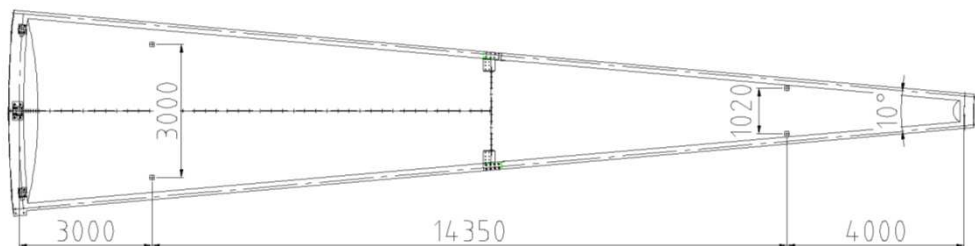
ścienia wewnętrznego wykonanego ze stali szlachetnej poruszającego się na stałych krążkach. Wzdłuż promieni przekrycia połączenia łupin zrealizowane są za pomocą kołnierzy promieniowych. Na zewnątrz zaś łupiny połączone są kołnierzami zewnętrznymi. Pod kołnierzem zewnętrznym każdej łupiny zamocowane są trzy koła o nośności 14 kN, które poruszają się po bieżni na koronie ściany zewnętrznej. Przekrycie obraca się wraz ze zgarniaczem i pomostem.

Łupiny mają zmienną wysokość od 1200 mm nad podporą zewnętrzną do 563 mm nad podporą wewnętrzną (rys. 3 i 4). W rzucie poziomym łupiny mają kształt trapezu o wymiarach podstaw 4388 i 667 mm i wysokości trapezu 21350 mm. Szerokość kołnierzy promieniowych łupin wynosi 160 mm. Ślad powierzchni środkowej łupiny w przekroju pionowym poprowadzonym przez najwyższą tworzącą opisuje promień $R_g = 133368$ mm a w przekroju poprowadzonym przez kołnierz boczny łupiny promień $R_b = 139922$ mm. Ukształtowanie na łuku powierzchni kołnierzy bocznych łupin powoduje, że w środku rozpiętości kołnierza bocznego występuje podniesienie wykonawcze ok. 407 mm. Każda łupina składa się z trzech części scalanych na budowie. Scalanie części łupin wykonane jest przy pomocy śrub M12 o rozstawie 250 mm łączących wewnętrzne kołnierze podłużne i poprzeczne. Połączenia kołnierzy są uszczelnione masą poliuretanową Sikaflex 221.

Przekrycie podzielone jest na sześć segmentów. Segmenty połączone są ze sobą śrubami usytuowanymi w owalnych otworach wykonanych w kołnierzach łączących łupiny (rys. 5). Otwory owalne segmentów jak również większe niż łączące trzpienie otwory w łupinach mają zapewnić możliwość przemieszczeń termicznych łupin w kierunku promieniowym i kierunku obwodowym. W każdym segmencie jest sześć łupin. Połączenia ich są typu zakładkowego zwykłego. Łupiny w segmentach połączone są ze sobą promieniowo kołnierzami zewnętrznymi za pomocą śrub M12 w otworach o średnicy 20 mm (rys. 6).



Rys. 3. Widok czołowy łupiny korytkowej zbieżnej



Rys. 4. Widok z góry łupiny korytkowej zbieżnej. Na rysunku podano umiejscowienie uchwytów do podnoszenia łupiny w czasie montażu



Rys. 5. Widok kołnierza połączeniowego końcowej łupiny w segmencie



Rys. 6. Kołnierze połączeniowe lewy i prawy wewnętrznej łupiny w segmencie

2. Uszkodzenia pokryw

W czasie wizji lokalnej stwierdzono, że ok. 75% pokrywy nad osadnikiem, dla którego wzmocnienia wykonywano w wytwórni jest całkowicie uszkodzona (rys. 7). Uszkodzenie przekrycia polegało głównie na zapadnięciu się zbieżnych korytek. Większość załamań powstała w połowie odległości pomiędzy ścianą zewnętrzną zbiornika i kolumną wewnętrzną. Zaobserwowano również uszkodzenia pokryw w pobliżu ściany zewnętrznej osadnika oraz uszkodzenia w niewielkiej odległości od kolumny centralnej tj. 2,5÷3,5 m. Natomiast na drugim osadnikiem, dla którego wzmocnienia wykonywano na budowie tylko kilka pokryw uległo uszkodzeniu.

W czasie wizji lokalnej dokonano pomiaru grubości pokrywy śniegu w kilku miejscach na pokrywie i w kilku miejscach na gruncie. Na żelbetowej kolumnie centralnej zbiornika (rys. 2) grubość warstwy zalegającego śniegu wynosiła od 30 do 50 cm. Na górnej powierzchni łupiny przy dekle zewnętrznym grubość warstwy śniegu wynosiła 13÷14 cm, zaś na kołnierzu promieniowym przekrycia łupiny grubość śniegu wynosiła 47 cm. Na gruncie w terenie otwartym grubość warstwy śniegu nie przekraczała 33 cm. Na podstawie równoważnika wodnego śniegu zmierzonego na stacji Warszawa – Okęcie (lotnisko) ustalono, że obciążenie śniegiem łupin w dniu awarii wynosiło ok. $0,7 \text{ kN/m}^2$ tj. 80% wartości charakterystycznej i 50% wartości obliczeniowej obciążenia śniegiem.



Rys. 7. Widok przekrycia łupinowego osadnika wstępnego po awarii

3. Faza projektowania i wykonywania przekrycia

Projekt przekrycia [1] został opracowany przez austriackie biuro projektowe. Na podstawie dostępnej dokumentacji można przypuszczać, że przyjęto mocno uproszczony model obliczeniowy łupiny w postaci pręta o zmiennym przekroju poprzecznym. Dane materiałowe do projektu przyjęto na podstawie testów nośności laminatu wykonanych przez Austriacki Instytut Tworzyw Sztucznych. W projekcie stwierdzono, że testy „pozwalają wnioskować, że parametry materiałowe leżące u podstaw tych obliczeń zostały rzeczywiście osiągnięte”. Autor projektu podaje, że „najczęstszym istotnym kryterium zawodności jest wyoboczenie skorupy w obszarze nacisku (u góry)” i stwierdza, że stateczność łupiny sprawdził zgodnie z książką teorią podaną w książce Wiedemanna [2].

Projekt pokryw został zweryfikowany w Polsce [1] przez osoby o odpowiednich kwalifikacjach i doświadczeniu. Nowe obliczenia do projektu przekrycia wykonano programem Autodesk Robot Structural Analysis, część obliczeń sprawdzających wykonano programem Abaqus. Przy weryfikacji uwzględniono niekorzystne wpływy pogody, temperatury, starzenia się, pełzania oraz niedokładności produkcyjne, modyfikując parametry materiałowe. Wprowadzono zastępczy moduł sprężystości ($E = 8450$ MPa) i zastępcze grubości elementów. Dla przyjętego, współczynnika materiałowego 1,35 oraz współczynnika redukcji naprężeń granicznych 1,55 przyjęto łączny współczynnik bezpieczeństwa $1,35 \times 1,55 = 2,09$ i oszacowano średnią wytrzymałość obliczeniową na rozciąganie i ściskanie dla materiału łupiny kulebkowej:

- dla materiału rozciąganego łupiny $f_{td} = 102,7$ MPa,
- dla materiału ściskanego łupiny $f_{cd} = 77,9$ MPa.

W projekcie weryfikacyjnym obliczono również obciążenie krytyczne łupiny GRP. Stwierdzono, że niebezpieczeństwo wyoboczenia łupiny może wystąpić przy obciążeniu siłą skupioną 3,8 kN lub przy obciążeniu równomiernym 0,55 kN/m². Obliczone wartości obciążeń krytycznych są mniejsze niż obciążenia jakie mogą wystąpić (np. obciążenie śniegiem $0,9 \times 1,5 = 1,35$ kN/m²). Obliczone maksymalne przemieszczenia pionowe łupiny

wynoszą ok. 54,5 cm dla przyjętego zastępczego materiału łupiny i ok. 63 cm dla warstwowego materiału łupiny. Są to bardzo duże ugięcia rzędu około 1/35 rozpiętości, jakich nie dopuszcza się w konstrukcjach. Autorzy opracowania od otrzymanego ugięcia błędnie odejmują wstępną strzałkę ugięcia (40 cm) oraz stwierdzają, że ugięcia są mniejsze niż dopuszczalne. Zauważają oni również, iż łupina nie może pracować jako samodzielny element nośny, ponieważ nie zachowuje geometrycznej niezmienności w kierunku poprzecznym. Pomimo niespełnienia tych dwóch podstawowych warunków nośności i użyteczności, projekt został zatwierdzony jako pozytywny.

W trakcie montażu łupin wystąpiły bardzo duże ugięcia i pojawiły się problemy z ich połączeniem. Zlecono więc firmie w Austrii wykonanie dwóch opracowań dotyczących „odkształcenia i stabilności” przekrycia łupinowego [3]. W tych opracowaniach analizowano model przekrycia kolebkowego składający się z trzech połączonych łupin i dołączonych do nich dwóch łupin połówkowych. Dla zapewnienia osiowej symetrii zablokowano przemieszczenia w kierunku obwodowym oraz moment w kierunku promieniowym w najwyższych punktach dwóch zewnętrznych łupin połówkowych. Ponadto przyjęto, że łupiny po stronie wewnętrznej są podparte we wszystkich kierunkach translatorycznych zaś po stronie zewnętrznej przemieszczenia pionowe w trzech punktach (odpowiada to położeniom kół jezdnych) są równe zero. Przyjęto zatem, wyidealizowany schemat konstrukcji, który tylko w bardzo szczególnych warunkach może wystąpić. Dla wyidealizowanych warunków brzegowych połączonych łupin wykonano obliczenia metodą elementów skończonych, programem Abaqus. Na podstawie nieliniowej analizy stwierdzono, że konstrukcja przekrycia jest w stanie przenieść obciążenie: „ciężar własny $\times 1,35$ + ciężar śniegu $\times 1,5 \times 0,3429$ ”. Przy wyższym stopniu obciążenia przekrycia nie udało się uzyskać zbieżności rozwiązania. Nośność łupiny była niewystarczająca do przeniesienia występujących obciążeń. Zaproponowano zatem dwa sposoby wzmocnienia łupin w postaci przyklejanych w różny sposób do łupiny warstw tkanin i mat z włókna szklanego. Zaproponowano również wzmocnienia wzdłuż otworów znajdujących się w łupinach i wzdłuż kołnierzy promieniowych. Wg obliczeń, po wzmocnieniach łupiny mogły przenieść następujące obciążenia: „ciężar własny $\times 1,35$ +ciężar śniegu $\times 1,5 \times 1,45$ ”. Obciążenia łupin w powyższych austriackich opracowaniach [3] zostały ograniczone tylko do ciężaru własnego łupiny i obciążenia śniegiem. Nie uwzględniono obciążenia przykrycia parciem wiatru, podciśnieniem technologicznym oraz obciążenia wywołanego przez dwóch poruszających się pracowników. Wątpliwości budzi również przyjęty sposób obciążenia śniegiem łupin jak dla dachu cylindrycznego. Dla dwóch największych obciążeń otrzymano maksymalne ugięcie ok. 32,26 cm $> l/100 = 21,35$ cm. Jest to duże ugięcie łupiny.

W zaprojektowanym przekryciu kolebkowym występuje nieliniowość geometryczna i fizyczna. Nieliniowość geometryczna jest wynikiem dużych przemieszczeń i dużych odkształceń. W konstrukcji połączonych łupin występują luzy i ich warunki brzegowe zmieniają się w miarę narastania obciążeń (por. fot. 5 i 6). Konstrukcja przekrycia nie spełnia warunków Clapeyrona – występuje nieliniowość fizyczna. Ścisłe obliczenie konstrukcji z luzami jest kłopotliwe. Na pewno jest się po stronie bezpiecznej gdy rozpatruje się pracę tylko jednej łupiny. Przyjmowanie większej liczby połączonych łupin i zakładanie wyidealizowanych warunków brzegowych spełniających postulaty Clapeyrona prowadzi do zawyżenia oszacowania możliwości przenoszenia obciążania przez łupiny co zrobiono w kilku opracowaniach.

Na temat przyczyn awarii pokryw powstało kilka opracowań w kraju jak i zagranicą [3]. Wykonano również badania laboratoryjne cech mechanicznych kompozytu GRP takich jak: wytrzymałość na rozciąganie i na zginanie oraz modułu sprężystości przy rozciąganiu i przy zginaniu. Badania wykonano zarówno w kierunku podłużnym jak i poprzecznym kompozytu.

Autorzy opracowań [3] analizując przyjęte w obliczeniach założenia, wskazują, że niektóre założenia są kontrowersyjne a nawet i błędne. Obliczenia statyczne wykonywane są dla danych materiałowych przyjętych w projekcie jak i dla danych materiałowych uzyskanych we własnych badaniach. Nieomal we wszystkich opracowaniach pojawia się wniosek, że „przyczyną uszkodzenia łupiny, jest lokalna utrata stateczności w miejscu koncentracji naprężeń, tj. na grzbiecie łupiny tuż za miejscem łączenia elementów. Ewentualne niejednorodności materiału mogły przyspieszyć efekt zniszczenia łupiny”. Jako przyczynę lokalnej utraty stateczności podają oni defekt technologiczny materiału, który mógł wystąpić w fazie produkcji, transportu lub montażu lub razem w poszczególnych fazach. Zwrócono również uwagę, że na przyjęto niewielki globalny współczynnik bezpieczeństwa ($\gamma = 2,09$). W jednej z opinii autor kwestionuje celowość naprawy przekrycia osadników „ponieważ nakład byłby bardzo wysoki, jakość niemożliwa do skontrolowania, zaś rodzaj, ilość oraz miejsca niejednoznaczne”. Opinia zakończona jest stwierdzeniem: „ze względu na nagromadzenie wad należałoby zrezygnować z poprawy stanu powłok”.

4. Analiza obliczeniowa łupiny

Analizę obliczeniową łupiny [4] przeprowadzono programem Abaqus uwzględniając wartość naprężenia krytycznego powłoki. Naprężenia krytyczne dla powłoki mającej postać wycinka stożkowego obliczono zgodnie z projektem [1] tj. jak dla idealnej (nie wykazującej niedoskonałości kształtu) powłoki walcowej pod działaniem równomiernego ściskania (por. [2] i [5]). Naprężenie krytyczne σ_{kr} powłoki o promieniu r , grubości t i przy $\nu = 0,3$ wyniesie:

$$\sigma_{kr} = 0,6 \frac{Et}{r} \quad (1)$$

Cienkie powłoki stożkowe są wrażliwe na początkowe niedokładności kształtu (imperfekcje) i wartość naprężenia krytycznego jest znacznie niższa [7] i zamiast wzoru (1) należy stosować wzór (2)

$$\sigma_{kr} = 0,19 \frac{Et}{r} \quad (2)$$

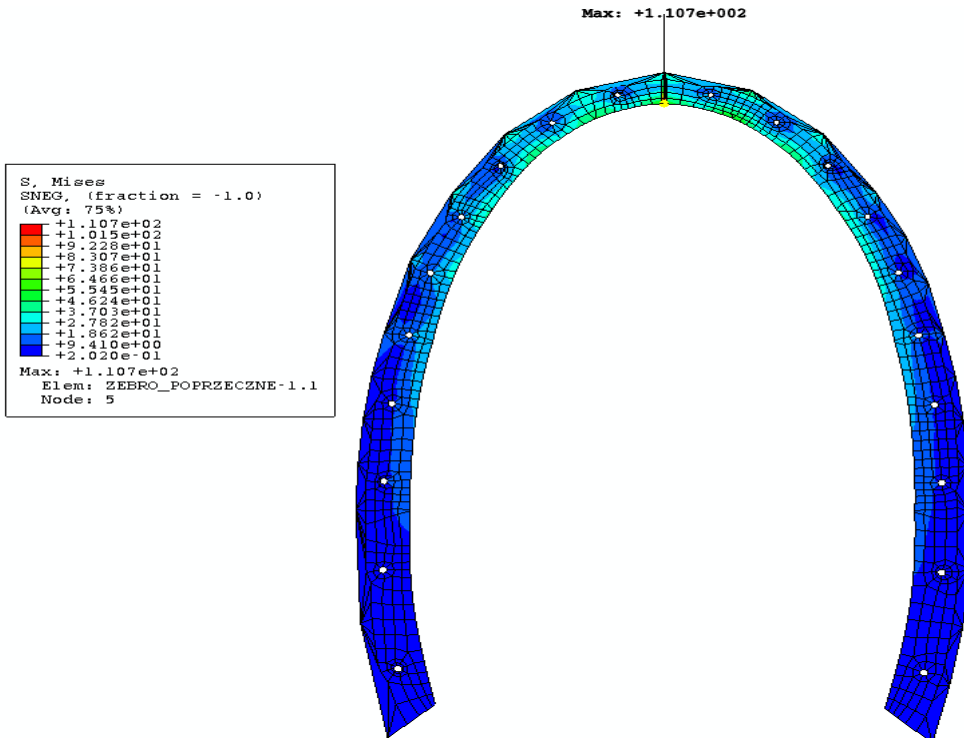
Przyjmując dane materiałowe z projektu [1]: $E = 8450$ MPa, $t = 6,591$ mm oraz uwzględniając promień łupiny w pobliżu wręgi porzeczej $r = 1211$ mm, otrzymujemy dla idealnej powłoki naprężenie krytyczne $\sigma_{kr} = 27,6$ MPa. Jeżeli uwzględnic średnią wartość z modułów sprężystości w kierunku podłużnym i porzecznym przy zginaniu $E_{sr} = 6220$ MPa (wg. badań wykonanych w Politechnice Warszawskiej [6]) oraz nominalną grubość laminatu (ok. 5 mm) to naprężenie krytyczne nie przekroczy $\sigma_{kr} = 16,0$ MPa. W przypadku uwzględnienia imperfekcji, (które w rzeczywistości są nie do uniknięcia przy produkcji kontaktowej laminatu) naprężenia krytyczne będą wynosiły odpowiednio $\sigma_{kr} = 8,3$ MPa i $\sigma_{kr} = 4,6$ MPa. Po przekroczeniu naprężenia krytycznego odkształcenia w laminacie lokalnie wzrastają szybko i może nastąpić jego zniszczenie wskutek kruchej pęknięcia.

W obliczeniach statycznych [4] przyjęto, że powłoka laminatu jest ciałem izotropowym i sprężystym, o liczbie Poissona 0,3. Na podstawie badań [6] zastosowano liniową schematyzację wykresu σ - ε . Obliczenia statyczne przeprowadzone były dla dwóch poziomów naprężenia krytycznego w łupinie: $\sigma_{kr} = 16,0$ MPa i $\sigma_{kr} = 27,6$ MPa. Do analizy naprężeń w kołnierzach bocznych i kołnierzach wewnętrznych przyjmowano pełen zakres zależności σ - ε .

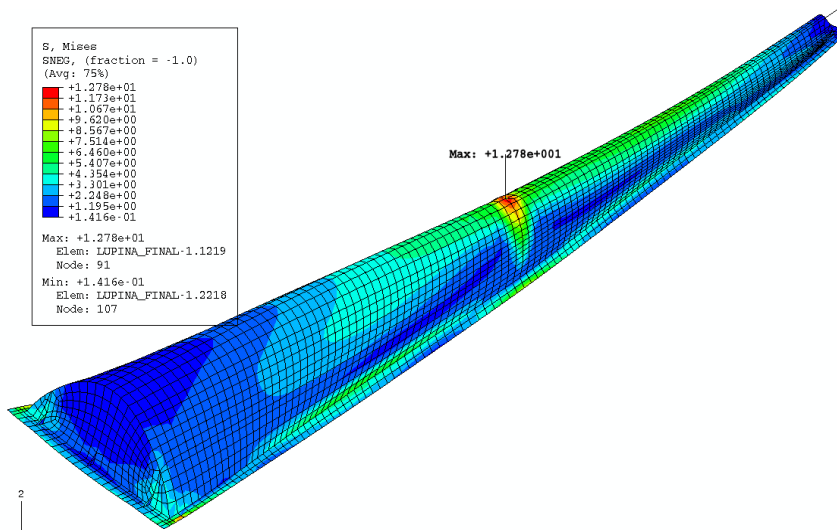
4.1 Faza montażu łupiny

Rozpatrywano pojedynczą łupinę scaloną z trzech części na budowie. Przyjęto, że łupina jest swobodnie podparta na przeciwległych końcach. Ponadto przyjęto, na korzyść bezpieczeństwa konstrukcji, że grubość wręgi w miejscu połączenia trzech elementów tj. w „zworniku” jest o połowę mniejsza niż w pozostałych miejscach. Grubość ta wynika ze sposobu połączenia kołnierzy.

Na rys. 8 podano naprężenia zastępcze we wrzędze wg hipotezy Hubera–Missesa–Hencky`ego (H–M–H) od ciężaru własnego łupiny. Dane materiałowe i mechaniczne przyjęto z projektu [1]. Należy tutaj zwrócić uwagę na bardzo dużą wartość naprężenia zastępczego w wrzędze 110,7 MPa. Jeżeli w trakcie łączenia elementów wprowadzono przez połączenia śrubowe naprężenia wstępne to wartość naprężenia we wrzędze mogła być jeszcze większa niż obliczono. Mogło to powodować uszkodzenie wręg przy montażu łupin. Natomiast w łupinie największe naprężenie zastępcze wg hipotezy H–M–H od ciężaru własnego (7,52 kN) występują w pobliżu wręgi (por. rys. 9) i wynoszą one 12,78 [MPa], a więc naprężenia krytyczne dla danych materiałowych przyjętych w projekcie są przekroczone o 54%, a do rzeczywistych danych materiałowych są przekroczone aż o 178%. A więc łupiny mogły ulec uszkodzeniom już w trakcie montażu.



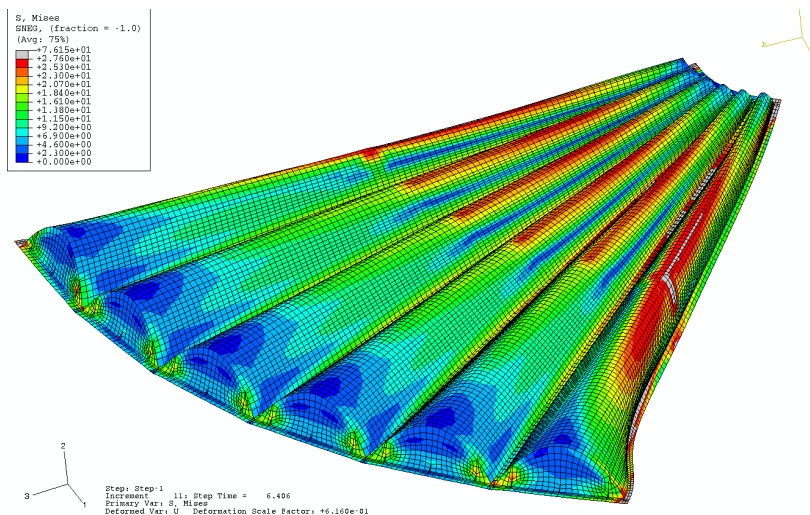
Rys. 8. Naprężenia zastępcze we wrzędze wg hipotezy Hubera – Missesa – Hencky`ego (H–M–H) [MPa] od ciężaru własnego łupiny



Rys. 9. Naprężenia zastępcze w łupinie wg hipotezy H–M–H [MPa] od ciężaru własnego

4.2 Faza eksploatacji przekrycia

W obliczeniach [4] przyjęto segment składający się z sześciu łupin (rys. 10). Łupiny w segmencie połączone są ze sobą tworząc tzw. konstrukcję luzową tzn. poszczególne łupiny nie są ze sobą połączone na stałe lecz występują pomiędzy nimi niewielkie luzy w połączeniach. W kołnierzach zewnętrznych dla śrub M12 wykonane są otwory o średnicy 20 mm, a co sześć łupin luz ten wynosi 33 mm. W konstrukcji z luzami w połączeniu zmieniają się warunki brzegowe w miarę narastania obciążeń. Ścisłe obliczenie konstrukcji z luzami jest kłopotliwe. Na pewno jest się po stronie bezpiecznej gdy analizuje się pracę tylko jednej łupiny. Przyjmowanie do obliczeń większej liczby połączonych ze sobą łupin prowadzi do przeszacowania nośności przekrycia.



Rys. 10. Naprężenia zastępcze wg hipotezy H–M–H w segmencie od 6,4 × ciężar własny

Przyjęto, że segment jest identycznie podparty jak łupina – na przeciwległych łukach. Ponadto przyjęto, że w miejscu połączenia łupin istnieje swoboda obrotu kołnierzy zewnętrznych, natomiast przemieszczenia liniowe łupin są zgodne. Analizowano dwa rodzaje warunków brzegowych wzdłuż zewnętrznych promieni kołnierzy. Przyjmowano, swobodne przemieszczenie kołnierzy zewnętrznych lub blokowano poziome przemieszczenia normalne do promieni skrajnych segmentu na kołnierzach zewnętrznych.

Na rys. 10 podano naprężenia zastępcze w segmencie wg hipotezy H–M–H dla warunków brzegowych w postaci możliwości swobody przemieszczenia kołnierzy zewnętrznych segmentu. Naprężenia krytyczne (27,6 MPa – dla danych materiałowych z projektu i dla idealnej powłoki) w skrajnych łupinach występują przy obciążeniu równoważnym 6,4 g ciężaru własnego. Natomiast po uwzględnieniu rzeczywistych danych materiałowych i imperfekcji naprężenia krytyczne wystąpią przy obciążeniu niewiele większym od 1g. Stateczność skrajnych łupin jest niedostateczna.

5. Podsumowanie

Kontrolne obliczenia statyczne pojedynczej łupiny oraz sześciu łupin połączonych w jeden segment wykonano programem Abaqus. W zaprojektowanej konstrukcji przekrycia kolebkowego zbiornika występuje nieliniowość geometryczna i fizyczna. Imperfekcje znacznie obniżają obciążenie krytyczne. Przyjęcie naprężenia krytycznego, jak dla idealnie wykonanej powłoki, prowadzi do zawyżenia wartości obciążenia krytycznego. Naprężenie krytyczne zależy od modułu sprężystości podłużnej jak i wymiarów przekroju poprzecznego łupiny i warunków brzegowych. Naprężenie krytyczne w powłoce stożkowej wykonanej z laminatu wyznaczono jak dla powłoki walcowej ściskanej w kierunku tworzących. Z obliczeń wynika, że naprężenia i przemieszczenia łupin zmieniają się w szerokim zakresie w zależności od przyjętej wartości naprężenia krytycznego i przyjętych warunków brzegowych. Przyjmując nawet wartości naprężenia krytycznego dla idealnej powłoki (bez imperfekcji) stany graniczne nośności i użyteczności są przekroczone. Zatem łupiny zostały zaprojektowane niepoprawnie. Wprowadzanie dodatkowych wzmocnień i usztywnień w niewielkim stopniu wpłynie na zwiększenie nośności łupin. Przy wprowadzeniu nowych niesymetrycznie rozłożonych warstw laminatu pojawiają się w konstrukcji sprzężenia naprężeń od stanu tarczowego i giętnego [8]. Naprężenia te mogą powodować wystąpienie zjawiska delaminacji.

Literatura

1. Dokumentacja Projektowa modernizacja oczyszczalni ścieków w Warszawie. 2008/2009.
2. Widemann J.: *Leichtbau*, Bd. 1 Elemente, Springer Verlag, Berlin 1986.
3. Opinie i ekspertyzy dot. pokryw osadników wstępnych 2009/2010.
4. Lutomirski Sz.: *Opinia techniczna dotycząca przyczyn awarii pokryw osadników wstępnych na terenie oczyszczalni ścieków....*, Warszawa 2010.
5. Timoshenko S. P., Gere J. M.: *Teoria stateczności sprężystej*, Arkady, Warszawa 1963.
6. Ajdukiewicz C., Lutomirski Sz.: *Sprawozdanie z badań wytrzymałościowych próbek kompozytu GRP pobranego z łupiny przekrycia osadnika wstępnego w oczyszczalni ścieków*. Wydziału Inżynierii Lądowej PW, Warszawa 2010.
7. Brzoska Z.: *Statyka i stateczność konstrukcji*, PWN, Warszawa 1965.
8. German J.: *Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych*, skrypt Politechniki Krakowskiej, Wydział Inżynierii Lądowej, Katedra Wytrzymałości Mat., Kraków 2001.